

MODELACION INVERSA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

ROMÁN ANDRÉS AMEZQUITA CORREDOR

JOHN ALEXANDER JIMENEZ HERRERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2006**

MODELACION INVERSA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

**ROMAN ANDRES AMEZQUITA CORREDOR
JOHN ALEXANDER JIMENEZ HERRERA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para
optar al título de ingeniero civil**

**Director
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON
INGENIERO CIVIL Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2006**

DEDICATORIA

*A mis padres por su apoyo incondicional, comprensión
y enseñanzas.*

A mi hermana por sus valiosos consejos.

A mi abuela por el grandioso cariño que logro dejarme.

Román Amézquita

*Dedico este trabajo a aquellas personas que hicieron posible
este proceso de aprendizaje, que me apoyaron y estuvieron
a mi lado durante el desarrollo del proyecto*

*A Dios,
por permitir alcanzar mis objetivos
y rodearme de gente y cosas buenas.*

*A mi madre,
por su constante apoyo
incondicional y por enseñarme
los valores fundamentales para
ser una persona íntegra.*

*A mis hermanos,
Duvan y Edna,
por su compañía y apoyo continuo*

*A Marco T,
por su colaboración incondicional*

*A Julianita, mi novia,
por su motivación y apoyo,
por regalarme alegría todos los días*

*A mis amigos del alma,
por sus consejos y apoyo*

John Jimenez

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Eduardo Castañeda, por la dedicación y recomendaciones ofrecidas durante la elaboración de este proyecto.

Al ingeniero Oscar Giovanon, por su colaboración y orientación en el manejo y préstamo del programa BACKMOD.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	1
1. MARCO TEORICO	3
1.1 CONCEPTOS GENERALES	3
1.1.2 Fundamentos del diseño racional de pavimentos	4
1.2 DEFLEXIONES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	5
1.3 CÁLCULO INVERSO O RETROCALCULO	6
1.4 DEFLECTOMETRO DE IMPACTO – FWD	8
1.4.1 Descripción del FWD	9
1.4.2 Funcionamiento del equipo	10
1.5 OBTENCION DE LAS DEFLEXIONES DE CAMPO	11
1.6 DETERMINACION DE VARIABLES ESTRUCTURALES	13
1.6.1 Módulo resiliente M_r	14
1.6.2 Módulo equivalente E_p	14
1.6.3 Número estructural SN	15
2. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA EL CÁLCULO INVERSO.	16
2.1 INTRODUCCION	16
2.2 CALCULO INVERSO CON EL PROGRAMA BAKFAA	17
2.2.1 Parámetros de entrada	18
2.2.2 Parámetros de salida	20
2.3 CALCULO INVERSO CON EL PROGRAMA BACKMOD	21
2.3.1 Formulaciones	22
2.3.2 Parámetros de entrada	23
2.3.3 Parámetros de salida	28
2.4 CALCULO INVERSO CON MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	29
2.4.1 Especificaciones programa ANSYS 8.0	30
2.4.2 Conceptos generales	31
2.4.3 Entorno de ANSYS	31
2.4.4 Partes del GUI	32
2.4.5 Organización del menú principa	35
2.4.6 Opciones auxiliares	36
2.4.7 Procedimiento de construcción del modelo	37

3.0 EVALUACION Y VERIFICACION DE LAS METODOLOGIAS DE CALCULO INVERSO	41
3.1 METODOLOGÍA DEL CÁLCULO INVERSO CON EL PROGRAMA BAKFAA.....	43
3.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO INVERSO CON EL PROGRAMA BACKMOD	45
3.3 COMPARACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS A PARTIR DEL PROGRAMA ANSYS	51
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
4.1 CONCLUSIONES	61
4.2 RECOMENDACIONES.....	62
BIBLIOGRAFIA.....	63
ANEXO A	64
ANEXO B	68
ANEXO C	72
ANEXO D	76
ANEXO E.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema representativo del cálculo directo.	5
Figura 2	Variables para el cálculo directo y retrocálculo.	6
Figura 3	Esquema representativo del cálculo inverso.	7
Figura 4	Cuenco de deflexiones	8
Figura 5	Sensores espaciados radialmente desde el plato de carga.	9
Figura 6	Sensores y plato de carga del equipo KUAB 50.	9
Figura7	Deflectómetro de impacto KUAB 50.....	11
Figura 8	Recorrido del deflectómetro en la calzada occidental.....	12
Figura 9	Carga aplicada e impulso generado por el FWD	13
Figura10	Esquema de parámetros de entrada.....	20
Figura 11	Esquema de parámetros de salida.....	21
Figura12	Diagrama de flujo del programa Backmod.....	24
Figura 13	Metodologías de medición de la deformada usadas en campo.	25
Figura 14	Determinación del tipo de auscultación.....	26
Figura 15	Esquema del eje de medición.	26
Figura 16	Datos de la deformada.	27
Figura 17	Datos de la estructura.	28
Figura 18	Datos de salida.	29
Figura 19	Menú de utilidades.	32
Figura 20	Menú de entrada.	33
Figura 21	Barra de herramientas.....	33
Figura 22	Menú principal.....	33

Figura 23	Ventana gráfica.....	34
Figura 24	Ventana de salida.....	34
Figura 25	Ventana de preferencias.....	35
Figura 26	Ventana de ingreso de las propiedades de los materiales.....	38
Figura 27	Datos de entrada del programa BAKFAA. Alternativa N° 1.	44
Figura 28	Datos de salida del programa BAKFAA. Alternativa N° 1.....	45
Figura 29	Datos de entrada del programa BACKMOD. Alternativa N° 1.....	46
Figura 30	Datos de salida del programa BACKMOD. Alternativa N° 1.....	47
Figura 31	Gráfico comparativo de módulos en la subrasante para la alternativa N° 1.....	48
Figura 32	Gráfico comparativo de deflexiones para la alternativa N° 1.....	49
Figura 33	Grafico comparativo de módulos entre el BAKFAA y el BACKMOD para la alternativa N° 1.....	50
Figura 34	Distribución de módulos.....	52
Figura 35	Valores de módulos insertados en el ANSYS.....	52
Figura 36	Distribución de desplazamientos arrojados por el programa ANSYS para la alternativa N° 1.....	53
Figura 37	Parámetros de respuesta usando el programa BAKFAA para la primera iteración.....	54
Figura 38	Parámetros de respuesta usando el programa BAKFAA para la segunda iteración.....	55
Figura 39	Parámetros de respuesta usando el programa BAKFAA para la tercera iteración.....	55
Figura 40	Parámetros de respuesta usando el programa BACKMOD para la primera iteración.....	56
Figura 41	Parámetros de respuesta usando el programa BACKMOD para la segunda iteración.....	57

Figura 42 Parámetros de respuesta usando el programa BACKMOD para la tercera iteración.	57
Figura 43 Comparación curvas de deflexiones para la alternativa N° 1.	58
Figura 44 Gráfico comparativo de módulos y porcentajes de error para la alternativa N° 1.	59
Figura 45 Entorno principal del programa everstress	64
Figura 46 Menú de inicio.....	64
Figura 47 Opción file.....	65
Figura 48 Ventana de entrada de datos de la estructura.	65
Figura 49 Ventana de entrada de datos de cargas y puntos de evaluación. ...	66
Figura 50 Hoja tipo de resultados del software everstress.	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Resumen de los niveles de procesamiento ANSYS.....	32
Tabla 2	Datos de estudios realizados en la carrera 27.	41
Tabla 3	Módulos promedio, espesores y relaciones de poisson de los puntos de campo a analizar.....	43

RESUMEN

TÍTULO:

MODELACIÓN INVERSA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO*

AUTORES:

AMEZQUITA CORREDOR, Román Andrés

JIMENEZ HERRERA, John Alexander**

PALABRAS CLAVES:

Modelación inversa; Retrocálculo; Herramientas computacionales; Programa; Elementos Finitos, Módulos resilientes.

DESCRIPCIÓN:

La presente investigación sigue una metodología de retrocálculo que implementa tres herramientas computacionales para determinar los valores de módulos de las capas de un pavimento flexible. Con la cuenca de deflexiones, los espesores de cada capa y con ayuda de los programas ANSYS, BACKMOD y BAKFAA, se obtendrán los módulos de los materiales granulares y de la subrasante en cada punto de análisis.

En términos generales, el retrocálculo, consiste en determinar los valores de los módulos de las capas de un pavimento que mejor modelan la forma y magnitud de la cuenca de deflexiones medidas. Los módulos medidos de esta manera se consideran representativos de la respuesta estructural del pavimento.

La investigación esta apoyada en datos de campo obtenidos mediante el deflectómetro de impacto (FWD) basada en los modelos de la mecánica racional de pavimentos. Dicha información ha sido recopilada, fundamentada en trabajos de campo hechos en diferentes puntos de la ciudad de Bucaramanga. Buscando verificar y evaluar cual metodología es la más aproximada, se compararon dichos análisis con el modelamiento de elementos finitos, el cual ofrece mayores aproximaciones a una estructura real de pavimento, orientando dichos análisis a la elaboración de un modelo con características similares a una estructura encontrada en campo, con lo cual se estaría complementando estudios realizados en lo que respecta al diseño de un pavimento.

* Tesis de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Director Ing. Ph.D. Eduardo Castañeda.

ABSTRACT

TITLE:

INVERSE MODELING OF STRUCTURES OF PAVEMENT*

AUTHORS:

AMEZQUITA CORREDOR, Román Andrés

JIMENEZ HERRERA, John Alexander**

KEYWORDS:

Inverse modelling, Back-Calculation, Computational tools, Software, Finite elements, Deflections, Resilient modules.

DESCRIPTION:

The present investigation follows a back-calculation methodology that implements three computational tools to determine the values of modules of the layers of a flexible pavement. With the deflections basin, the thickness of each layer and with the help of the programs ANSYS, BACKMOD and BAKFAA, the modules of the granular materials will be obtained and those of the subgrade in each analysis point.

In general terms, the back-calculation consists on determining the values of the modules of the layers of a pavement that rather they model the form and magnitude of the basin of measured deflections. The modules measured in this way, are considered representative of the structural answer of the pavement.

The investigation is supported in data field, obtained through the falling weight deflectometer (FWD) based on the models of the rational mechanics of pavements. This information has been gathered, based in work fields made in different points of the city of Bucaramanga. Trying to verify and to evaluate which methodology is the most approximate, this analyses were compared to the modeling of finite elements, which offers higher approaches to a real structure of pavement, guiding these analyses to the elaboration of a model with similar characteristics to a structure found in field, supplementing thus studies carried out in the field of the design of a pavement.

* Degree project

** Faculty of Physical–Mechanical Engineering
Civil Engineering School
Advisor Eng. Ph.d Eduardo Castañeda.

INTRODUCCION

Actualmente el diseño racional de pavimentos ha venido adquiriendo una gran importancia de tal forma que esta empezando a desplazar a los métodos tradicionales, de cierta forma empíricos. Sin embargo, para establecer la vida útil de una estructura de pavimento en servicio y el diseño de refuerzos teniendo en cuenta la teoría racional de pavimentos, son temas que requieren especial atención en el campo de la investigación. Por lo anterior, se hace necesario estudiar los módulos de las capas de una estructura de pavimento en servicio, mediante ensayos no destructivos. De aquí la importancia de estudiar el calculo inverso de los módulos de las capas de la estructura de un pavimento a partir de las deflexiones medidas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo del presente estudio es evaluar esas metodologías de calculo inverso para determinar el módulo de las capas de una estructura de pavimento flexible, a partir de las deflexiones tomadas, es decir, que no se persigue llegar a establecer nuevas metodologías de retrocálculo cambiar o reevaluar la teoría al respecto.

Durante el estudio se dispondrá de gran cantidad de información secundaria, la cual será de gran utilidad para la verificación de las metodologías, pero sería deseable realizar ensayos de laboratorio para poder evaluar las metodologías a partir de la información tomada directamente. Sin embargo, debido a que esto implicaría efectuar apiques y/o perforaciones en una vía pública, para después hacer los ensayos en laboratorio a las muestras obtenidas, se hace dificultoso tener este tipo de información.

La metodología de estudio se verá reflejada a medida que se avance en la investigación, pudiéndose observar sus alcances a medida que se obtengan los resultados más apropiados. Como se podrá ver, inicialmente se efectuaran los pasos recomendados para este tipo de trabajos, para lo cual en una primera fase se establecerá los objetivos, la justificación, alcance, marco teórico, y metodología. En una segunda fase de la investigación, se reunirán las metodologías de retrocálculo a partir de deflexiones tomadas con el deflectómetro de impacto, para posteriormente detallar la recolección de información secundaria disponible para evaluar las metodologías, lo que llevará a definir tres tramos de prueba con lo cual se contará con suficiente información al respecto. Se tomo como alternativa los estudios realizados en el corredor pre-troncal carrera 27, el cual va hacia el norte por la carrera 27 hasta la calle 9ª (UIS) y se conecta con la troncal puerta del sol – carrera 15. Para el estudio a seguir, se tomarán 3 puntos de la calzada occidental: K1 + 050, K1 + 900 y K2 + 700, para la cual se cuenta con gran cantidad de información disponible y de gran interés para el presente estudio. En base a la información

disponible, se evaluarán y verificarán las metodologías para poder establecer las correspondientes conclusiones y recomendaciones.

Poder predecir los módulos de las capas de una estructura de pavimento asfáltico a partir de las deflexiones, es muy beneficioso desde el punto de vista ingenieril, ya que se está contribuyendo a solucionar la problemática del sector vial en nuestro país, analizando la confiabilidad de estos métodos y dándolos a conocer, para así evitar tener que recurrir a ensayos destructivos y costosos para poder diseñar refuerzos de estructuras en servicio.

1. MARCO TEORICO

En términos generales, se describen los temas más importantes en los cuales se basa esta investigación, como lo son la medida de las deflexiones por intermedio del deflectómetro de impacto (FWD), y las metodologías mediante las cuales se pueden obtener los módulos de las capas del pavimento. Sin embargo, inicialmente se hace una breve descripción de ciertos conceptos generales relacionados con las principales características del método de diseño racional de pavimentos, ya que en su teoría se enmarca la investigación y con el fin de encausar al lector al concepto de modelación inversa de una estructura.

1.1 CONCEPTOS GENERALES

En este numeral, se describen las variables fundamentales del diseño racional de pavimentos, hasta llegar a la importancia de calcular los módulos de las capas de pavimento a partir de las medidas tomadas con el Deflectómetro de Impacto (FWD).

1.1.1 Características del diseño racional de pavimentos. El método de diseño racional de pavimentos, tiene las siguientes características¹:

- Se basa en teorías generales de esfuerzos y deformaciones acordes con el estado actual del conocimiento en ingeniería y con el comportamiento de la estructura del pavimento.
- Utiliza las propiedades físico-mecánicas de los materiales realmente utilizados en la construcción de la estructura, las cuales pueden determinarse directamente mediante mediciones de laboratorio.
- Permite la selección de los diferentes criterios básicos para el diseño tales como cargas y tráfico de diseño, vida útil de servicio, aspectos climáticos y del ambiente, nivel de riesgo aceptable y otros.
- Se facilita la comparación relativa entre diferentes soluciones estructurales en las mismas condiciones generales, lo cual permite efectuar la selección de las alternativas de construcción más convenientes desde los puntos de vista técnico, funcional y económico.

¹ INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO & UNIANDES. Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D.C. 2001.p. 35

- Permite la utilización de los materiales disponibles dentro de los parámetros generales de diseño establecidos.
- Se puede considerar la utilización de nuevos materiales, adiciones, productos o en general cualquier innovación que los diseñadores y/o constructores deseen realizar, siempre dentro de los parámetros generales de diseño establecidos.

1.1.2 Fundamentos del diseño racional de pavimentos. Igualmente, el método racional de diseño de pavimentos se fundamenta en cinco aspectos principales²:

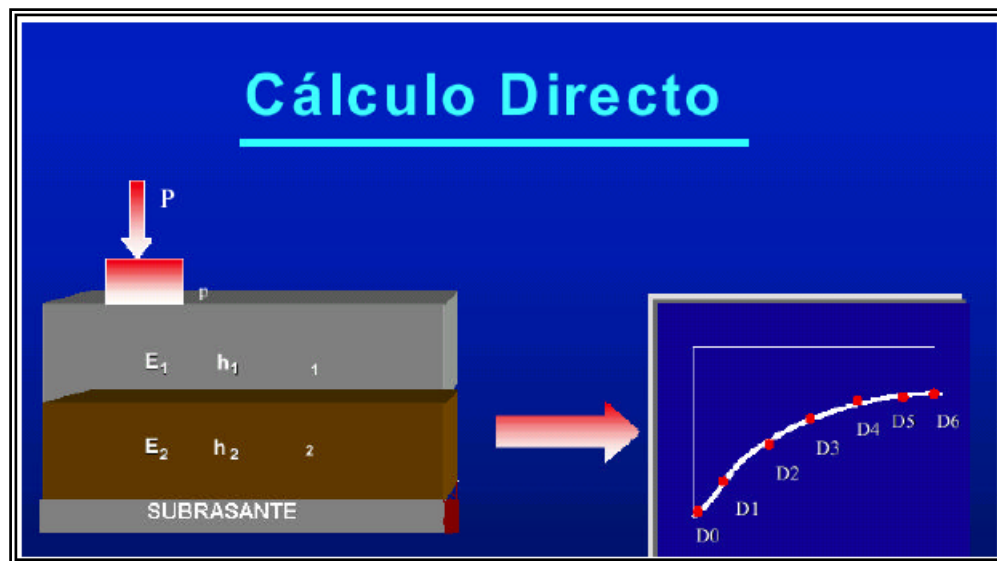
- El tráfico, especificado como el tráfico equivalente y según las clases de tráfico.
- Su vida útil, especificada con base en la probabilidad de falla cuya escogencia se basa en el análisis de la función económica de la vía para la cual se diseña la estructura.
- Los datos climáticos y del ambiente, que incluyen los datos descriptivos de las condiciones climáticas del sitio del proyecto que tienen una influencia directa en la escogencia de las variables de cálculo.
- Los parámetros descriptivos de los materiales, que son un conjunto de variables que describen las propiedades de la subrasante y de los materiales de pavimento necesarias para el análisis de esfuerzos en el pavimento y para su diseño.
- Las características geotécnicas de la subrasante, que son un conjunto de parámetros que describen las propiedades de la subrasante.

Para el cálculo de las solicitaciones en el pavimento inducidas por la carga de referencia, el suelo de subrasante se supone como un medio elástico definido por el módulo resiliente y la relación de Poisson; razón por la cuál, para efectos del presente estudio, de los aspectos mencionados anteriormente, las características geotécnicas y mecánicas de la subrasante y de los materiales utilizados en las diferentes capas de pavimento, como son: el módulo elástico, la relación de Poisson con base en las medidas tomadas por el deflectómetro de impacto es posible realizar cálculos inversos de los módulos de las diferentes capas que conforman un pavimento flexible, siempre y cuando se mida toda la cuenca de deflexión.

² Ibid., p. 35

En conclusión, para el diseño de una estructura de pavimento; a partir de las características de los materiales a utilizar, junto con las de la subrasante, se establecen los espesores de las capas y se determinan las tensiones y deformaciones que se van a producir en la estructura debido a las solicitaciones impuestas por el tráfico, y se comprueba que estén en un límite admisible. Es decir se realiza un *cálculo directo*, mediante el cual se determina el estado tensional (desplazamientos, deformaciones y tensiones) conocidos los espesores y los módulos de las capas. En el siguiente esquema se ilustra el proceso:

Figura 1. Esquema representativo del cálculo directo.



Fuente: IDU, Manual de diseño de pavimentos para Bogotá.

1.2 DEFLEXIONES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

Como se mencionó anteriormente, el pavimento es una estructura constituida por varias capas y materiales (multicapa) que al ser sometida a una determinada solicitación, normalmente una carga perpendicular que produce un estado de tensiones y deformaciones, se desplaza en sentido vertical en magnitudes muy pequeñas (del orden de centésimas o milésimas de milímetro). Este desplazamiento vertical se conoce con el nombre de deflexión³.

En términos generales, la deflexión es la flecha del desplazamiento hacia abajo de la superficie de la estructura del pavimento producido por la aplicación de

³ AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures. Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993. p. 84.

una carga. En este concepto debe establecerse la diferencia entre la deflexión recuperable (elástica) y la deflexión permanente o residual.

El análisis de la estructura caracterizada por un modelo de cálculo, permite determinar el desplazamiento teórico y compararlo con el desplazamiento obtenido mediante técnicas de reconocimiento con equipos que miden las deflexiones que se producen bajo una carga de ensayo. La deflexión es una característica de cada tipo y estado del pavimento que está intrínsecamente relacionada con los valores de los módulos de las capas. Existiendo una correspondencia entre los valores de los módulos y los valores de la deflexión.

A continuación se ilustra en términos generales, el procedimiento para el diseño de una estructura nueva de pavimento (*Cálculo Directo*), en comparación con el procedimiento para diseñar un refuerzo mediante el cálculo de los módulos de las capas de la estructura existente, a partir de las deflexiones (*Calculo Inverso* o "Retrocálculo").

Figura 2. Variables para el cálculo directo y retrocálculo.

CALCULO DIRECTO

$$\text{Datos}(E, \nu, h) \Rightarrow \text{Resultados}(\delta, \sigma, \varepsilon)$$

CÁLCULO INVERSO O RETROCALCULO

$$\text{Resultados}(\delta, \sigma, \varepsilon) \Leftarrow \text{Datos}(E, \nu, h)$$

1.3 CÁLCULO INVERSO O RETROCALCULO

Retrocálculo es la traducción local del término "backcalculation", para el cual se utiliza la expresión "cálculo inverso" que quizás resulta más apropiada y descriptiva.

Las diferentes teorías estructurales permiten el cálculo de tensiones, deformaciones y deflexiones a partir de una estructura dada, si se conoce la carga aplicada, los espesores de las capas y sus parámetros estructurales (módulos y coeficientes de Poisson). Evidentemente, puede calcularse y obtenerse de esta manera la curva de deformación del pavimento, es decir, las deflexiones que se originan en la superficie del mismo a diferentes distancias de la carga.

El retrocálculo es precisamente el cálculo inverso. Conociendo la curva de deformación del pavimento (deflexiones medidas con el FWD en este caso), la

carga aplicada y los espesores que componen las diferentes capas de la estructuras, se trata de determinar y analizar diversos parámetros estructurales (módulos) característicos del pavimento.

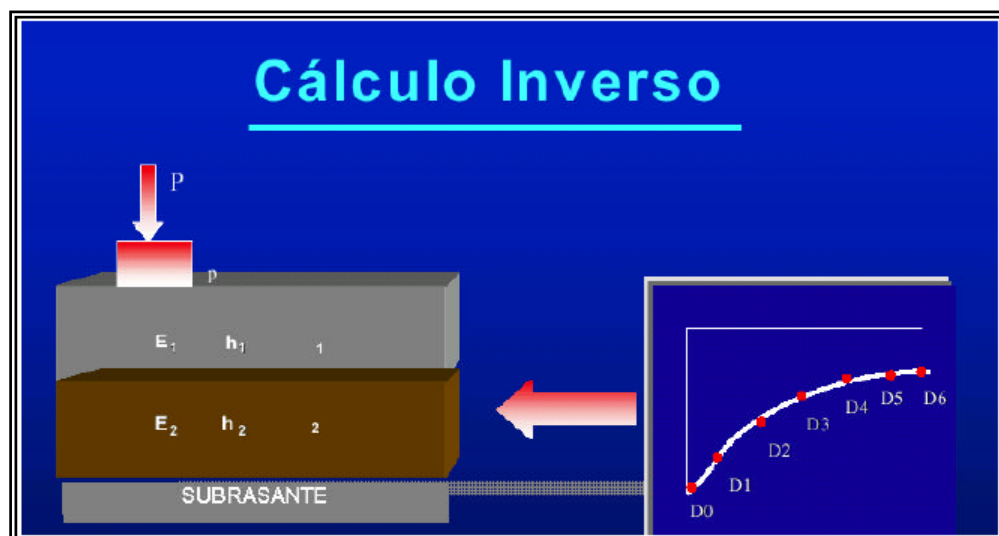
Por lo tanto, un método simple y práctico para analizar la integridad estructural de pavimentos existentes es, mediante el FWD, aplicar una carga al mismo y medir la curva de deformación resultante (deflexiones), para luego determinar a partir de la misma los parámetros estructurales actuales (módulos) del pavimento.

El retrocálculo involucra el cálculo de deflexiones teóricas debido a la aplicación de la carga, conocidos los espesores de la estructura en cuestión y asumiendo, en primer instancia, determinados valores para los módulos de cada una de las capas.

Estos valores teóricos de deflexiones se comparan con los valores medidos. Mediante un proceso iterativo se ajustan entonces los módulos asumidos inicialmente, hasta que las curvas de deformación teórica (calculadas) y medida (FWD) ajusten razonablemente bien. Los módulos hallados de esta manera se consideran representativos de la respuesta del pavimento frente a la carga, y por lo tanto pueden ser utilizados luego para el cálculo y análisis de tensiones o deformaciones específicas en la estructura.

El procedimiento utilizado para obtener los módulos de las capas del pavimento a partir de las deflexiones medidas es un cálculo inverso conocido como *retrocálculo*, el cual se puede ilustrar en el siguiente esquema:

Figura 3. Esquema representativo del cálculo inverso.



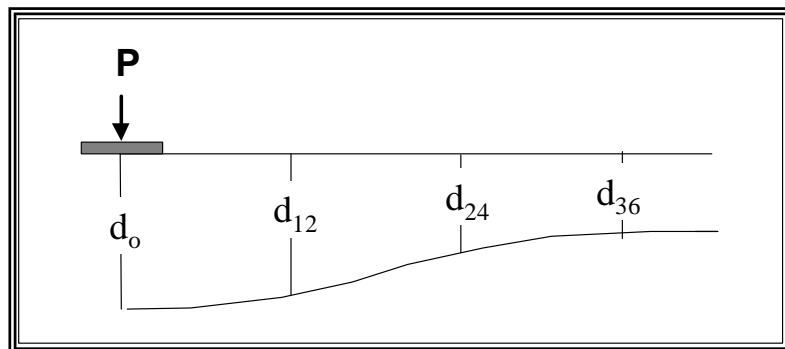
Fuente: IDU, Manual de diseño de pavimentos para Bogotá.

1.4 DEFLECTOMETRO DE IMPACTO – FWD

El desarrollo tecnológico de los últimos 25 años coincide en señalar al FWD como el equipo más adecuado para la evaluación estructural y el diseño de refuerzos de pavimentos rígidos y flexibles. La ventaja que este equipo ofrece es que permite aplicar una carga estandarizada sobre la estructura y determinar a partir del cuenco de deflexiones las variables estructurales como son: módulo resiliente M_r , módulo equivalente de los materiales de la estructura de pavimento existente E_p y el número estructural SN , todas las anteriores ajustadas bajo la metodología AASHTO, variables fundamentales para la determinación del diagnóstico estructural y por ende los espesores de rehabilitación del pavimento, si es del caso (véase figura 4).

En la variabilidad de componentes que se pueden obtener de un pavimento con esta tecnología, es donde radican los beneficios que se obtienen de la medición sistemática de cuencos de deflexiones a nivel de red nacional, red local o proyecto específico, ofreciendo holgadamente una ventaja con respecto a los costos de adquisición u operación.

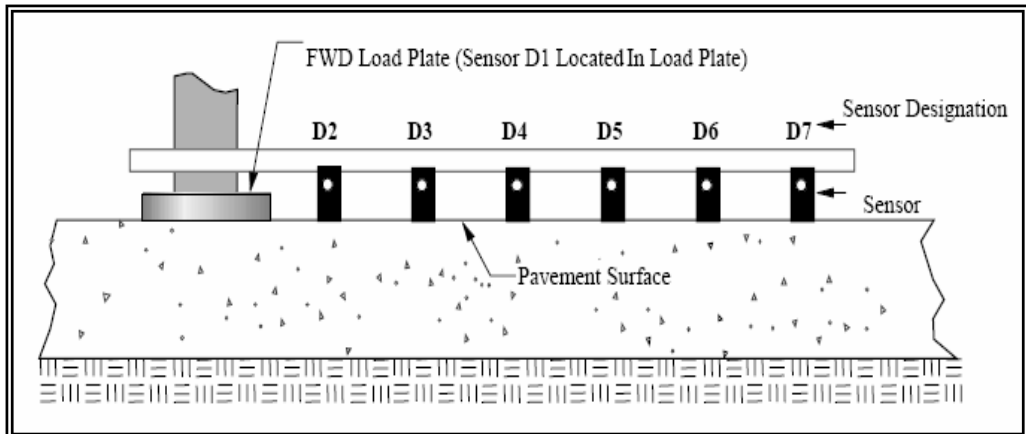
Figura 4. Cuenco de deflexiones



Fuente: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.

El uso de la deflectometría de impacto (FWD) es una práctica cada vez más difundida, debido a las ventajas en la rapidez de la evaluación con respecto a la extracción de testigos con sus ensayos asociados. El objetivo de este instrumento es medir en terreno y según las condiciones de éste, los módulos elásticos de los materiales del subsuelo y los que se encuentran debajo del punto de aplicación de la carga a una profundidad variable de hasta 2 m. En este instrumento se registra la fuerza de impacto y los máximos de deformación registrados mediante los sismómetros (véase figura 5). Con esta información y la aplicación de un modelo elástico, es posible mediante retrocálculo estimar los módulos elásticos de hasta 5 capas estructurales.

Figura 5. Sensores espaciados radialmente desde el plato de carga.



Fuente: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration

Adicionalmente el equipo registra la temperatura del aire y del pavimento, el kilometraje y comentarios que el operador puede introducir mediante el computador que controla la operación.

1.4.1 Descripción del FWD. El equipo consta de un carro de arrastre con los sistemas de carga y medición, una interfase de medición y comunicaciones montado en el vehículo y un sistema de control de ensayo, implementado a través de un programa de computador (véase figura 6).

Figura 6. Sensores y plato de carga del equipo KUAB 50.



Fuente: Archivo fotografico Geovial Ltda.

El carro de arrastre contiene todo el equipo de medición, el sistema hidráulico que proporciona el levantamiento de la carga para luego dejarla caer; el computador es el encargado de controlar todos los procesos realizados por el carro de arrastre tanto en la parte de control, así como la captura de los datos obtenidos por los deflectómetros y por el sensor de carga y almacenarlo para su posterior proceso de oficina, y por último el procesador interfase que es el puente entre el computador y el carro de arrastre el cual transforma las señales eléctricas provenientes de este último, en señales digitales para que el computador las procese.

1.4.2 Funcionamiento del equipo. El procedimiento consiste en aplicar una carga dinámica en forma de impulso, similar (tanto en duración como en magnitud) a la producida por los vehículos pesados que transitan por la carretera; encontrándose esta en el vehículo de arrastre, la cual consta de una serie de masas de diámetros variables dependiendo del modelo y tipo de equipo utilizado en el ensayo que se levantan y se dejan caer sobre una placa de carga que simula la huella del neumático.

Las deflexiones producidas son medidas en micrones (milésimas de milímetros), en siete puntos de ensayo por medio de sensores, entre los cuales tenemos el grupo de geófonos y sismómetros que se encuentran en una barra recta situados a una distancia variable.

Uno de los geófonos se sitúa en la placa de carga y permite medir la deflexión máxima. El operador puede variar el número de masas y la altura a la que se levantan dichas masas con objeto de producir golpes con cargas variables. El vehículo debe estar detenido para realizar la auscultación, por lo que la velocidad media de toma de datos varía en función del número de puntos que se quieran auscultar por kilómetro.

La magnitud de la carga es la medida en KN por otro sensor ubicado dentro del plato de carga durante el instante que la carga es aplicada al pavimento.

En cada uno de estos puntos se miden tres veces las deflexiones producidas por la caída de la carga, durante tres intentos y a distancias por ejemplo de: 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 cm. del centro del plato de carga donde están ubicados los sensores cantantes de la información.

La triple aplicación de la carga permite verificar la posibilidad de repetición del ensayo sobre el mismo punto y ejecutar nuevamente una medición en el mismo instante que se observe dispersión en el resultado.

1.5 OBTENCION DE LAS DEFLEXIONES DE CAMPO

El sistema integrado de transporte masivo de la ciudad de Bucaramanga, creado con el objetivo de agilizar el actual incremento en el flujo vehicular, es una nueva implementación para descongestionar la actual red vial que presenta esta ciudad.

Con este sistema nace una modalidad de transporte terrestre automotor ya fundado en la ciudad de Bogotá, con la cual se pretende modernizar, agilizar, ampliar y complementar los ya existentes corredores viales de la ciudad, los cuales no han podido satisfacer la actual demanda de pasajeros como flujo vehicular.

Para la determinación de las variables estructurales en los diferentes corredores viales, se valieron de metodologías deflectométricas con las cuales compensarían los costos de utilización con las variables necesarias para emprender dicho proyecto.

Para la realización de dichas mediciones se valieron del deflectómetro de impacto FWD KUAB 50 midiendo deflexiones cada 100 metros/carril⁴ (véase figura 7), el cual les permitía encontrar las deflexiones de la estructura de pavimento para luego, con previo conocimiento de los espesores de la estructura, determinar por retrocálculo, las variables estructurales como son el módulo resiliente M_r , módulo equivalente del pavimento E_p , número estructural SN y radio de curvatura R_c .

Figura 7. Deflectómetro de impacto KUAB 50



Fuente: Archivo fotografico Geovial Ltda.

⁴ GEOVIAL LTDA. Informe final metrolínea avenida 27 entre avenida quebradaseca y calle 59. 2005. p. 4.

Como objetivo para este proyecto de investigación, se tomo como alternativa los estudios realizados en el corredor pre-troncal carrera 27 (véase figura 8), el cual va hacia el norte por la carrera 27 hasta la calle 9ª (UIS) y se conecta con la troncal puerta del sol – carrera 15. Para el estudio a seguir, se tomaron 3 puntos de la calzada occidental: K1 + 050, K1 + 900 y K2 + 700.

Figura 8. Recorrido del deflectómetro en la calzada occidental



Fuente: Archivo fotografico Geovial Ltda.

Cada uno de los puntos elegidos nos aportaba de los estudios realizados los siguientes datos: módulo resiliente (M_r), espesores de 2 capas (carpeta asfáltica y capa granular), deflexiones de campo y temperatura del pavimento.

Para realizar una buena evaluación estructural debe tenerse en cuenta que esta depende de su propia capacidad resistente (materiales y espesores), así como del estado de envejecimiento de la carpeta asfáltica, por lo que es necesario realizar la medición de las deflexiones del pavimento complementado con inspección visual de los daños superficiales de la carpeta asfáltica.

Las mediciones consisten en aplicar una carga dinámica en el pavimento (en este caso 40 KN) causada por la caída de una doble masa sobre un plato circular con un diámetro de 12 pulgadas cuya superficie de contacto se asemeja al de la rueda de un camión⁵ (Véase figura 9). El deflectómetro registra la fuerza de impacto, la temperatura de ensayo y los máximos de deformación registrados mediante los sismómetros.

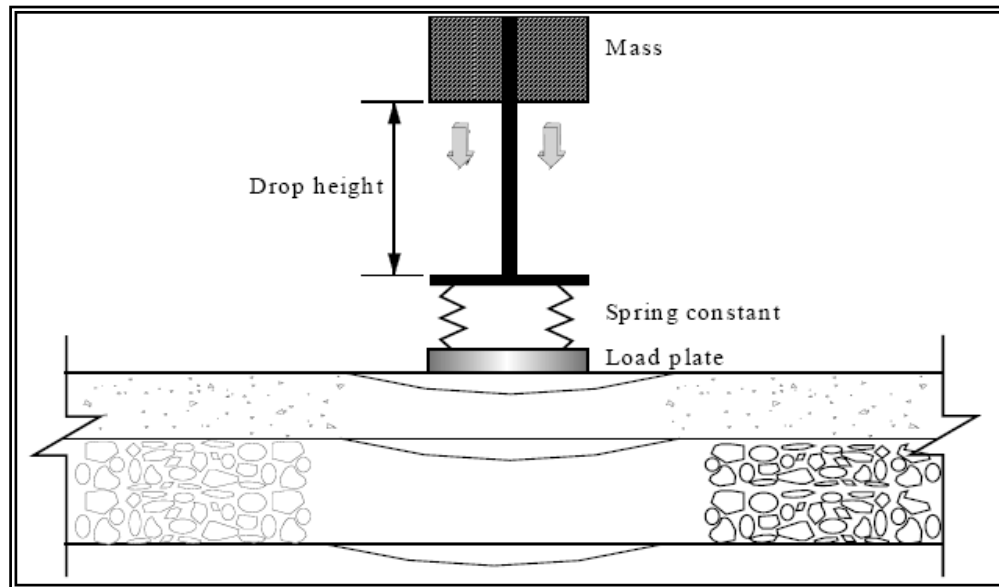
Mediante la automatización del sistema el ciclo de trabajo puede llevarse a cabo hasta un tiempo mínimo de 60 segundos por punto, lo cual lo convierte en

⁵ GEOVIAL LTDA. Informe final metrolínea avenida 27 entre avenida quebradaseca y calle59. 2005. p. 5.

un equipo de gran rendimiento y especialmente útil en la auscultación de pavimento existente.

Las deflexiones se normalizaron por carga (40 KN) y por temperatura teniendo como punto de referencia 20°C, lo anterior asociado a que bajo esa carga de 40 KN se aplica el mismo esfuerzo que haría el eje de referencia de 8.2 ton.

Figura 9. Carga aplicada e impulso generado por el FWD



Fuente: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration

1.6 DETERMINACION DE VARIABLES ESTRUCTURALES

La auscultación estructural a partir de mediciones de deflexiones realizadas en la avenida 27 entre calles 9ª y 59 de la pre-troncal carrera 27, proporciona un conocimiento detallado del estado del pavimento y permite realizar el diagnóstico para determinar los espesores de refuerzo.

A partir de esta auscultación es posible retrocalcular parámetros muy importantes para diseño y/o evaluación de la condición de la estructura del pavimento.

1.6.1 Módulo resiliente Mr. Después de realizar las mediciones de la deflectometría se realiza el retrocálculo del módulo resiliente Mr.

La guía de diseño de la AASHTO presenta la metodología para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante (Mr) a partir de medidas de deflexión tomadas con el Falling Weight Deflectometer. El cálculo del Módulo es como sigue:

$$M_r = \frac{0.24 * P}{d_r * r}$$

Donde:

Mr - Módulo resiliente de la subrasante, en psi

P - Carga aplicada (libras). (9000 libras = 40 KN.)

dr - deflexión medida a una distancia r del centro del plato de carga, en pulgadas. En este estudio se empleó la deflexión D6, correspondiente a la deflexión ubicada a 1.74 m del centro del plato de carga.

r - Distancia desde el centro del plato de carga, en pulgadas.

Para efectos de diseño, la metodología sugiere que este módulo debe multiplicarse por un factor de 0.33, para obtener un valor representativo de diseño:

$$M_r = 0.33 \left(\frac{0.24 * P}{d_r * r} \right)$$

1.6.2 Módulo equivalente Ep. El cálculo del módulo equivalente de la estructura de pavimento fue obtenido, igualmente a partir de la metodología AASTHO, con la aplicación de la siguiente fórmula⁶:

$$d_0 = 1.5 * P * a * \left\{ \frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right\}$$

⁶ AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993. P.111-197.

Donde:

Do = Deflexión central.

p = Presión del plato de carga, en psi. En este caso igual a 82.3 psi = 5.76 Kg/cm².

a = Radio del plato de carga, en pulgadas (5.9 pulgadas = 15 cm).

D = Espesor total de las capas del pavimento sobre la subrasante, en pulgadas.

Mr = Módulo resiliente de la subrasante, en psi.

Ep = Módulo efectivo de todas las capas del pavimento, en psi.

El módulo equivalente del pavimento, refleja la capacidad estructural del pavimento existente, es decir, la capa asfáltica que la conforma y los materiales granulares que se encuentran sobre la subrasante. La obtención del módulo equivalente se realizó a partir de la metodología de la AASHTO haciendo uso de las deflexiones registradas con el deflectómetro de impacto FWD, particularmente de la deflexión central.

1.6.3 Número estructural SN. La variable más importante en la metodología AASHTO es el número estructural SN, este valor, junto con la proyección de tránsito en el periodo de diseño permite determinar espesores de refuerzo o análisis de vida residual del pavimento. La condición futura de la vía, por lo tanto, estará condicionada de manera importante a las cargas y al tipo de tránsito futuro.

Finalmente el cálculo del SN efectivo se realiza mediante la siguiente fórmula:

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

2. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA EL CÁLCULO INVERSO.

2.1 INTRODUCCION.

El conocimiento de los módulos de trabajo de cada una de las capas integrantes de un pavimento existente es uno de los principales requerimientos, tanto en el proyecto de mejoras como en el seguimiento de tramos testigo. El seguimiento del comportamiento sobre tramos reales permite la optimización de las técnicas constructivas como así también el desarrollo y validación de las metodologías de diseño.

Para complementar en forma óptima esta exigencia, lo deseable es la realización de ensayos específicos sobre cada uno de los distintos materiales que conforman la estructura. Obteniendo como resultado la ecuación constitutiva de cada material, que brinda el módulo de trabajo en función de los distintos modos de carga en los que se puede comportar.

De todas formas, siempre resulta interesante y útil disponer de ensayos de deformabilidad estructural, que permitan una confirmación a escala global de las rigideces mediante la realización de un retroajuste modular (Retrocálculo).

Si bien a veces el retroajuste modular podría pensarse como una confirmación innecesaria, las naturales variaciones existentes, constructivas y de evolución de los deterioros, justifican plenamente la realización de ensayos de deformabilidad para realizar el retroajuste modular, aún disponiendo de ecuaciones constitutivas de los materiales. Lo más habitual, es disponer sólo de ensayos puntuales y que caracterizan al material en forma indirecta (como es el valor soporte relativo de los suelos, CBR), en cuyo caso es de suma importancia la realización de ensayos de deformabilidad.

La realización del cálculo inverso mediante herramientas computacionales permite, entre otros aspectos:

- Ajustar los módulos de trabajo de la estructura.
- Reunir las diferentes metodologías de retrocálculo de los módulos de las capas estructurales de una vía a partir de las deflexiones tomadas con el deflectómetro de impacto.

La modelación de un pavimento es un proceso en el cual, mediante la ayuda de un computador, se busca analíticamente de una manera iterativa, una estructura cuyas deflexiones calculadas sean iguales a las medidas en campo. En el momento en que se llega a este punto se da por terminado el proceso y los módulos de elasticidad obtenidos corresponden aproximadamente a los valores reales.

Las metodologías de retroajuste permiten la adopción de los módulos elásticos de las distintas capas de una estructura vial, sobre la base de la medición de deformaciones en superficie. Los distintos programas posibilitan, en general, el ajuste de módulos fijos basándose en la deformada absoluta valorada mediante deflectómetros de impacto.

2.2 CALCULO INVERSO CON EL PROGRAMA BAKFAA

Con este software, se puede recoger y analizar la información entregada por ensayos no destructivos, complementando a la vez dichos análisis con diferentes evaluaciones estructurales. Los resultados de los modelos dependen de los algoritmos estructurales del software, que son utilizados para procesar los datos entregados por los ensayos no destructivos para posteriormente realizar un retrocálculo de las características de los materiales de cada capa.

Los datos arrojados por las pruebas no destructivas ofrecen suficiente información y diferentes métodos de análisis. En muchos casos, la información puede ser usada para evaluar las condiciones estructurales o funcionales de un pavimento. Esta información es útil para⁷:

- Evaluar la carga transmitida y la capacidad del pavimento existente.
- Obtener las propiedades de los materiales del sitio del pavimento y capas granulares para el diseño de alternativas de rehabilitación que incluyen mantenimiento extensivo y trabajos de reparación funcional y revestimiento estructural.

Para estudios basados en CBR, el ingeniero debe utilizar un programa de capas elásticas, tal como el BAKFAA, donde se analizan datos obtenidos por medio de ensayos no destructivos, para luego encontrar los valores de los módulos elásticos.

⁷ U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Use of nondestructive testing in the evaluation of airport pavements, Available from internet:
< http://www.airweb.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library.htm>

Este software asume espesores de capa uniformes para lo cual implica fuerzas en cada capa. En este caso la fuerza de cada capa se refiere en términos de módulos de elasticidad de Young o simplemente módulos elásticos.

2.2.1 Parámetros de entrada

- **Módulos de elasticidad (young's modulus)**

El programa requiere un rango de módulos de elasticidad iniciales para cada una de las capas a tener en cuenta (en este caso el software solo admite diez capas). Después de un rango de valores de módulo asignados a cada capa, se maneja un proceso iterativo para obtener el mejor conjunto entre el módulo asignado y el calculado. Estos módulos son introducidos en psi.

- **Relación de poisson (poisson's ratio)**

Es necesario definir el valor de la relación de poisson para cada capa, ya que dicho valor incide en el análisis de los esfuerzos y deformaciones en la aplicación de la teoría elástica. No obstante, pequeños cambios en esta relación, no ejercen un cambio fundamental en el computo de deformaciones, se asumen valores entre 0.5 a 0.4 para las capas granulares y 0.45 a 0.50 para los suelos finos de la subrasante.

- **Límite de interfase (interfase parameter)**

En este caso son solo dos valores a escoger, cero (0) si las capas no están ligadas y uno (1) si las capas se encuentran ligadas.

- **Espesor (thickness)**

Los espesores de cada capa se deben introducir en pulgadas. El espesor de la subrasante (última capa) se considera infinito.

- **Capas variables (layer changeable)**

En este parámetro es donde se considera que capas son las que se desean que iteren sus módulos. Dependiendo de la rigidez de las capas y de cuales se ponen a iterar, el programa busca la mejor combinación de módulos. Si la subrasante tiene un módulo muy alto y no se pone a iterar, puede que el programa no corra debido a que los módulos superiores no se pueden bajar lo suficiente como para contrarrestar la rigidez de la subrasante.

- **Distancia de los sensores (offset)**

Para definir estas distancias, se debe tener en cuenta las longitudes de los sensores del FWD en el momento de calcular las deflexiones de campo. Estas distancias se deben introducir en pulgadas.

- **Deflexiones medidas (defl)**

Es el valor de las deflexiones obtenidas en campo con el deflectómetro de impacto. Estos valores se introducen en mils (milésimas de pulgada).

- **Radio del plato de carga (plate radius)**

Es el valor del radio del plato utilizado para aplicar la carga que simula el peso del vehículo. Dicho valor se introduce en pulgadas.

- **Carga del plato (plate load)**

Es la magnitud de la carga aplicada al pavimento. Este valor debe ser introducido en libras.

- **Backcalculate (retrocálculo)**

Este parámetro es el que da inicio al cálculo inverso para la obtención tanto de módulos como de deflexiones. En la figura 10 se muestra los parámetros de entrada del software BAKFAA.

Figura 10. Esquema de parámetros de entrada.

Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness inches	Layer Changeable
1	631.929	0.36	1.00	7.87	<input checked="" type="checkbox"/>
2	70.923	0.40	1.00	7.87	<input checked="" type="checkbox"/>
3	44.672	0.45	1.00	6.30	<input checked="" type="checkbox"/>
4	19.725	0.49	1.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
5	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
6	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
7	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
8	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
9	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
10	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, in	0.00	11.811	23.622	35.433	47.244	59.055	68.504
Defl, mils	77.17	51.18	41.33	25.59	13.78	11.81	10.24
Calc, mils							

Buttons: Load FWD File, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output, Delete negative offset sensors, Evaluation Depth, inches (25.0001), Plate Radius, in (5.91), Plate Load, lb (8.992), Function RMS, mils (Func RMS), Iteration Number (Iter No), Select Load and Run LEAF, Exit.

2.2.2 Parámetros de salida

- **Deflexiones calculadas (calc)**

Son los valores de las deflexiones obtenidas después del retrocálculo en mils.

- **Número de iteraciones (iteration number)**

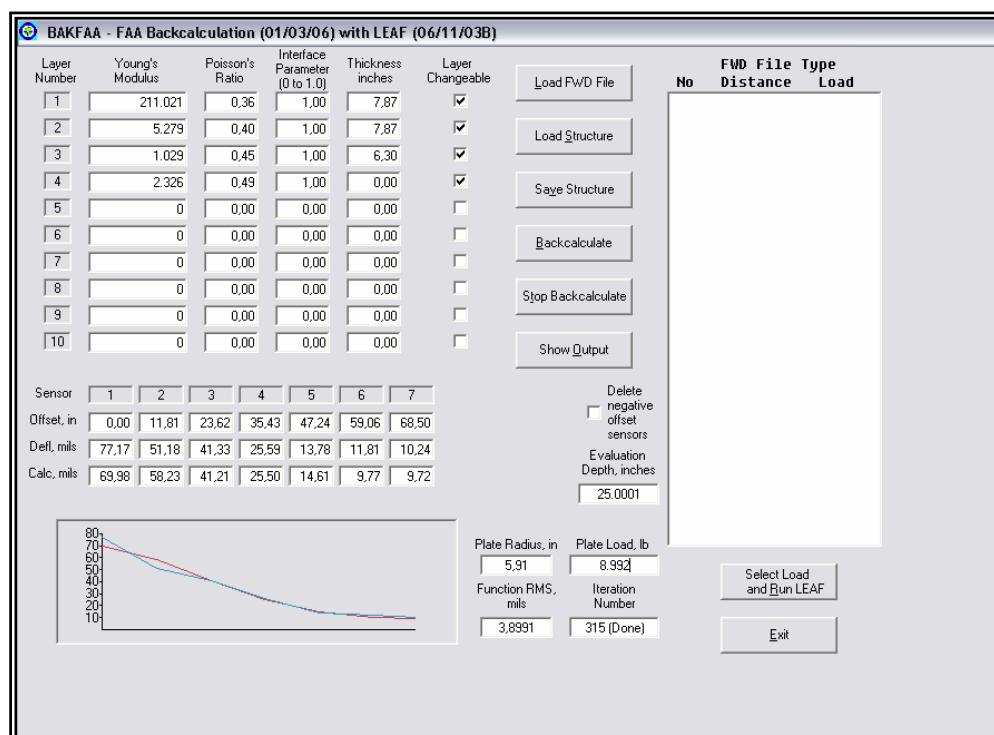
Es el número de cálculos que realiza el programa para encontrar las deflexiones más acordes con respecto a las deflexiones medidas.

- **Desviación estándar (function RMS)**

Es el error encontrado después de hacer la modelación inversa. Refleja que tan distanciadas están las deflexiones medidas de las calculadas en mils.

En la figura 11, se pueden observar los datos arrojados por el programa BAKFAA.

Figura 11. Esquema de parámetros de salida.



2.3 CALCULO INVERSO CON EL PROGRAMA BACKMOD

Es un programa desarrollado por medio del Laboratorio vial del IMAE⁸, trabaja en ordenadores personales y considera diversas formas de entradas de datos, como medidas de la desviación y módulos de las capas de la estructura vial.

Fue diseñado usando una hoja de trabajo en Excel, tiene un programa Fortran y utiliza un modulo básico visual entre ellos. Para simplificar el uso, las entradas de ciertos datos se proporcionan como defecto, pero el usuario puede modificar todos los datos si él los sabe.

El programa permite el ajuste de los módulos y/o ecuaciones constitutivas de las distintas capas de una estructura vial, en base a la medición de deformaciones en superficie. Es posible también sólo simular una medición de deformabilidad. Para reducir errores, el software "BACKMOD" tiene algunas rutinas en las entradas y alarma de datos de control al usuario sobre modificaciones necesarias.

El programa "BACKMOD", que permite al usuario hacer el calculo inverso de los módulos de las estructuras del pavimento con amplia flexibilidad, usando

⁸ IMAE, Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

los resultados de diversas técnicas de la auscultación en nuestro caso el uso del deflectómetro de impacto (FWD) y considerando los materiales constitutivos de la capa en más de una manera de trabajo, incluye:

- Consideración de diversas metodologías de la auscultación de la deformación superficial, como: FWD, Viga Benkelman, y el deflectómetro Lacroix.
- Utiliza los resultados de otras pruebas complementarias, como: módulo en laboratorio, penetración dinámica de cono (DCP) y California bearing ratio (CBR).
- El módulo de la capa se puede fijar como dato, se puede seleccionar para ajustar o se puede asignar en relación con la capa inferior.
- El cálculo inverso se puede hacer de la manera lineal, considerando un módulo para la capa.
- El cálculo inverso se puede hacer de la manera no lineal, obteniendo el módulo de la capa que ajusta los parámetros de su ecuación constitutiva.

Con el desarrollo de diversos ejemplos usando los datos obtenidos en los ensayos de campo, se demuestran las capacidades del software; es por esto que nos resulta confiable la necesidad de saber módulos de los materiales de la estructura de pavimento usando las metodologías de calculo inverso usadas por el "BACKMOD".

2.3.1 Formulaciones. El programa itera hasta lograr una convergencia de deflexiones o módulos, figura 12.

En cada iteración aplica la solución de la mecánica del medio continuo para un medio estratificado multicapa. Es decir resuelve el conjunto de ecuaciones diferenciales (respetando las condiciones de contorno dadas por las interfaces y carga de superficie) para la obtención de la "función de tensiones" y a partir de esta, los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos. Con los desplazamientos de superficie conocidos, simula la medición del equipo respetando su geometría y obtiene las mediciones teóricas calculadas a comparar con las reales.

Planteando una variación diferencial (pequeña) de cada módulo variable, obtiene el nuevo conjunto de módulos para la próxima iteración.

En el caso de no linealidad, se requiere un nuevo proceso iterativo dentro de cada iteración para lograr la correspondencia de módulos solicitados dada por la ecuación constitutiva. En este proceso se consideran las solicitudes

críticas bajo la carga para la adopción del módulo de cada subcapa, las subcapas son generadas por el programa dividiendo las capas estructurales⁹.

2.3.2 Parámetros de entrada. En toda ocasión es necesario respetar las unidades que se encuentran declaradas para cada dato. Para anular un valor desde una lista desplegable (ej. eliminar una capa) se selecciona en ella una opción en blanco. La entrada de los datos se realiza en la hoja llamada Hoja_de_datos, donde se pueden diferenciar dos tipos de datos, contenidos en 5 tablas.

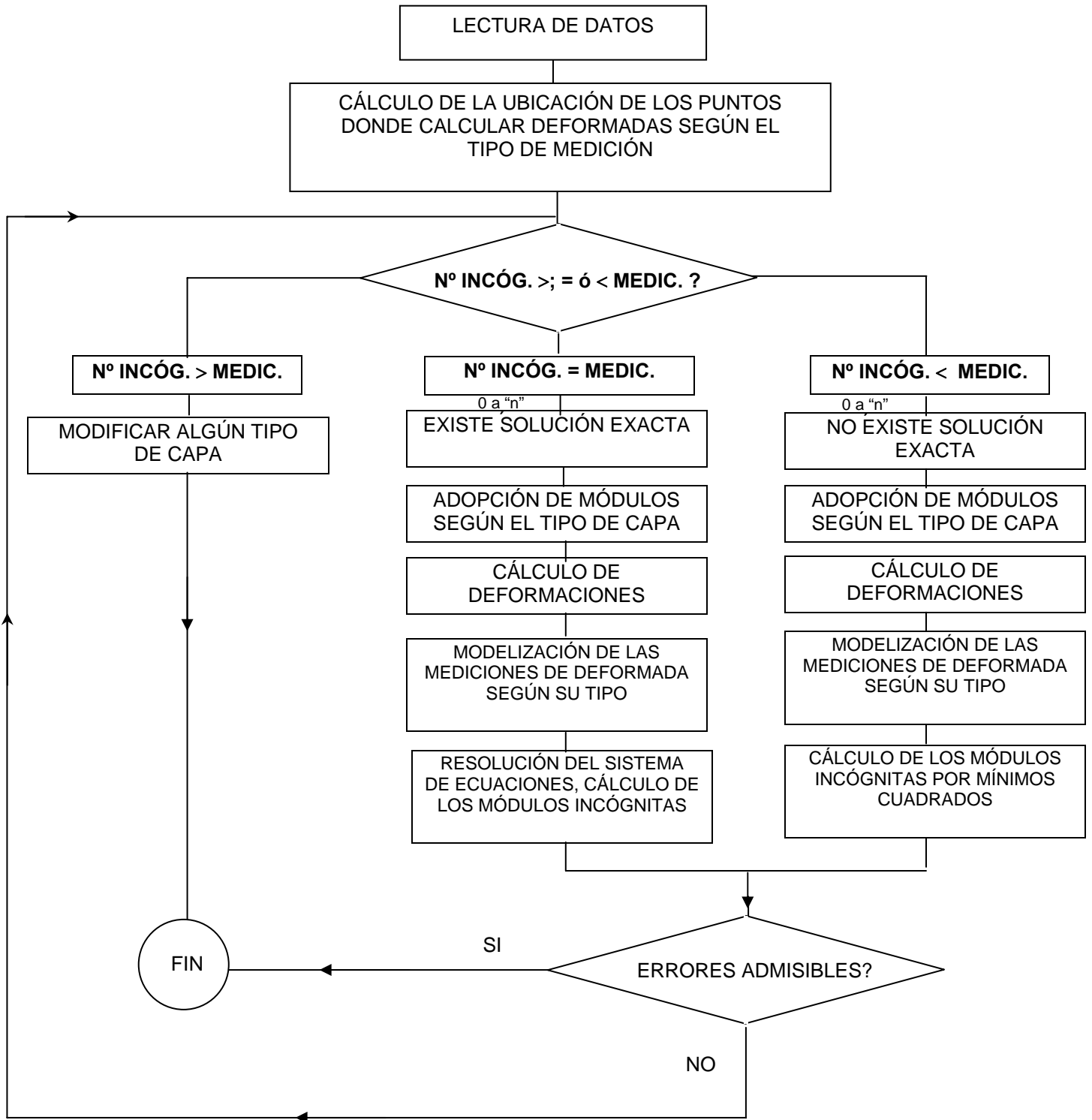
- **Tipo de auscultación de la deformada.** Considera la medición de la deformada en superficie mediante cuatro metodologías, (figura 13). Lacroix, viga Benkelman Simple, viga Benkelman Múltiple y Absoluta (FWD) la cual es la de nuestro interés. El tipo de auscultación se determina mediante la lista desplegable (figura 14).

El programa simula el proceso de medición, por lo que se requieren medidas geométricas específicas de cada forma de auscultación. Estas son cargadas (desde la hoja V_Defecto) al determinar el tipo de auscultación desde la lista desplegable. Estos valores pueden también modificarse para un caso particular de medición en la Hoja de datos.

A continuación se indica la nomenclatura utilizada para la descripción del proceso de medición usado (FWD) desde la deformada de superficie (deflexión).

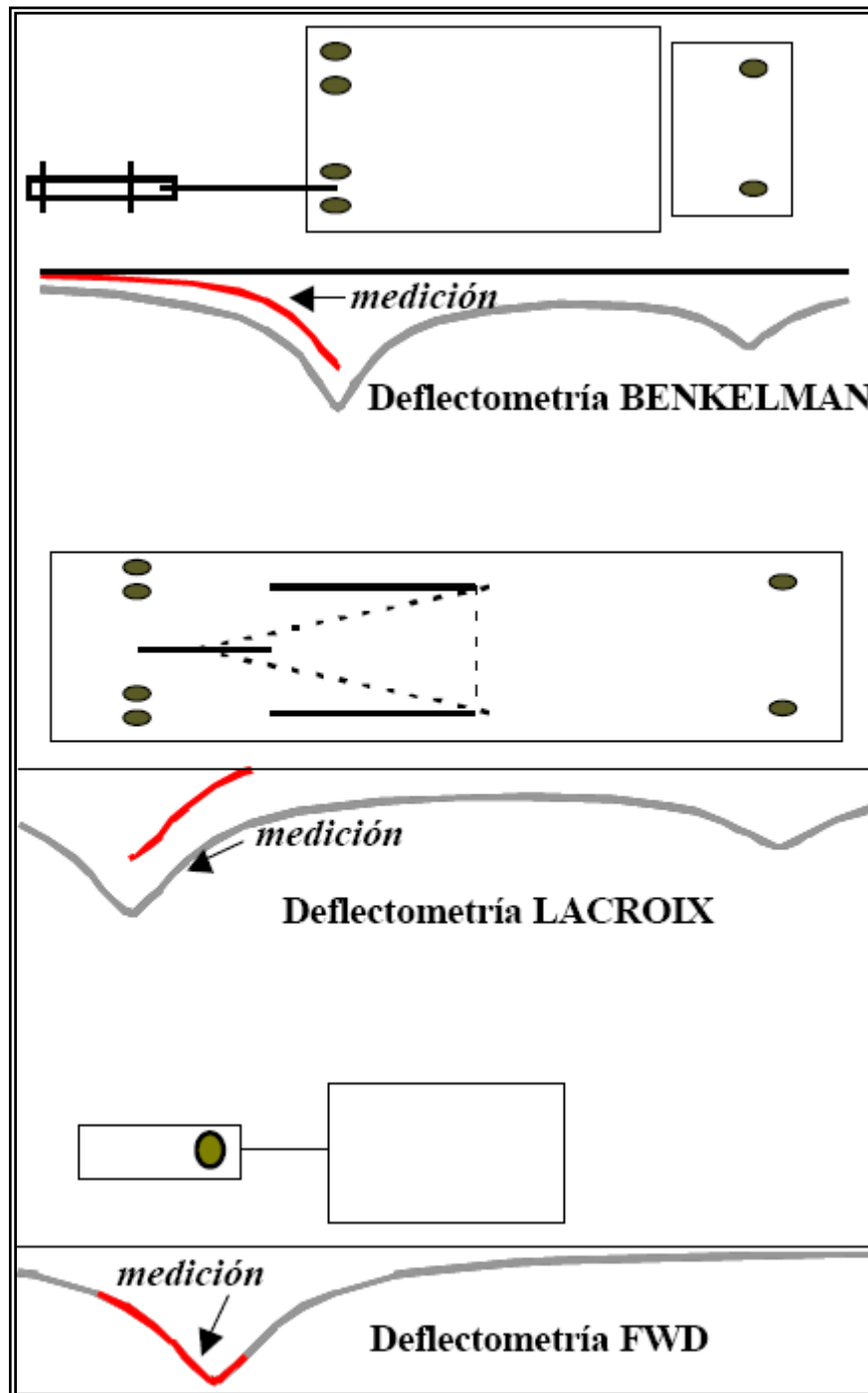
⁹ GIOVANON, O. y PAGOLA, M. El Programa BACKMOD para el Cálculo de los Módulos Estructurales a partir de Mediciones de la Deformada en Superficie. Comisión Permanente del Asfalto. Vigésima Séptima Reunión del Asfalto (1992).

Figura 12. Diagrama de flujo del programa Backmod.



Fuente: Archivo investigación.

Figura 13. Metodologías de medición de la deformada usadas en campo.



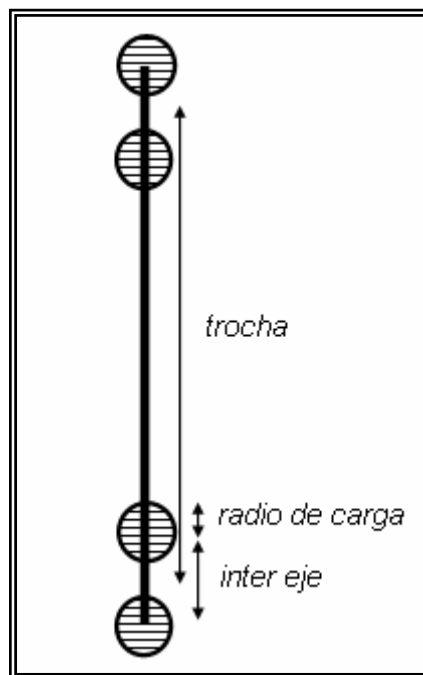
Fuente: Archivo investigación.

Figura 14. Determinación del tipo de auscultación.

Programa BACKMOD - IMAE		para retroajuste modular		
Tipo de auscultación de la deformada: Medición Absoluta (ej. FWD)				
Absoluta (FWD) ▼	radio de carga (mr)	150	presión (MPa)	0,283
Lacroix	inter eje (mm)	0	trocha (mm)	20000
Benk. Simple	carga del eje (kN)	80,0	FWD carga aplicada	40,0
Benk. Múltiple			presión	0,566
Absoluta (FWD)				

Por simplicidad de cálculo el programa plantea siempre cuatro cargas circulares en superficie, figura 15, que representan el eje de ruedas duales que aplica la carga, como por ejemplo las mediciones Benkelman, Lacroix o formas particulares de medición de deflexiones absolutas (FWD).

Figura 15. Esquema del eje de medición.



Fuente: Archivo investigación.

Radio de carga: Representa de forma circular la superficie de contacto de una de las ruedas con la calzada (impronta).

Presión: Es la presión de contacto de la impronta.

Inter eje: Separación existente entre las ruedas duales.

Trocha: Distancia entre los centros de los conjuntos de ruedas duales.

Carga del eje: Peso total transmitido por el eje de carga al pavimento. Este valor no se carga, resulta de los datos anteriores.

En el caso de modelar una deflexión valorada con un deflectómetro de impacto (FWD), se adoptan valores particulares para permitir la representación del plato de carga del equipo, anulando el inter eje y adoptando un valor muy elevado para la trocha. Téngase en cuenta que la carga por eje será el doble de la carga aplicada por el plato del FWD, ya que este representa un semieje. Y que la presión será la mitad por que el programa superpone siempre dos improntas en cada semi-eje.

- **Datos de la deformada en carga medida.** Corresponden a los valores de desplazamientos de superficie medidos y sus distancias desde el centro de las ruedas duales, figura 16. Valores que deben ser cargados sin correcciones por descensos del sistema de referencia, ya que el programa efectúa las correcciones con los datos de la geometría. Es posible, si se dispone del radio de curvatura y la deflexión a 0 mm de distancia, calcular la deflexión en correspondencia con la primera distancia. Se logra declarando los datos y activando el botón "**Calcular D1**". El mismo botón calculará el radio de curvatura si la celda correspondiente se encuentra vacía y declaradas las deflexiones D0 y D1.

Figura 16. Datos de la deformada.

								Calcular D1	
Distancia (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500		
Deflexión(mm/1000)	750	510							
									Radio Curv (m)
									130

- **Datos de la estructura.** Adoptar todos los tipos de capa, desde las listas desplegadas de la columna "Código tipo de capa", y el software solicitará los datos asociados a cada capa, colocando un símbolo de pregunta en cada dato requerido, figura 17.

Figura 17. Datos de la estructura.

Código tipo de capa	Altura (mm)	Módulo (MPa)	Ecuación Mr			Relación modular	Poisson	Interfaz	Mod max (MPa)
			coef_A	coef_B	coef_C				
Mr ajust. F2	120	?	?				0,35	Adheri	1500
Mr ajustar c_A	200	?	?	?	?		0,40	Adheri	500
Dato	200	?					0,40	Adheri	
A ajustar		50					0,40		100
Dato									
Mód. Resiliente									
A ajustar									
Barker_base									
Barker_sub base									
Escalonamiento									
Mr ajustar c_A									
Mr ajust. F1									
Mr ajust. F2									

Desarrollada por Laboratorio Vial/IMAE - Oscar H. Giovanon

Ejecutar Backmod

2.3.3 Parámetros de salida. Luego de cargados los datos se presiona el botón "**Ejecutar Backmod**" situado en la parte inferior de la hoja. Esto provocará la exportación de los datos y la realización del ajuste por el software BACKMOD2004.EXE, que generará los archivos de resultados correspondientes. Si el ajuste no admite solución exacta, el programa realizará iteraciones de manera de obtener la solución al problema que minimice la suma de los errores cuadráticos, absolutos, de los distintos puntos de medición.

En la hoja de **Resultados** se indican los valores obtenidos por el software BACKMOD, cuando es ejecutado desde la Hoja_de_datos. Inicialmente figuran aquí los resultados del caso analizado previamente y para su actualización es necesario utilizar el botón "**Actualizar**", figura 18. La actualización de los resultados también motiva que los módulos y/o coeficientes semilla de la Hoja_de_datos se modifiquen con los valores resultados del ajuste.

La tabla brinda las deformadas medidas y las calculadas, como resultado del ajuste / simulación. Se incluye una última columna que brinda el valor del radio de curvatura, calculado entre las dos primeras deflexiones. Esta tabla indica en su última fila el error absoluto existente en cada deflexión y el error absoluto medio.

Se muestra un esquema de la estructura, donde se indican las capas con sus espesores y módulos de trabajo.

El gráfico corresponde a la deflexión en función de la distancia, indicándose tres tipos de deformada:

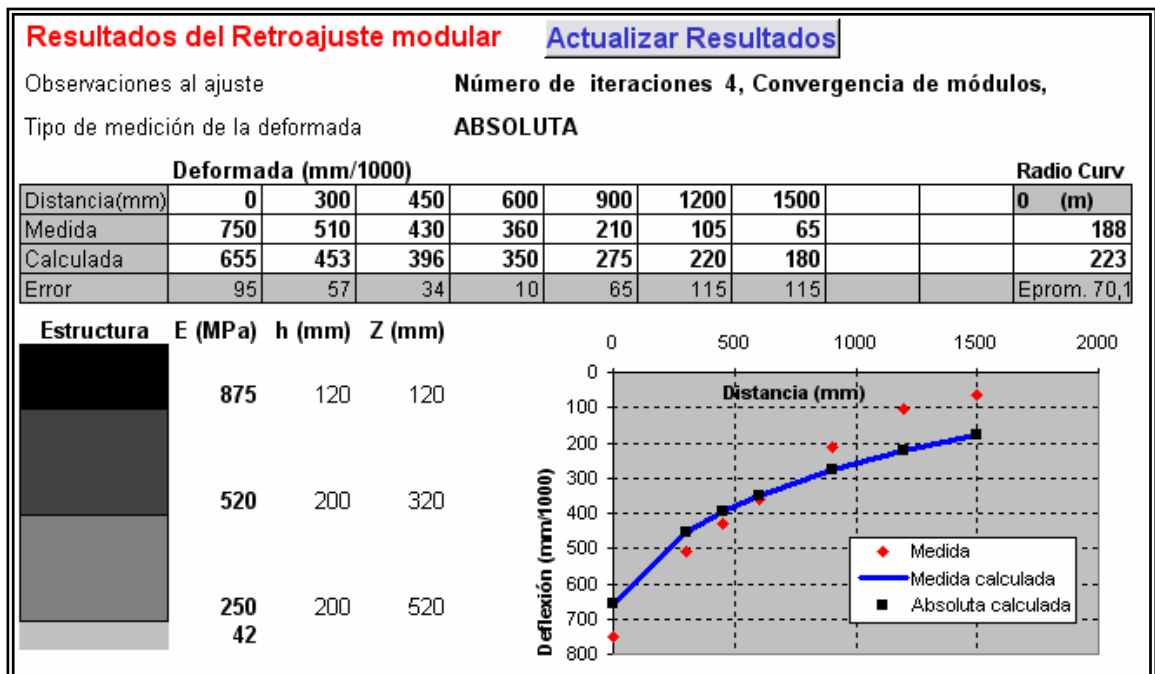
Medida: La efectivamente medida por el método de auscultación

Calculada: Obtenida como cálculo teórico, mediante simulación de la medición

Absoluta: Valor calculado teóricamente del desplazamiento vertical de cada punto.

El valor de la deflexión Absoluta es coincidente con la medición, cuando no existen correcciones debidas a la base de referencia en el sistema de auscultación de la deformada, medición con sensores de deformación inercial en los (FWD). Se indican además "Observaciones al ajuste" consistentes en información respecto al proceso de ajuste de la estructura, indicándose entre otras, el número de iteraciones requeridas.

Figura 18. Datos de salida.



2.4 CALCULO INVERSO CON MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Las técnicas más avanzadas para el análisis y diseño racional de pavimentos están enmarcadas dentro del método de los elementos finitos, como la vía de mayor flexibilidad y versatilidad para la representación de los materiales, las condiciones de compatibilidad, la representación de n capas y en general se destaca la gran capacidad para incluir complejidad al problema induciendo mayor certeza sobre los resultados alcanzados. Dentro de este grupo se encuentran aplicaciones multifísicas que originalmente no están diseñadas para abordar el problema particular del comportamiento tenso-deformacional de la estructura del pavimento, sin embargo, cuentan con todas las herramientas, que aprovechadas por un usuario experto pueden conducir a modelos

satisfactorios y mucho más centrados en la realidad del comportamiento del pavimento. En este caso se plantea el uso de ANSYS como modelador de alto rango, sin embargo pueden emplearse otros modeladores similares como ABAQUS o NASTRAN, teniendo en cuenta que para cada uno de ellos es necesario hacer una adaptación de acuerdo a las posibilidades de modelación numérica que ofrezcan¹⁰.

2.4.1 Especificaciones programa ANSYS 8.0. Ansys es un programa de elementos finitos que permite desarrollar entre otras las siguientes tareas:

- Construir modelos digitalizados o transferir modelos tipo CAD de estructuras productos, componentes o sistemas.
- Aplicar las cargas de operación al modelo o diseñar las condiciones de funcionamiento.
- Estudiar las respuestas físicas, como los niveles de esfuerzos, las distribuciones de temperatura o campos electromagnéticos.
- Optimizar un diseño en su etapa de desarrollo para reducir los costos de producción.
- Hacer prototipos de prueba en ambientes donde de otra forma sería indeseable o imposible.

Los programas de AEF (análisis por elementos finitos), permiten obtener soluciones aproximadas de problemas que sean susceptibles de ser representados por un sistema de ecuaciones diferenciales.

En ingeniería, la mayoría de los procesos actuales están definidos de dicha forma, por lo que dichos programas no permitirán obtener productos de calidad superior a un menor costo, o para mejorar procesos existentes, o para estudiar el fallo de un componente estructural o un equipo.

Existen en la actualidad numerosos programas de análisis por elementos finitos, tales como¹¹ ABAQUS, COSMOS, PATRAN, NASTRAN, STRUDL, etc; de entre todos hemos elegido ANSYS por tratarse de una herramienta versátil de análisis por elementos finitos, teniendo en cuenta la relación entre la calidad del producto y su costo. Este método como formulación matemática es

¹⁰ CALDERON RODRIGUEZ, Wilson; PALLARES MUÑOZ, Myriam Rocío. Desarrollo de un modelo de elementos finitos para el diseño racional de pavimentos. Bogotá. 1998. P. 35 – 48.

¹¹ SUAREZ DOMINGUEZ, Federico J. Manual de diseño de ANSYS, España 2001, Available from internet:< www.construccion.uniovi.es/área/cursos/C1840012.htm>

relativamente nuevo; aunque su estructura básica es conocida desde hace bastante tiempo, en los últimos años ha sufrido un gran desarrollo debido a los avances informáticos.

2.4.2 Conceptos generales La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento.

El término elemento finito resume el concepto básico del método: la transformación de un sistema físico, con un número infinito de incógnitas, a uno que tiene un número finito de incógnitas relacionadas entre sí por elementos de un tamaño finito.

Un nudo es una localización en el espacio de un punto en el que se considera que existen ciertos grados de libertad (desplazamientos, potenciales, temperaturas, etc.) y acciones (fuerzas, corrientes, condiciones de contorno...) del sistema físico. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema.

Un elemento es una representación matemática matricial, denominada matriz de rigidez, de la interacción entre los grados de libertad de un conjunto de nodos. Los elementos pueden ser puntuales, lineales, superficiales, volumétricos, etc y pueden estar en espacios bi o tridimensionales.

El sistema, debido a las condiciones de contorno: empotramiento, fuerza puntual y temperatura, evoluciona hasta un estado final. En este estado final, conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema podemos determinar cualquier otra incógnita deseada: tensiones, deformaciones,...etc. También sería posible obtener la evolución temporal de cualquiera de los grados de libertad.

2.4.3 Entorno de ANSYS Ansys está organizado en dos niveles básicos:

- Nivel de comienzo.
- Nivel de procesamiento.

El nivel de comienzo actúa como una puerta de entrada y salida de ANSYS. Es también empleado para definir ciertos controles globales del programa como cambiar el nombre del trabajo, borrar la base de datos y copiar archivos

binarios. En el nivel de procesamiento, están disponibles varios procesadores. Entre los más utilizados para nuestro estudio están (véase tabla 5):

Tabla 1. Resumen de los niveles de procesamiento ANSYS.

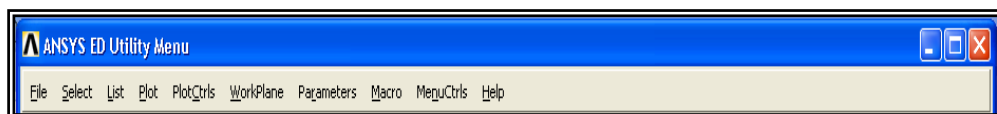
PROCESADOR	FUNCION	GUI	COMANDO
PREP 7	Construye el modelo (geometría, materiales, restricciones, etc.)	Main Menu » Preprocessor	/PREP7
SOLUTION	Aplica las cargas y obtiene la solución de los elementos finitos.	Main Menu » Solution	/SOLU
POST1	Revisa resultados sobre el modelo entero en puntos específicos	Main Menu » Preprocessor » General Postproc	/POST1

Para retornar al nivel de entrada o de comienzo desde cualquier proceso, hay que activar el comando FINISH desde el menú principal del programa y si se desea salir del programa hay que activar el comando EXIT. Por defecto, inmediatamente antes de salir del programa, el modelo y las cargas son guardadas en una base de datos, automáticamente salvadas y escritas en la base de datos FILE. El programa ANSYS trabaja con una larga base de datos que almacena todos los datos de entrada y resultados de una manera organizada.

2.4.4 Partes del GUI La GUI está compuesta de ventanas, menús, cajas de diálogo y otros componentes que permiten entrar los datos y ejecutar las funciones de ANSYS. La GUI tiene las siguientes ventanas:

- Menú de utilidades: Este menú que se muestra en la figura 19, contiene los menús desplegables con la mayoría de las utilidades necesarias para controlar el entorno de la aplicación, los ficheros, la selección de entidades, efectuar listados, controlar los menús, etc.

Figura 19. Menú de utilidades.



- Menú de entrada: Es donde se pueden digitar directamente los comandos de ANSYS para ser ejecutados por el programa. Todos los comandos digitados previamente también aparecen para referenciarlos rápidamente y reutilizarlos. (Véase figura 20).

Figura 20. Menú de entrada.



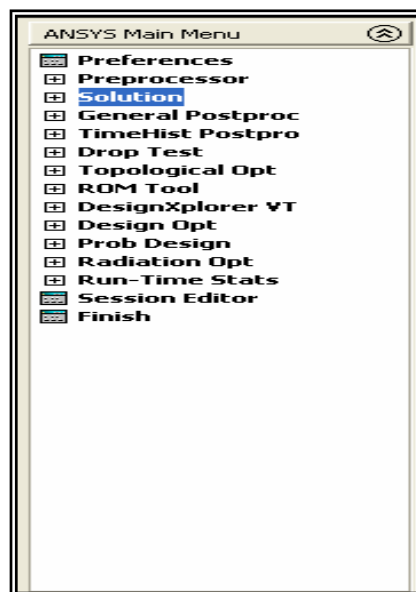
- Barra de herramientas: Es donde se permite guardar, quitar o cerrar el proyecto que se este realizando. (Véase figura 21).

Figura 21. Barra de herramientas.



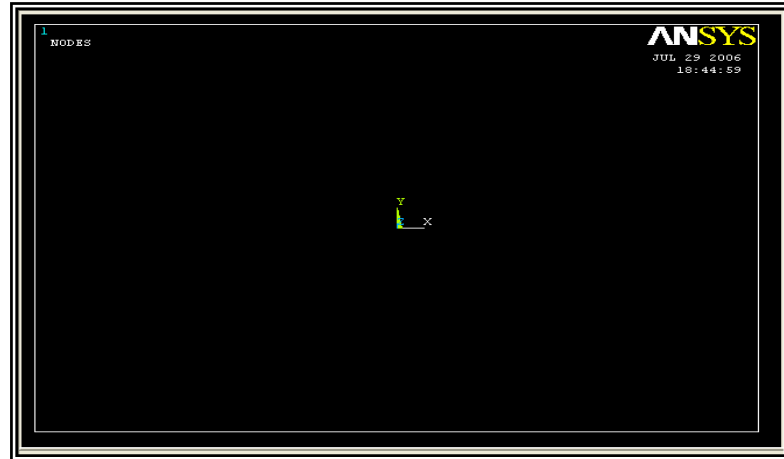
- Menú principal: En el se encuentran los diferentes funciones primarias de ANSYS las cuales son las que permiten la realización del modelo de elementos finitos, la aplicación de las solicitaciones y la posterior revisión de resultados. (Véase figura 22).

Figura 22. Menú principal.



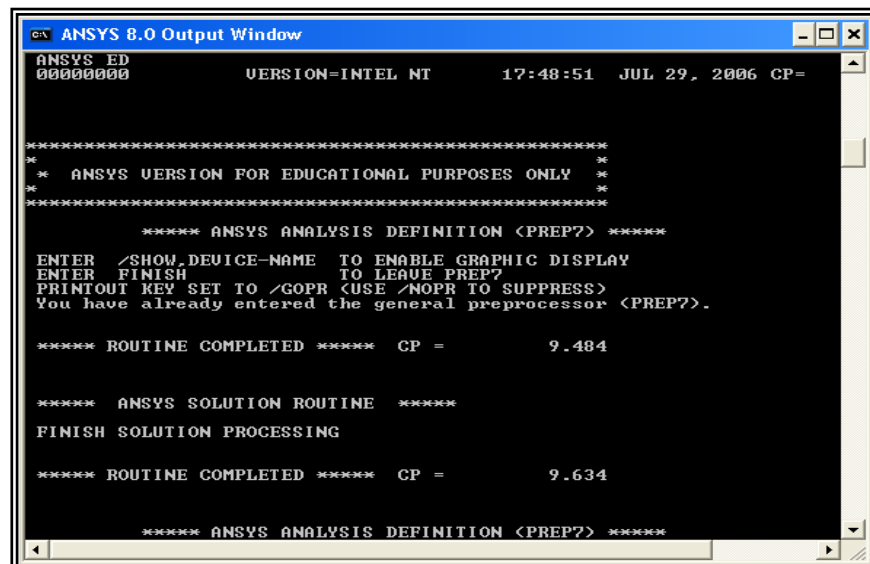
- Ventana gráfica: Es donde se muestra toda la información gráfica necesaria para la visualización, creación del modelo y revisión de resultados. (Véase figura 23).

Figura 23. Ventana gráfica.



- Ventana de salida (Output): Recibe el texto de salida del programa. En caso de no haber redirigido la salida a un fichero, se mostrará por esta ventana toda la información que el programa vaya generando a medida que se trabaja en ANSYS. (Véase figura 24).

Figura 24. Ventana de salida.

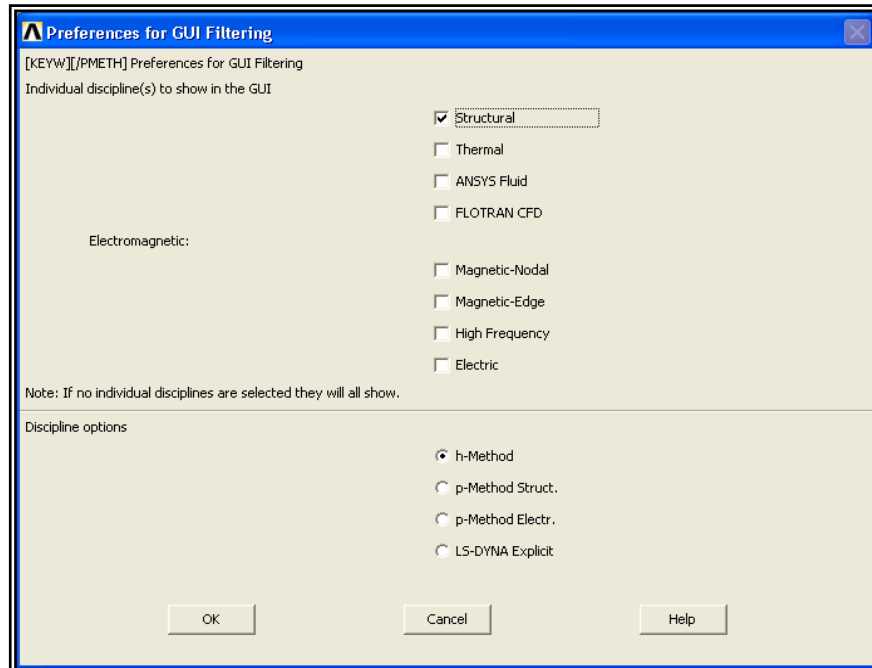


2.4.5 Organización del menú principal

A continuación se presentarán las ventanas más importantes en la creación de un modelo finito.

- Preferencias: Seleccionando esta opción, ANSYS muestra la siguiente ventana:

Figura 25. Ventana de preferencias.



En esta opción es donde se escoge el tipo de modelo que se quiere diseñar, entre las diferentes disciplinas se encuentran estructurales, térmicas, fluidos, etc; pudiéndose a la vez escoger el tipo de método que se quiere aplicar.

- Preprocesador: Esta opción es tal vez la más importante de todas, ya que es aquí donde se crean los modelos y se le asignan las diferentes propiedades que debe llevar estos. Entre algunas de las propiedades tenemos: constantes reales, tipo de elementos, propiedades de los materiales, secciones, restricciones, cargas, etc. En este menú, como se puede apreciar, se controla el proceso de generación de la malla de elementos finitos, tanto mediante “generación directa” como mediante las utilidades para la realización del “modelado sólido”.
- Modulo de solución: En este menú se controlan las opciones que nos permiten definir el tipo de análisis que queremos efectuar, así como las condiciones de contorno, temperaturas y sollicitaciones sobre el modelo.

- Menú del Postprocesador: Este menú sirve para la lectura de los resultados del análisis y además permite acceder a opciones de salida de resultados.

2.4.6 Opciones auxiliares

Plot » replot: Crea una actualización del dibujo, después de aplicar de aplicar un comando.

En el menú de “plot” se puede mejorar la visión del dibujo, pudiéndose acceder a opciones que permiten ver los puntos clave, áreas, líneas, volúmenes, nodos, materiales, etc, de cada uno de los elementos que componen el modelo a ensayar.

PlotCtrls » pan zoom rotate: Permite cambiar la posición de los ejes aportando una visión rápida del modelo en cuanto a esquemas auxiliares a ingresar.

PlotCtrls » Numbering: Esta opción permite observar propiedades del dibujo, como son módulos, numeración de las áreas, numeración de los volúmenes, numeración de los nodos, etc.

WorkPlane » Align WP with »XYZ locations + (wplane): Esta opción permite modificar el eje de coordenadas locales con respecto al eje de coordenadas globales. Un plano de trabajo es un plano infinito con un origen, un sistema de coordenadas en tres dimensiones, un incremento definido y una grilla de visualización. Solamente se puede crear un plano de coordenadas a la vez y es separado del sistema de coordenadas activo.

Utility menú » File » Change jobname (/filmane): Este comando permite asignarle un nombre al trabajo para identificarlo. Cuando se define un nombre de trabajo para el análisis, este se convierte en la primera parte del nombre de todos los archivos generados en el análisis.

Utility menú » File » Change Title (/Title): Define un título (opcional) para el análisis el cual aparecerá en todos los archivos de salida de resultados.

/UNITS: Con esta opción se puede ajustar el sistema de unidades. Si se quiere utilizar el sistema internacional, se especifica SI.

List » Files » Log file: Permite ver la lista de los comandos que se han ejecutado durante el proceso del modelo.

Select » Entities: Permite una rápida selección de las entidades que maneja el programa ayudando a la eliminación temporal de nodos, áreas, volúmenes, elementos, keypoints, etc.

Save_DB: Está opción permite salvar la base de datos del modelo en caso de un posible reinicio. Su aplicación es opcional, ya que en caso de un posible error y se haya guardado posteriormente la recuperación del modelo no se puede realizar.

Resum_DB: Recupera la base de datos del modelo hasta donde se haya guardado. En comparación con otros programas, cumple la misma función de deshacer.

Finish: Se utiliza para salir del procesador a nivel inicial.

File » Exit (/exit): Con este comando se sale completamente de ANSYS.

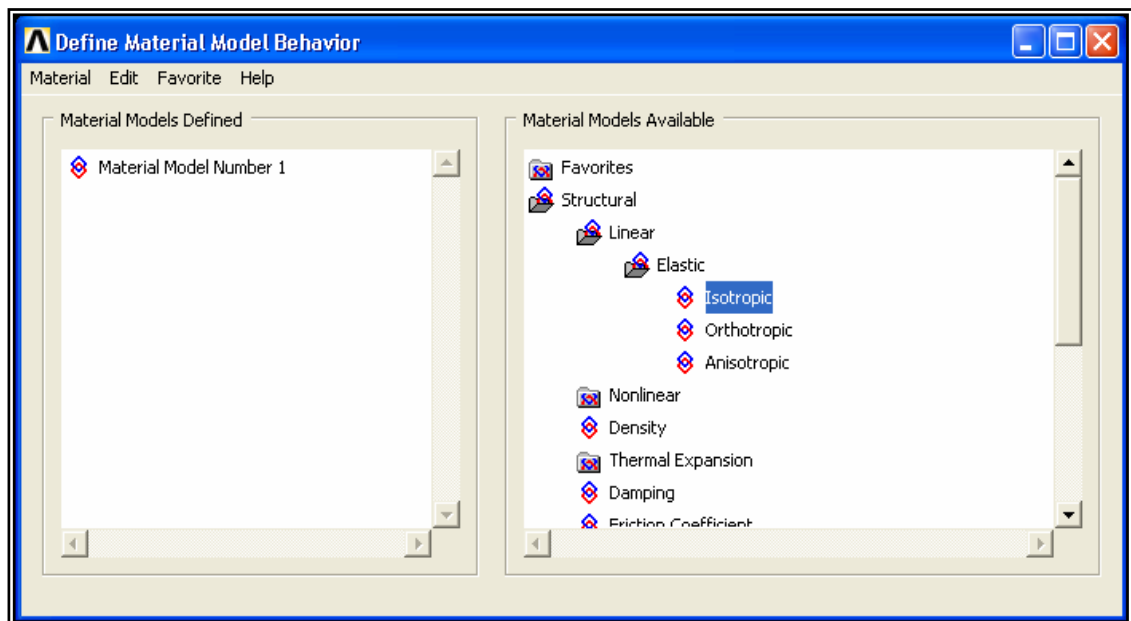
/Clear: Borra la base de datos.

2.4.7 Procedimiento de construcción del modelo La siguiente lista de comandos representa la creación del modelo a evaluar como objetivo de este proyecto, tomándose como alternativa de análisis, un modelo elástico.

- **Preferences** Con esta opción es que se comienza la idealización del modelo escogiéndose la disciplina en la que se va a trabajar. Para nuestro diseño se la alternativa es estructural solamente.
- **Preprocessor » Modeling » Create» Areas » Rectangle » » By dimensions** Con este comando se procede a la creación de las áreas que forman parte de la cara donde se ubican los sensores, aunque hay varias maneras de crear la geometría dentro de ANSYS. Para esta opción, se valió de áreas primitivas que facilitan la construcción de la geometría del modelo.
- **Preprocessor » Modeling » Operate » Extrude » Areas » Along normal** Con esta opción lo que se hace es crear un volumen total que representa la estructura del pavimento. Como opción, también se pueden crear los volúmenes directamente sin necesidad de crear primero las áreas.

- **Preprocessor » Modeling » Operate » Booleans » Divide » Volu by wrkplane** Antes de ingresar a esta opción, se tiene que crear un workplane a partir de las coordenadas globales del modelo. Ya creado el workplane, se procede a dividir el modelo por donde se encuentran situados los workplane. En las opciones auxiliares, se explica como crear un workplane.
- **Preprocessor » Materials props » Material models** En la ventana que aparece (véase figura 26), se escoge la opción estructural » linear » elastic » isotropic, donde a continuación aparece otra ventana en la que se podrán insertar los valores de los módulos de las capas y las relaciones de Poisson's. Para ingresar un nuevo material, se le da en material » new model. Esta opción lo que permite es darle las características físicas al modelo.

Figura 26. Ventana de ingreso de las propiedades de los materiales.



- **Preprocessor » Modeling » Operate » Booleans » Glue » Volumes** Este comando lo que permite es pegar los volúmenes para que al momento de aplicar la carga, el modelo en su totalidad se deforme.
- **Preprocessor » Modeling » Create » Areas » Circle » Solid circle** Este comando permite la creación del cuarto de circunferencia de radio 15 cm en donde se aplicará la carga ejercida por el disco.

- **Preprocessor » Element type » Add** Esta librería contiene más de 100 tipos de elementos diferentes. Cada tipo de elemento se identifica con un número único y un prefijo que lo relaciona con la clase de elemento. Para esta aplicación, se busca la opción solid » 20 node 95. Esta referencia hace énfasis en un elemento sólido en el cual se van a tener presentes 20 nodos en cada elemento.
- **Preprocessor » Meshing » Mesh attributes » Default attribs** Una vez que se relacionan los cuadros de atributos, se deben asignar estos atributos a las diferentes partes del modelo. Se genera un número de referencia para cada arreglo de atributos, que incluye el número del material, el número del arreglo de constantes reales, el número del elemento y el número del sistema de coordenadas.
- **Preprocessor » Meshing » Mesh tool** La generación automática de la malla, se puede lograr accediendo a este menú. La densidad de la malla es extremadamente importante ya que una malla demasiado amplia puede contener errores y una muy fina haría muy extenso el tiempo de cálculo con lo cual se podría ver afectada la capacidad del computador. Los controles de enmallado permiten establecer factores tales como la forma de los elementos, la localización del nodo intermedio, el tamaño de los elementos y el tipo de enmallado (libre o mapeado).

Ya establecida la malla, ningún volumen puede ser borrado, para lograrlo se debe eliminar la malla, lo cual es un procedimiento complejo si el modelo consta de muchos elementos.

- **Preprocessor » Loads » Define loads » Apply » Structural » Displacement » Areas** Con esta opción se consigue restringir desplazamientos en el sentido X y Z los cuales no son de interés para esta investigación, además de colocar apoyos en el sentido vertical.
- **Preprocessor » Loads » Define loads » Apply » Structural » Preston** Permite la aplicación de las cargas que ocasionaran la deformación de la estructura. Para nuestro análisis la presión a utilizar es de 2263536.97 N/m².
- **Solution » Solve » Current LS** Es el procedimiento a seguir para resolver el caso de carga planteado.

- **General Postproc » Plot results » deformed shape** Es la fase donde se repasa los resultados del análisis a través de las representaciones gráficas y de los listados tabulares. de los datos que arroja el software.

3.0 EVALUACION Y VERIFICACION DE LAS METODOLOGIAS DE CALCULO INVERSO

Principalmente, lo que se persigue en el presente capítulo, es retrocalcular los módulos de las capas del pavimento a partir de las deflexiones medidas en campo, y hacer la comparación con las herramientas BAKFAA y BACKMOD ajustando las deflexiones lo mas aproximado posible para luego emplear la herramienta de elementos finitos (ANSYS), que posiblemente es la herramienta que mas se aproxima a los datos reales de una estructura de pavimento, con la que finalmente se buscaría verificar cual herramienta arroja mejores resultados.

La selección de valores iniciales para los parámetros de entrada en los programas de cálculo inverso corresponden a los estudios realizados en el corredor pre-troncal carrera 27, del cual se tomaron 3 puntos de la calzada occidental: K1 + 050, K1 + 900 y K2 + 700, los cuales nos arrojaron la siguiente información.

Tabla 2. Datos de estudios realizados en la carrera 27.

PROYECTO UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER															
Cálculo de las Variables Estructurales del Pavimento															
Corredor:		AVENIDA 27										Fecha:		11/10/2005	
Sector:		AVENIDA QUEBRADA SECA - CALLE 59										Hoja:			
PR:		K1 + 050 - K3 + 450													
Calzada:		OCCIDENTAL. Ambos carriles													
Tipo de		Flexible													
Temp. Estándar		20 °C													
Carga Estándar		40 KN													
Abscisa	Temperatura Pavimento	D0 Campo	D1 Campo	D2 Campo	D3 Campo	D4 Campo	D5 Campo	D6 Campo	INFORMACION DE ESPESORES DE PAVIMENTO EXISTENTE			VARIABLES ESTRUCTURAL			
									Carpeta Asfáltica	Material Granular	H total	Mr AASHTO Diseño			
Km	°C	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	m	m	m	(Kg/cm ²)			
K1+050	21	196	130	105	65	35	30	28	0.20	0.36	0.56	685			
K1+900	22	261	184	151	84	28	22	10	0.14	0.22	0.36	1.850			
K2+700	20	221	159	124	67	19	15	5	0.15	0.21	0.36	4.625			

Fuente: Archivo Fotográfico GEOVIAL Ltda.

A partir de los Mr suministrados por la empresa consultora para evaluar las deflexiones de campo, se calcularon los módulos de la estructura de pavimento tomando como referencia dos métodos de cálculo de módulos de elasticidad, como son la SHELL 78 y la BARBER.

- **Método SHELL 78.** En los materiales granulares el módulo de elasticidad es una función de los módulos de las capas confinantes y de su propio espesor según el método Shell 78, el cual propone la siguiente expresión¹²

$$E_i = 0.206 * E_{i+1} * h_i^{0.45}$$

E_i = módulo de elasticidad de la base granular en kg/cm².
 E_{i+1} = módulo de elasticidad de la capa inferior en kg/cm².
 h_i = espesor en mm de la base granular.

- **Método BARBER.** BARBER propone para las capas granulares la siguiente expresión:

$$E_i = E_{i+1} * [1 + 10.52 * \ln(h) - 2.10 * \ln(E_{i+1}) * \ln(h)]$$

E_i = módulo de elasticidad de la base granular en psi.
 E_{i+1} = módulo de la capa inferior en psi.
 h = espesor de la base granular en pulgadas.

Utilizando el promedio de estas dos relaciones se obtienen los módulos para las diferentes capas como una aproximación de los módulos entregados en campo. En la siguiente tabla se pueden observar los módulos, espesores y relaciones de poisson's para los diferentes puntos de campo elegidos.

¹² SANCHEZ SABOGAL, Fernando. Pavimentos. 6 Ed. Tomo 1. Bogotá 1992. P. 82.

Tabla 3. Módulos promedio, espesores y relaciones de poisson de los puntos de campo a analizar.

Abcisa	Capa	Modulo Prom. (Kg/cm ²)	Espesor (cm)	Relación de Poisson
K1+050	carpeta	6094,90	20	0,36
	base	3415,60	20	0,4
	subbase	1601,60	16	0,45
	subrasante	685,00		0,49
K1+900	carpeta	7739,90	14	0,37
	base	4935,90	12	0,4
	subbase	3075,90	10	0,45
	subrasante	1850,00		0,49
K2+700	carpeta	15902,20	15	0,35
	base	9334,30	11	0,4
	subbase	6539,50	10	0,45
	subrasante	4625,00		0,49

3.1 Metodología del cálculo inverso con el programa BAKFAA

La escasa aportación que ofrece el software con respecto a las diferentes variables que se pueden presentar en el momento de la toma de los datos de campo, dificulta un poco el manejo de este programa ya que no contiene suficientes herramientas como para introducir condiciones eventuales.

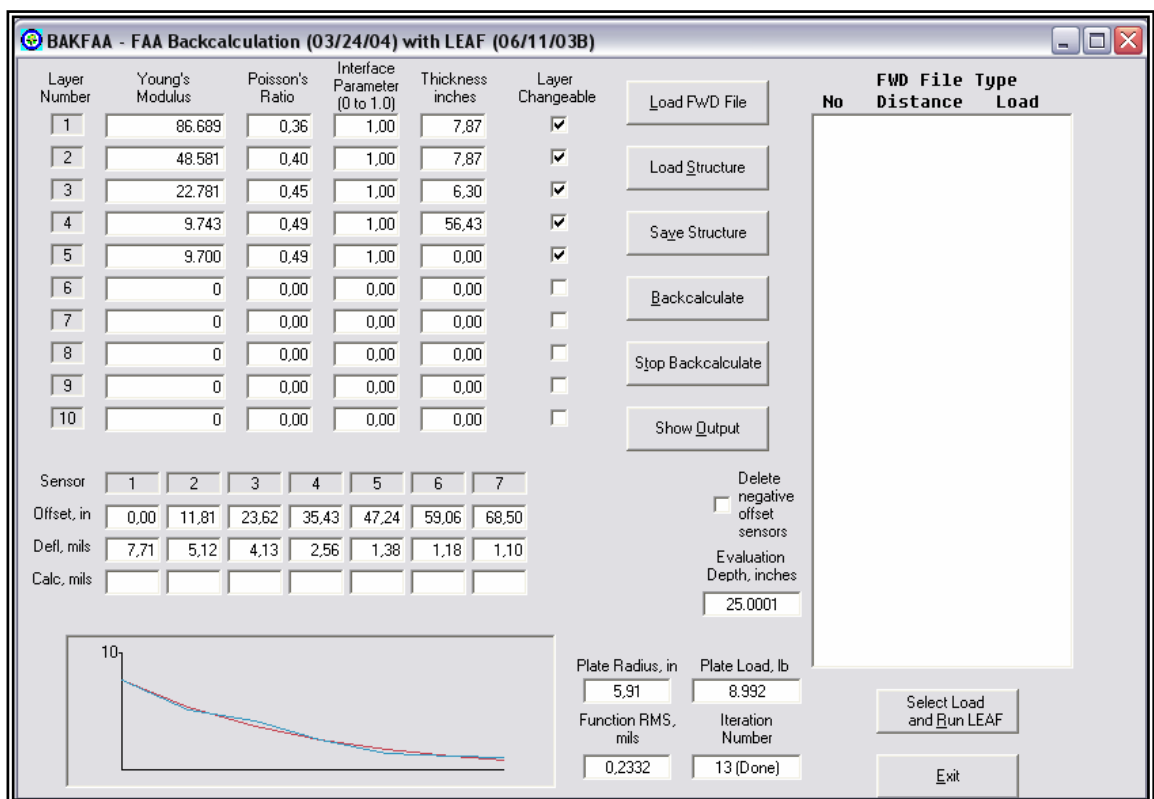
El programa BAKFAA admite un número limitado de capas, asumiendo comportamientos elásticos y lineales de cada una de ellas. Precisamente por eso, y por su falta de habilidad para modelar y representar discontinuidades, los módulos calculados representan valores equivalentes o efectivos que consideran la presencia de anomalías, como por ejemplo la existencia de fisuras, variaciones de espesores y combinación de capas.

Existe un claro consenso general, y es que las deflexiones medidas en puntos suficientemente alejados del área de aplicación de la carga están relacionadas principalmente con la respuesta o módulo resiliente de la subrasante. Esta es la premisa básica sobre la cual se fundamentan la mayoría de las técnicas de cálculo, permitiendo utilizar estos sensores más alejados para el cálculo de dicho módulo inicial para la subrasante. Las soluciones para las demás capas derivan en general del proceso iterativo a partir de este primer cálculo o estimación.

Se retrocalcularon los módulos de las capas asfálticas, de las granulares y de la subrasante utilizando toda la cuenca de deflexión y siguiendo la metodología mencionada en el capítulo 1, para lo cual se procesó la información con la ayuda de la aplicación desarrollada.

A continuación se presentan los parámetros de entrada para la alternativa K1+050 (Tabla 3), para los cuales la nomenclatura utilizada es la misma que se describe en 2.2.1.

Figura 27. Datos de entrada del programa BAKFAA. Alternativa N° 1.



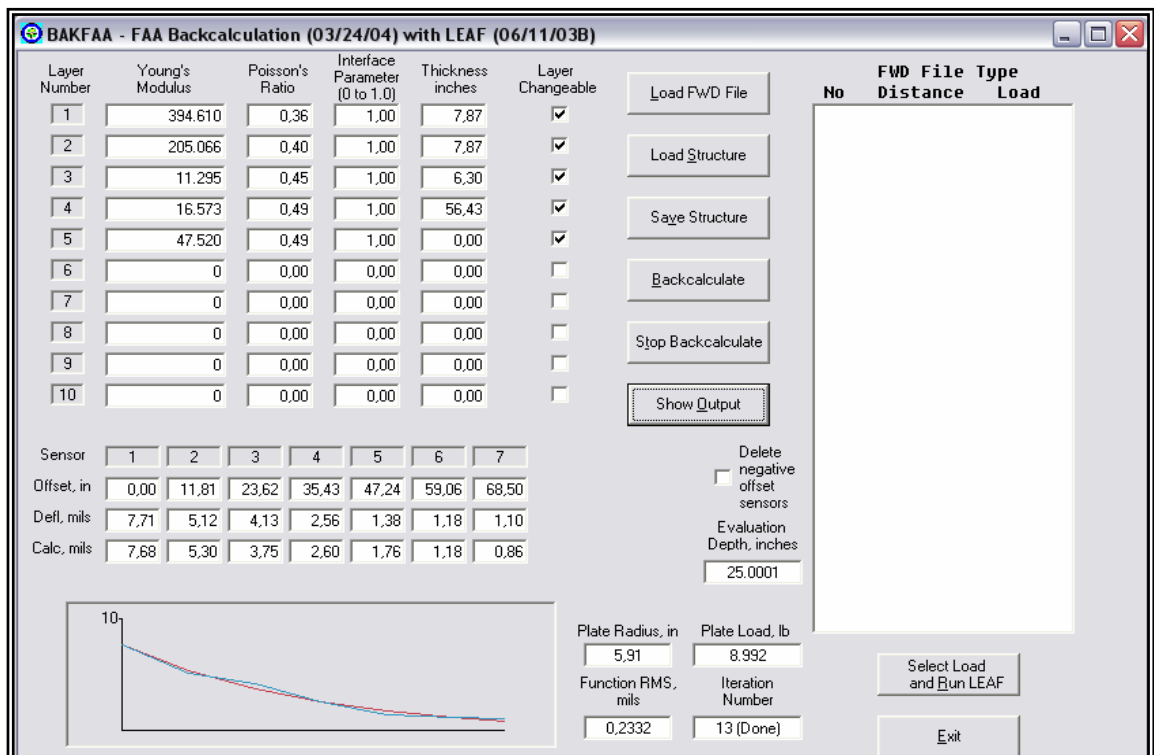
Luego de introducir los datos se procede a retrocalcular los módulos a partir de las deflexiones hasta encontrar la mínima desviación en la curva de ajuste de deflexiones.

Los resultados de funcionamiento del cálculo inverso demuestran que el error para la desviación (RMS) es 0.2386 mils, el cual se encuentra en la variación aceptable para el coeficiente de radio de acción 2 a 5% para el algoritmo del BAKFAA.

Los datos de salida se presentan en la figura 28, en la cual se visualiza que la curva de deflexiones presenta una desviación con un error mínimo el cual es aceptable.

Información más completa de los resultados del análisis para la alternativa No2 (K1+900) y alternativa No3 (K2+700) pueden encontrarse en el anexo B.

Figura 28. Datos de salida del programa BAKFAA. Alternativa N° 1.



3.2 Metodología de cálculo inverso con el programa BACKMOD

Partiendo de las principales características obtenidas con la evaluación deflectométrica efectuada para el tramo de análisis con el equipo FWD, se procedió al cálculo inverso de la estructura concluyendo que las deflexiones, radios de curvatura y los módulos no consisten en una constante sino que dependen de las condiciones en que se les determine. Conocidas las ecuaciones constitutivas, que es lo más laborioso, estos valores pueden aproximarse.

Es importante tener presente que los módulos obtenidos del retroajuste son acordes a las condiciones en que se realizó el ensayo deflectométrico, tanto del sistema de aplicación de la carga como de la estructura. Entre ellas se pueden nombrar:

- Carga aplicada.
- Frecuencia de aplicación de la carga.
- Temperatura de los materiales.
- Condiciones de humedad de los materiales.
- Estado de deterioro de cada material.

Esto plantea la necesidad de analizar las diferencias entre estas condiciones de ensayo y las condiciones de diseño, para plantear ajustes en los módulos en caso de ser requerido.

Debido a las grandes diferencias entre las deflexiones medidas y las de campo, se pone de manifiesto la importancia de la consideración de posibles diferencias modulares en profundidad FWD cuando se utiliza la modelización de la estructura en base a metodologías FWD.

En las siguientes figuras se observan los datos de entrada y los resultados de la simulación y la subdivisión en capas hechos por el programa para la alternativa No1, K1+050.

Figura 29. Datos de entrada del programa BACKMOD. Alternativa N° 1.

Programa BACKMOD - IMAE para retroajuste modular

Tipo de auscultación de la deformada: Medición Absoluta (ej. FWD)

Absoluta (FWD) ▼

radio de carga (mm)	150	presión (MPa)	0,283
inter eje (mm)	0	trocha (mm)	20000
carga del eje (kN)	80,0	FWD carga aplicada	40,0
		presión	0,566

Datos de la Deformada en carga medida

Distancia (mm)	0	300	600	900	1200	1500	1740		
Deflexión(mm/1000)	196	130	105	65	35	30	28		

Datos de la Estructura

5 capas

Código tipo de capa	Altura (mm)	Módulo (MPa)	Ecuación Mr			Relación modular	Poisson	Interfaz	Mod max (MPa)
			coef_A	coef_B	coef_C				
A ajustar ▼	200	609					0,36	Adherid ▼	8000
Mr ajust. F1 ▼	200	342	8000,0	1,00	0,00		0,40	Adherid ▼	8000
Mr ajust. F1 ▼	160	160	8000,0	1,00	0,00		0,45	Adherid ▼	8000
A ajustar ▼	1000	69					0,49	Adherid ▼	8000
A ajustar ▼							0,49	Adherid ▼	8000
▼								Adherid ▼	
▼								Adherid ▼	
▼								Adherid ▼	

Desarrollado por Laboratorio Vial IMAE - Oscar H. Giovanon

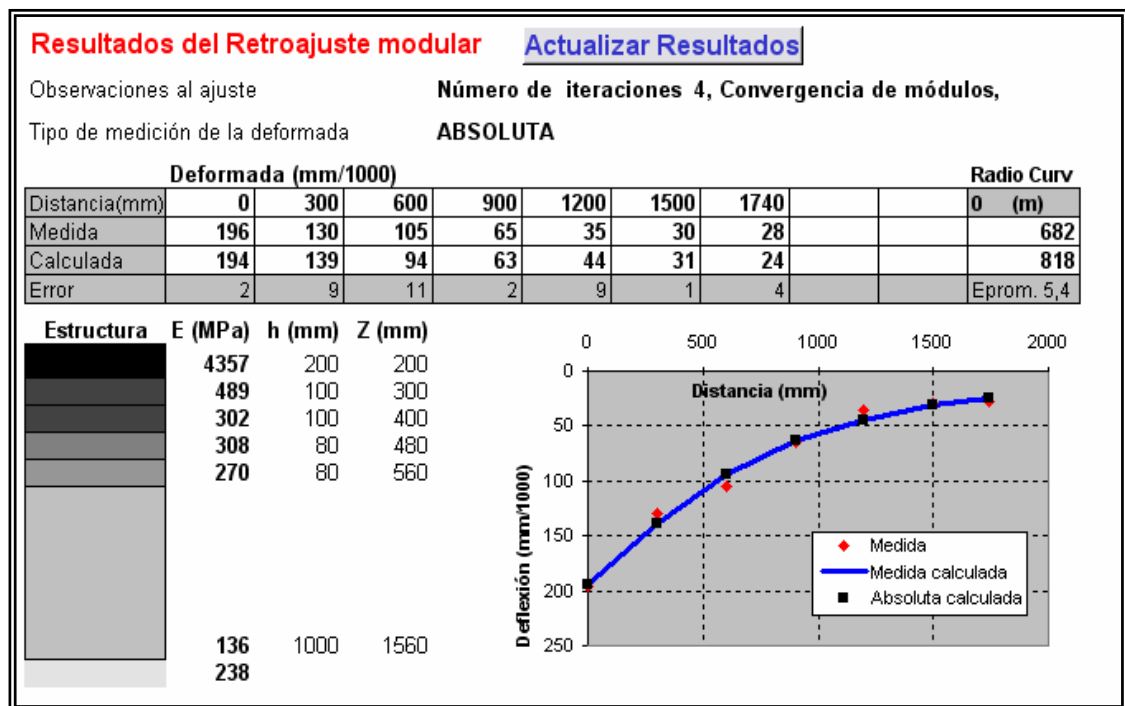
Ejecutar Backmod

Partiendo de estas relaciones entre coeficientes y de mediciones FWD, se realizó el retroajuste de la estructura en cada medición. Se planteó el ajuste del coeficiente A para las capas base y subbase.

Luego de varias iteraciones para el cual se buscaba que la curva de deflexiones se ajustara al máximo, se obtuvieron los datos de salida mostrados a continuación.

Información más completa de los resultados del análisis para la alternativa No2 (K1+900) y alternativa No3 (K2+700) pueden encontrarse en el anexo C.

Figura 30. Datos de salida del programa BACKMOD. Alternativa N° 1.



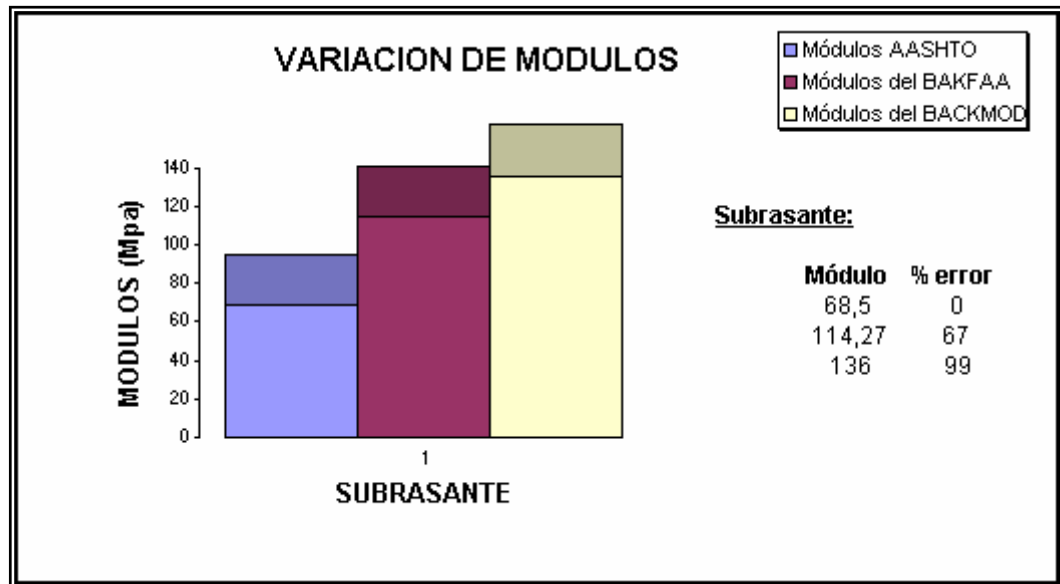
Una primera condición es visualizar si el modelo matemático planteado logra representar la estructura real en su aspecto de deformabilidad. Es decir las deflexiones estimadas teóricamente son suficientemente similares a las medidas.

En el caso particular del retroajuste realizado en base a mediciones FWD, el modelo podrá en general reproducir exactamente los valores de la medición in situ.

En otros casos, donde se disponga un mayor número de mediciones de deflexión de capas a ajustar, no existirá una coincidencia exacta entre los valores teóricos y las mediciones de campo de los desplazamientos en superficie.

Con la información relacionada anteriormente, y utilizando la aplicación efectuada con la primer metodología, la cual consiste en obtener mediante el cálculo inverso el valor de los módulos a partir de las deflexiones de campo; se proceso la información en las herramientas computacionales para así determinar los respectivos módulos y proceder con las comparaciones entre los dos programas.

Figura 31. Gráfico comparativo de módulos en la subrasante para la alternativa N° 1.



Comparando los resultados que genera la aplicación con base en la información suministrada de acuerdo con lo mencionado anteriormente, se concluyo lo siguiente:

- Los valores de módulos en la subrasante encontrados a partir del procedimiento de retrocálculo, divergen en gran proporción con respecto al módulo obtenido mediante la AASHTO.
- Ninguno de los dos programas utilizados para esta etapa de la investigación se aproxima lo suficiente, como para tener la certeza que el módulo obtenido mediante el procedimiento de la AASHTO, es realmente el que se encuentra en campo.

Con respecto al resultado anterior, procedemos a comparar los módulos de las capas granulares y de la subrasante a partir de los dos modelos utilizados anteriormente para retrocalcular y verificar a continuación la exactitud que nos pueda ofrecer alguna de estas dos herramientas.

Figura 32. Gráfico comparativo de deflexiones para la alternativa N° 1.

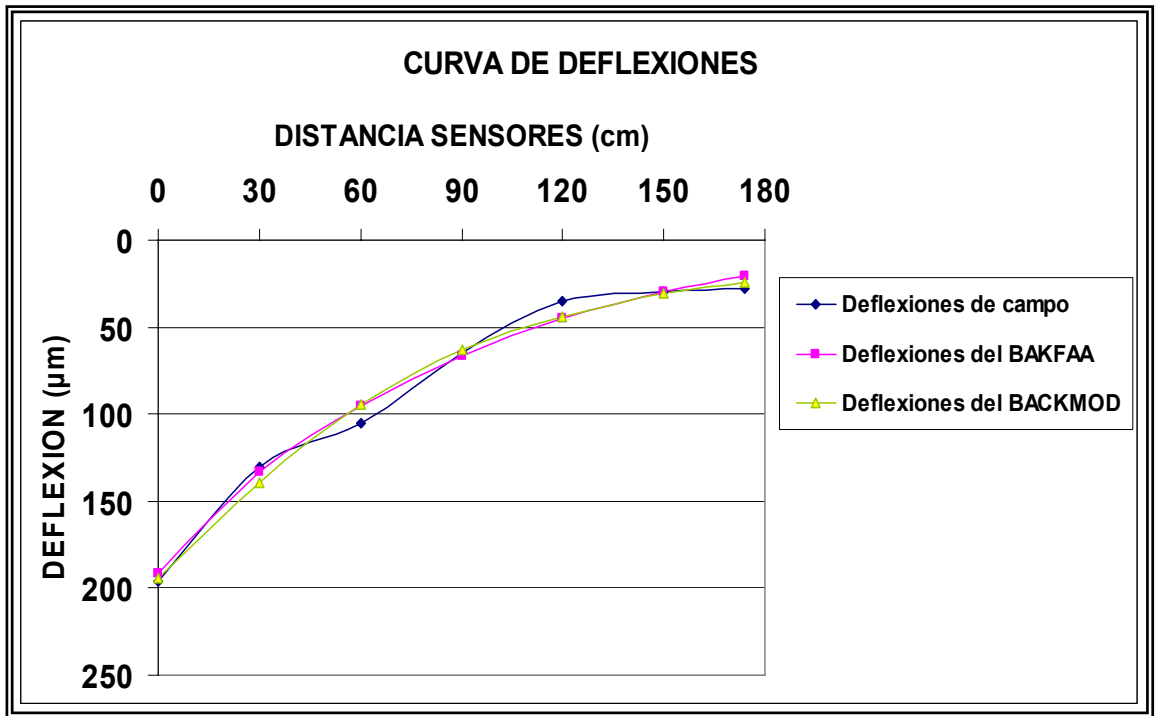
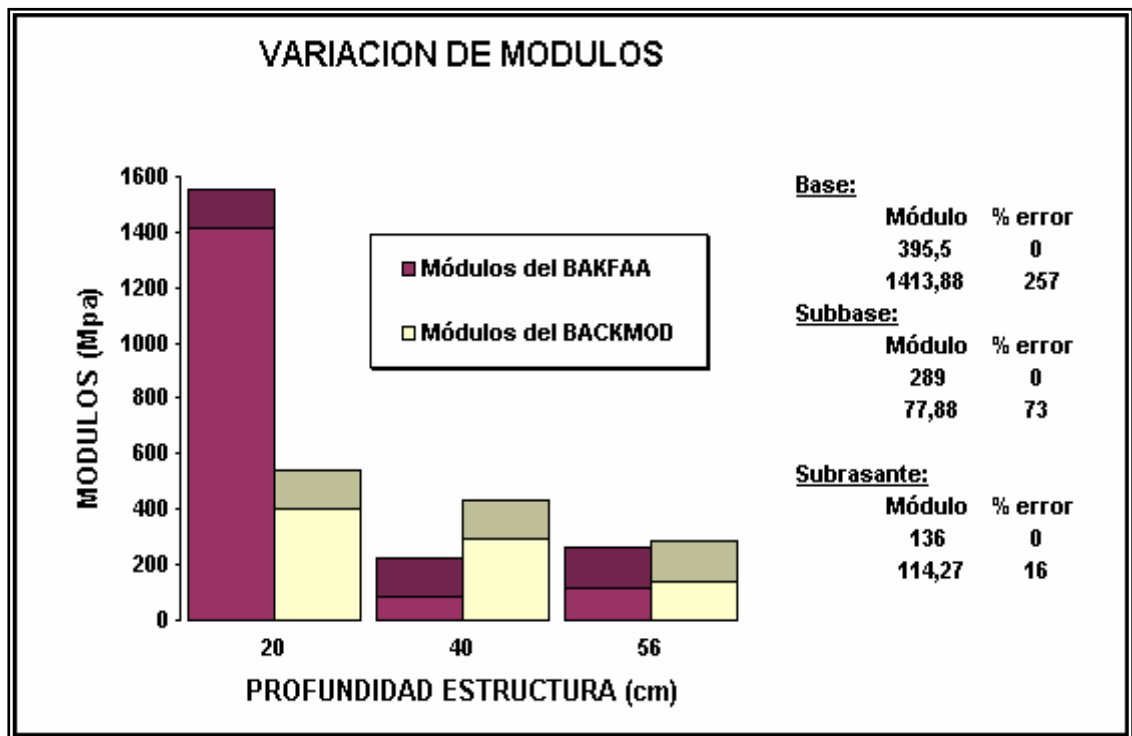


Figura 33. Grafico comparativo de módulos entre el BAKFAA y el BACKMOD para la alternativa N° 1



A partir de los dos gráficos anteriores, se sacó la siguiente información:

- Los valores de los módulos de la base granular obtenidos en el proceso de retrocálculo mediante el programa BAKFAA arrojan resultados muy elevados comparándolos con la metodología del BACKMOD.
- Los resultados arrojados por medio de los dos software utilizados, proporcionan aún módulos muy elevados en la subbase granular. Dicha variación se ve reflejada en el manejo de cada uno de los programas aprovechando la subdivisión de capas que ofrece una de estas herramientas.
- Se puede observar que los módulos arrojados por las dos herramientas se encuentran en un valor adecuado, con lo cual no se asegura aún que estas dos herramientas ofrezcan resultados apropiados.
- Los valores de deflexión obtenidos mediante el FWD varían en un rango muy alto, el cual no se ajusta lo suficiente a las deflexiones obtenidas mediante el retrocálculo por medio de las herramientas ANSYS y BACKMOD.

Información más completa de la comparación del análisis para la alternativa No2 (K1+900) y alternativa No3 (K2+700) pueden encontrarse en el anexo D.

3.3 Comparación y verificación de las metodologías a partir del programa ANSYS.

El paso a seguir para la verificación del cálculo inverso, es comparar las metodologías de elementos finitos con las herramientas anteriormente evaluadas. Con el estudio de las metodologías de retrocálculo es importante conocer el estado de esfuerzos en el que se encuentra un pavimento flexible bajo una carga, para ello se aplica la teoría multicapa elástica desarrollada por Burmister D. (1945) con la cual trabaja el programa everstress (ANEXO A), para finalmente encontrar el valor de los módulos, los cuales serían introducidos en el software de elementos finitos ANSYS.

La identificación de los valores de módulos en la estructura de pavimento se llevó a cabo con la sectorización de tramos homogéneos de esfuerzos, estos módulos se obtuvieron mediante la siguiente relación¹³:

$$E_{BS} = K_1 \theta^{K_2}$$

Donde:

θ = Suma de esfuerzos principales

k_1, k_2 = Constantes de regresión las cuales son función del tipo de material.

Luego de identificar las zonas homogéneas de esfuerzos, se procedió a establecer la geometría de la estructura de pavimento en base a la homogeneidad de los materiales que la conformarían, (figura 31).

En la figura 32 aparecen los valores de los módulos que se insertaron en el ANSYS a partir de los cálculos de los esfuerzos.

¹³ MANUAL DE AASHTO 1993. Design of pavement structures. Washington D.C 2001.

Figura 34. Distribución de módulos.

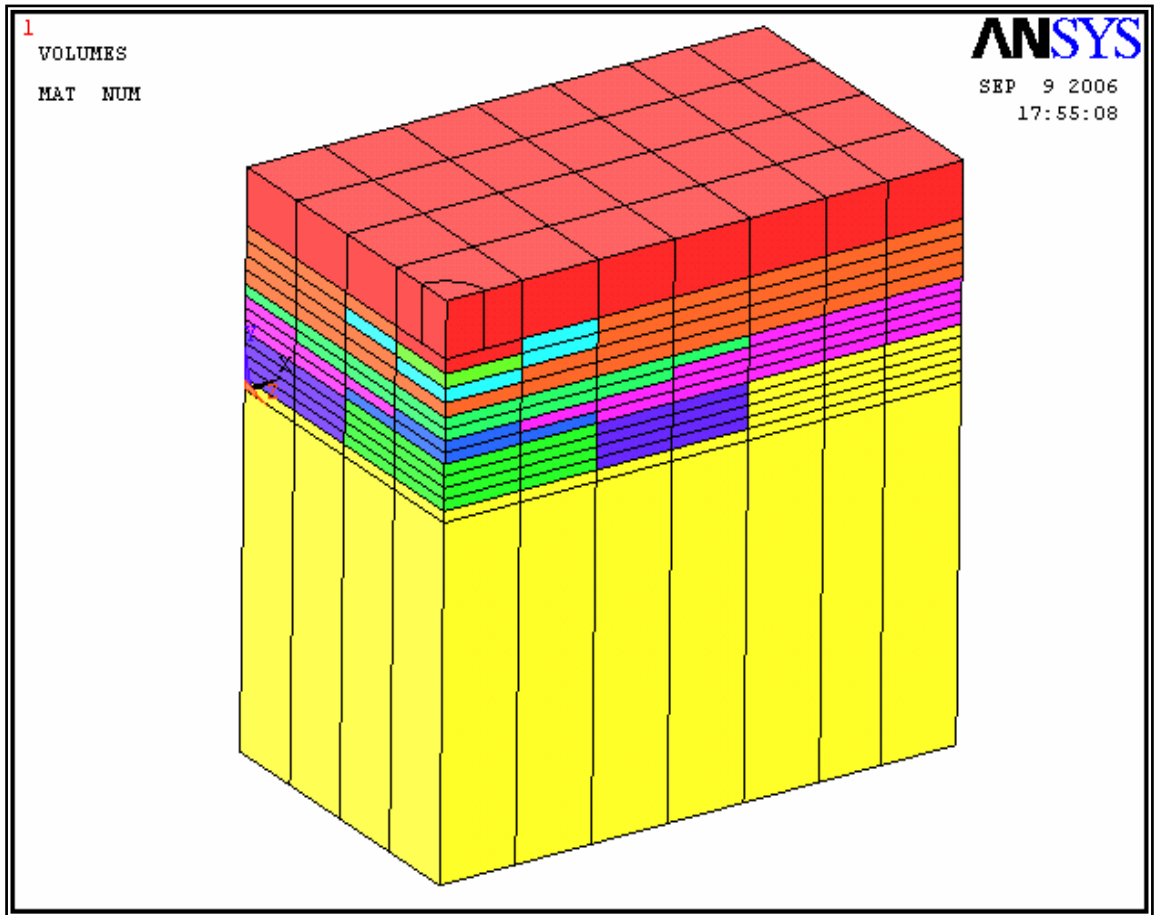
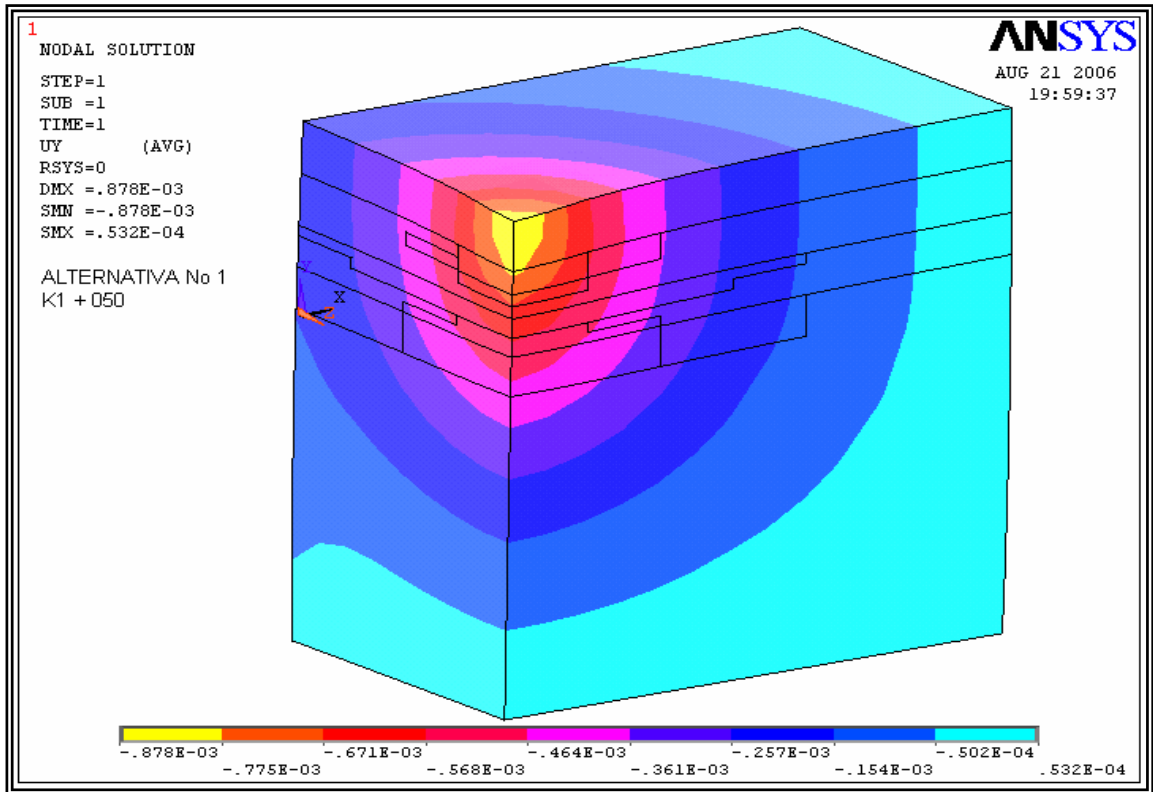


Figura 35. Valores de módulos insertados en el ANSYS.

MODULOS INSERTADOS		
MODULO - 1	633,23	Mpa
MODULO - 2	132,57	Mpa
MODULO - 3	97,149	Mpa
MODULO - 4	95,93	Mpa
MODULO - 5	121,28	Mpa
MODULO - 6	82,97	Mpa
MODULO - 7	28,44	Mpa
MODULO - 8	65,66	Mpa
MODULO - 9	35,26	Mpa
MODULO - 10	28,19	Mpa

Con la información relacionada anteriormente para el programa ANSYS y luego del ajuste de los parámetros de entrada para dicho programa, se obtuvieron los siguientes resultados. Ver figura 33.

Figura 36. Distribución de desplazamientos arrojados por el programa ANSYS para la alternativa N° 1.



Ahora, con los resultados obtenidos de la herramienta de elementos finitos los cuales nos servirán como parámetros de entrada para las herramientas computacionales BAKFAA y BACKMOD se procedió a buscar el mayor ajuste de deflexiones en las dos herramientas.

- **Ajuste de calculo inverso con el programa BAKFAA**

Figura 37. Parámetros de respuesta usando el programa BAKFAA para la primera iteración.

The screenshot shows the BAKFAA software interface with the following components:

Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness inches	Layer Changeable
1	98.852	0,35	1,00	7,87	<input checked="" type="checkbox"/>
2	22.423	0,40	1,00	7,87	<input checked="" type="checkbox"/>
3	15.834	0,45	1,00	6,30	<input checked="" type="checkbox"/>
4	6.776	0,49	1,00	56,43	<input checked="" type="checkbox"/>
5	5.916	0,49	1,00	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>
6	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
7	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
8	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
9	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
10	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, in	0,00	11,81	23,62	35,43	47,24	59,06	68,50
Defl, mils	34,57	22,90	14,57	9,32	5,72	3,07	1,35
Calc, mils	31,75	21,11	14,73	10,91	8,43	6,75	5,77

Buttons: Load FWD File, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output

Options: Delete negative offset sensors

Evaluation Depth, inches: 25.0001

Plate Radius, in: 5,91 | Plate Load, lb: 8.992

Function RMS, mils: 2,7809 | Iteration Number: 34 (Done)

Buttons: Select Load and Run LEAF, Exit

Graph: A line graph showing deflection (mils) on the y-axis (0 to 40) versus distance (inches) on the x-axis (0 to 70). Two curves are plotted: a red curve (measured) and a blue curve (calculated). Both curves show a decreasing trend, starting at approximately 35 mils at 0 inches and leveling off around 5-6 mils at 70 inches.

Figura 38. Parámetros de respuesta usando el programa BAKFAA para la segunda iteración.

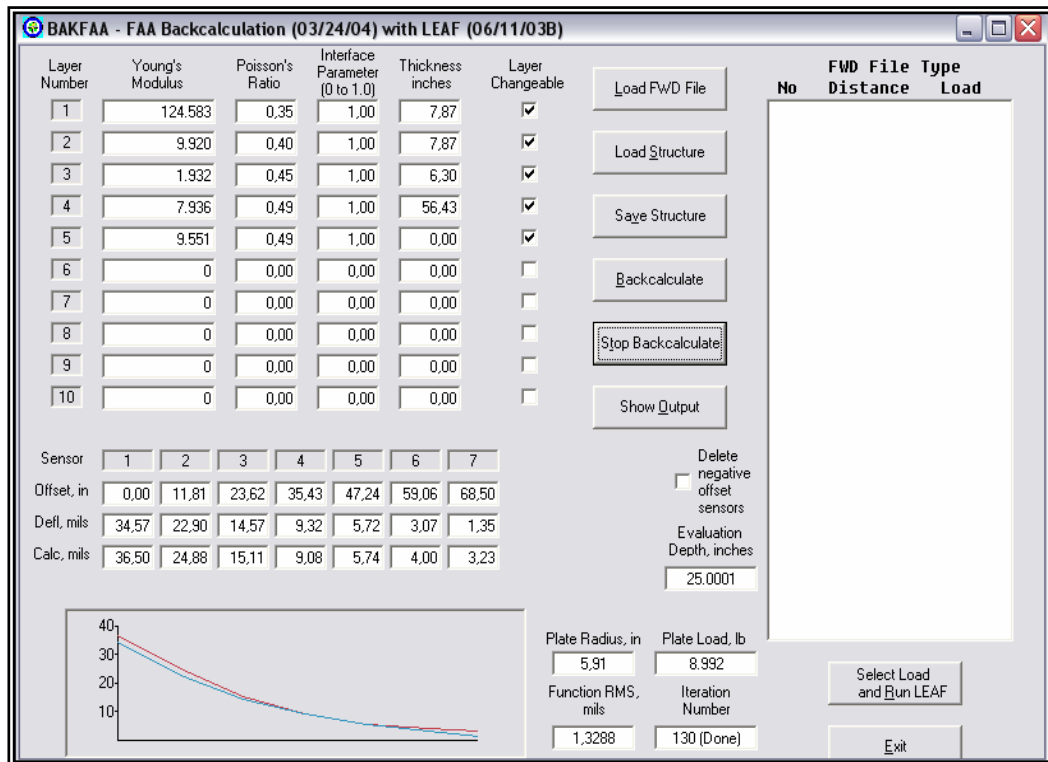
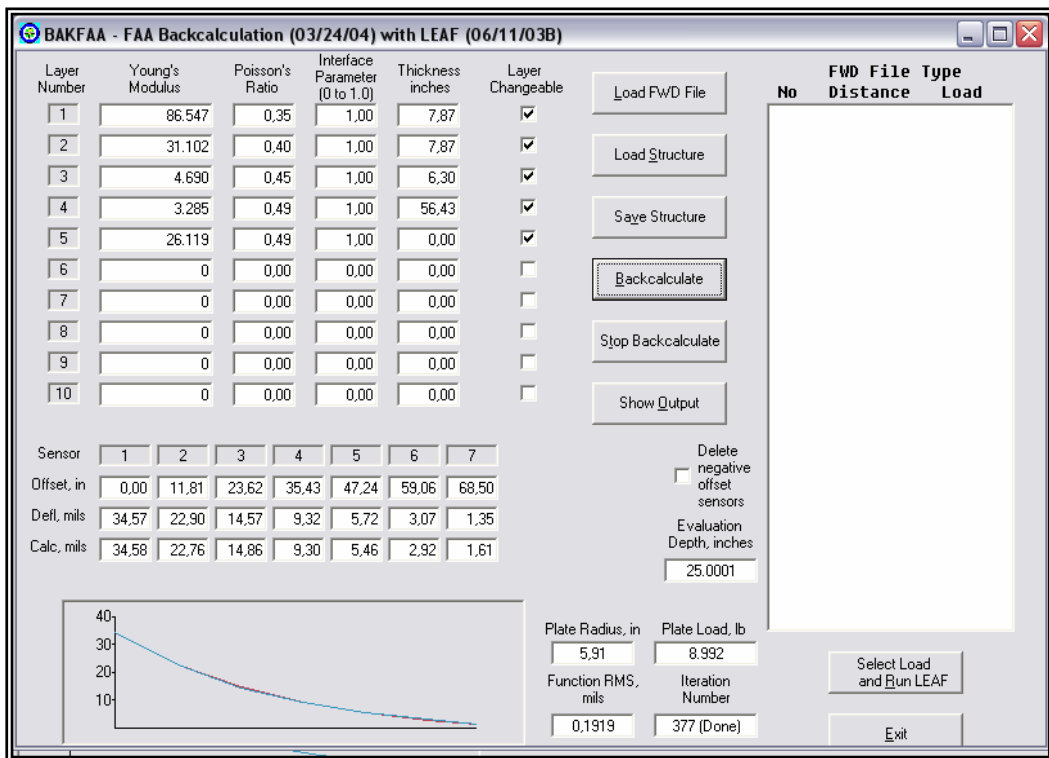


Figura 39. Parámetros de respuesta usando el programa BAKFAA para la tercera iteración.



La verificación de los resultados para la alternativa No1, se fundamenta en el ajuste de la desviación con el mínimo valor que corresponde a 0.1919 mil el cual se encuentra en la variación aceptable para el coeficiente de variación para el algoritmo del BAKFAA.

- **Ajuste del calculo inverso con el programa BACKMOD**

Figura 40. Parámetros de respuesta usando el programa BACKMOD para la primera iteración.

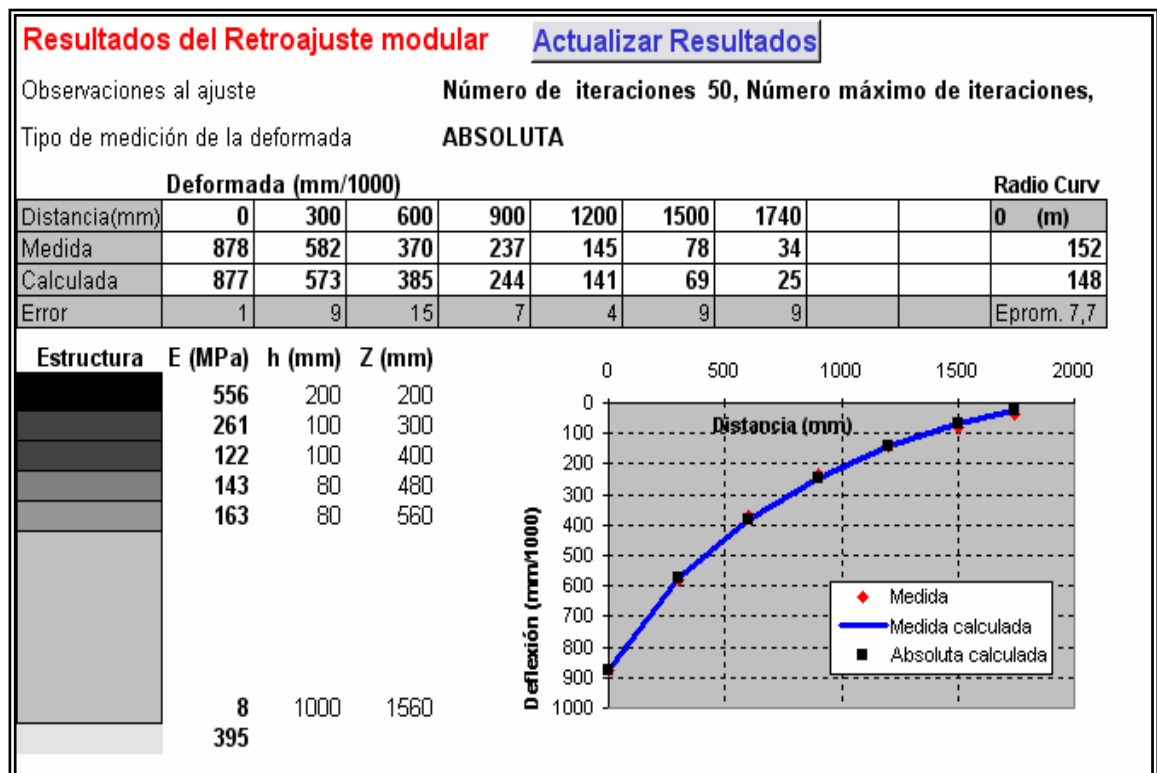


Figura 41. Parámetros de respuesta usando el programa BACKMOD para la segunda iteración.

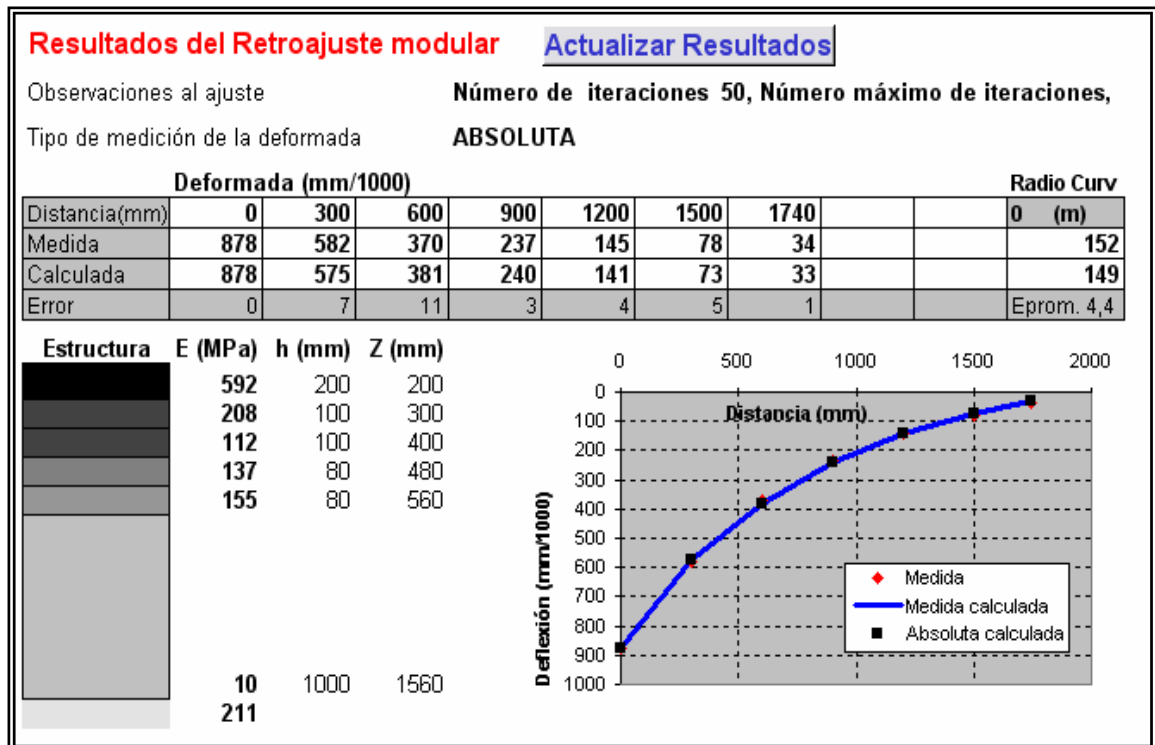
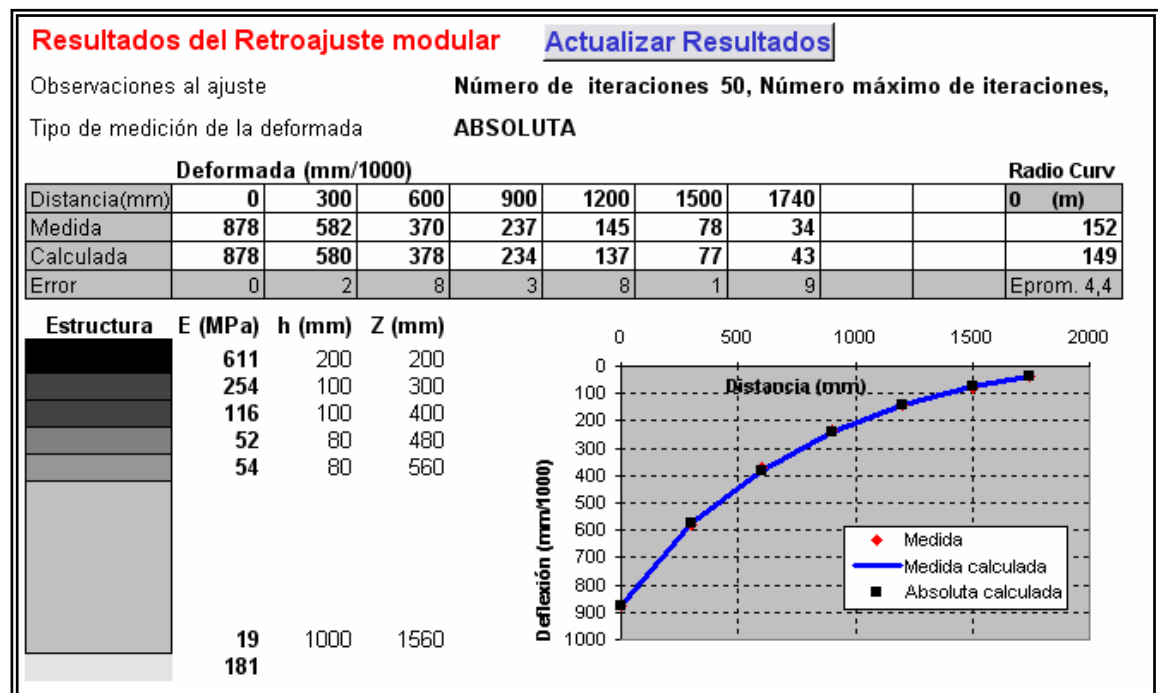


Figura 42. Parámetros de respuesta usando el programa BACKMOD para la tercera iteración.



La verificación de los resultados para la alternativa No1, se fundamenta en el ajuste de la desviación con el mínimo valor que corresponde a 4.4 mm, el cual se encuentra en la variación aceptable para el coeficiente de variación para el algoritmo del BACKMOD.

Comparando con los resultados obtenidos directamente en el programa ANSYS, se puede observar que los módulos arrojados mediante el cálculo inverso de las capas de la estructura establecidos con el programa BAKFAA, presentan variaciones muy grandes para las capas granulares y de subrasante, lo cual indica que esta herramienta computacional no es confiable a la hora de utilizarla como modelo para un estudio de campo.

A continuación se presenta un resumen de la información obtenida para la alternativa No 1 del presente estudio.

En las siguientes figuras, se puede ver con mayor exactitud la variación tanto de módulos como de deflexiones para los tres programas en estudio tomando como criterio la alternativa 1.

Figura 43. Comparación curvas de deflexiones para la alternativa N° 1.

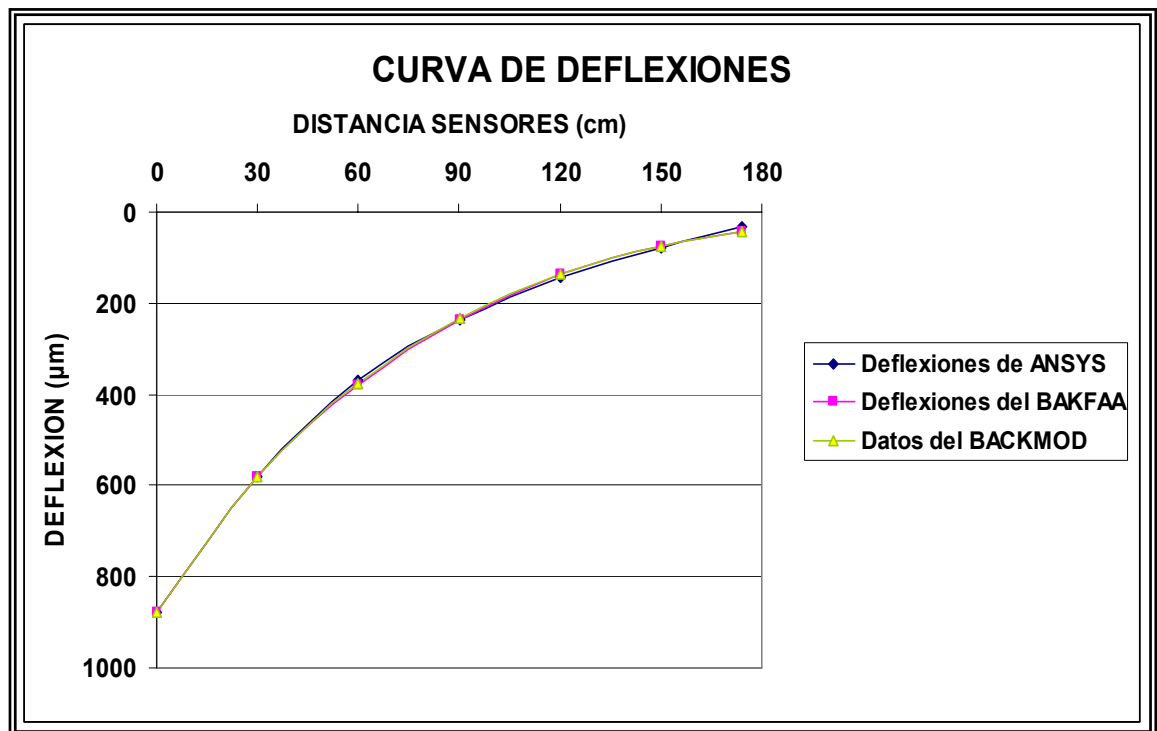
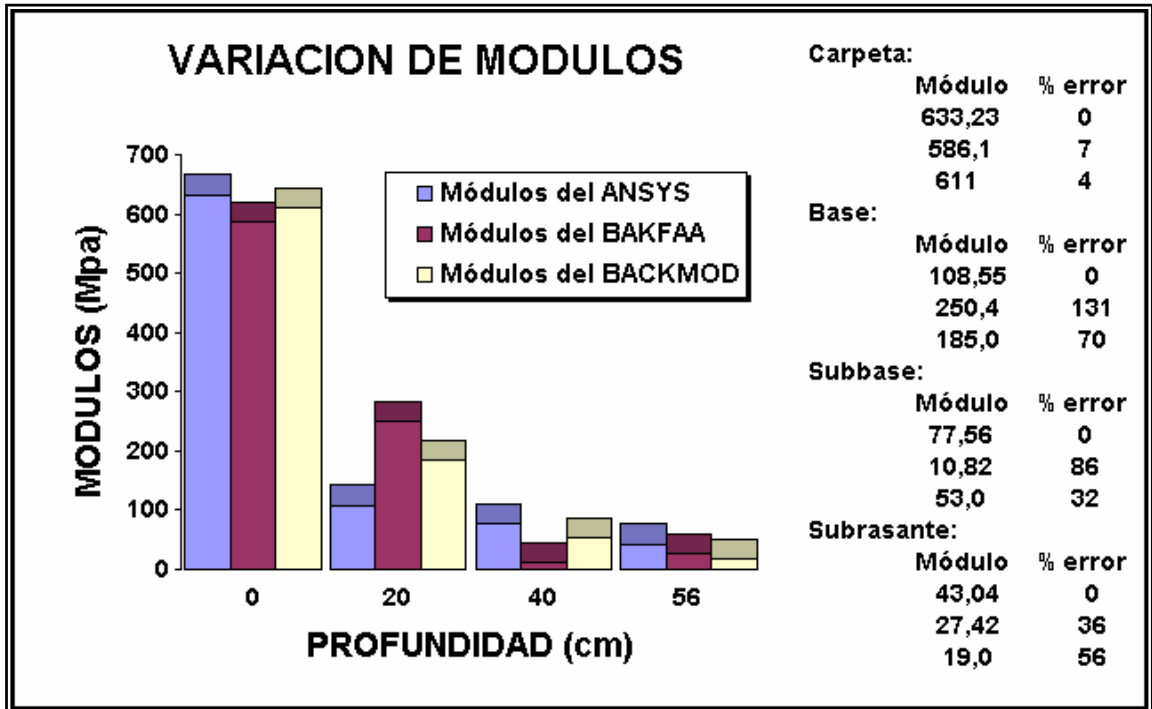


Figura 44. Gráfico comparativo de módulos y porcentajes de error para la alternativa N° 1.



- De acuerdo a los datos arrojados en el gráfico anterior y comparando las dos metodologías a utilizar como son BAKFAA y BACKMOD con el programa de elemento finitos, se puede observar que la herramienta que arroja mejores resultados es el BACKMOD, comprobando que el sistema que utiliza para retrocalcular, encontrando las ecuaciones constitutivas y permitiendo además la subdivisión de capas es suficiente para acercarse a un modelo tan eficiente como es el de elementos finitos.
- En las distintas capas, el porcentaje más bajo de error se presenta la mayoría de veces con el programa BACKMOD.
- En cuanto a las deflexiones y comparándolas con el primer análisis que se hizo, las deflexiones en los diferentes programas se ajustan mejor, con lo cual se tiene mayor certeza en cuanto al juego de módulos por ajustarse mejor la curva de deflexiones.

Probablemente los módulos que se sustentan como válidos con el programa BACKMOD al ser comparados con los de ANSYS sean los reales, lo cual no da como válido tal afirmación ya que la única manera de comprobar estos resultados es elaborando un modelo en el cual se puedan identificar las variables con más aproximación para así despejar cualquier tipo de incertidumbre que se haya podido presentar.

Información más completa de los resultados del análisis para la alternativa No2 (K1+900) y alternativa No3 (K2+700) pueden encontrarse en el anexo E.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Los módulos retrocalculados de una estructura de pavimento, de cierta manera pueden resultar más confiables que las mismas medidas de campo, ya que existen diferentes variables en campo (contenido de humedad, densidad, tipo de material, etc.) que pueden afectar las medidas y que en cierta parte en el momento de tomar las deflexiones, no son tenidas en cuenta.
- A pesar que muchos de estos programas son bastante similares, sus resultados pueden variar fundamentalmente debido al tipo de esquema utilizado para realizar la iteración, basándonos en esto, los resultados más próximos al ANSYS son los proporcionados por el BACKMOD con lo cual se sustenta la variación de módulos como una ayuda muy eficiente.
- Los valores de K_1 y K_2 manejados en el programa BACKMOD, resultaron superiores en pequeña medida a los valores asumidos en el proceso de manejo del programa de elementos finitos.
- Las metodologías de retrocálculo de los módulos de las capas del pavimento asfáltico a partir de las deflexiones, utilizan fórmulas en las que los módulos se encuentran como variables implícitas que no es posible despejarlas, razón por la cual se debe recurrir a su solución mediante iteraciones y aproximaciones sucesivas. Lo anterior, hace necesario recurrir a herramientas computacionales para facilitar los cálculos y obtener los resultados con un mayor grado de confiabilidad.
- Evidentemente existe considerable incertidumbre en el proceso de retrocálculo. Su adecuado tratamiento para garantizar la obtención de módulos de razonable precisión, para ser utilizados con fines de diseño, no resulta sencillo. Debe ganarse experiencia en el procedimiento como para decidir, basándose además en el conocimiento de los materiales y en el comportamiento, si los valores hallados resultan razonables.
- En el retrocálculo la solución no es exacta ni única, y se requiere de una serie de iteraciones y condiciones o criterios de mecánica de suelos e ingeniería de pavimentos para ajustar dichas soluciones y obtener resultados consistentes.

4.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar un banco de datos con los resultados obtenidos de las verificaciones del comportamiento, lo que posibilitará en un futuro disponer una mayor confiabilidad en las leyes de falla utilizadas.
- Buscar ensayos en donde se incluyan diferentes materiales a los granulares, como por ejemplo arcillas, con el objetivo de verificar las diferentes ecuaciones constitutivas de los materiales y tener un banco de comparaciones acerca del comportamiento entre materiales granulares y arcillosos.
- Ensayar con diferentes metodologías de obtención de la deformada, para así verificar que variables pueden variar y en que grado para tener amplios rangos de información.
- El retrocálculo es un procedimiento complejo. Es necesario tener experiencia para asegurar que la resolución matemática obtenga como resultado el conjunto de módulos más aceptables, desde el punto de vista ingenieril, para una dada curva de deflexiones medida y esta necesidad de conocimiento y experiencia no se limita al procedimiento mismo del retrocálculo, sino a la medición e interpretación de deflexiones y ensayos característicos de materiales.

BIBLIOGRAFIA

- GUALDRON SUAREZ, Guillermo. Ensayos no destructivos en la caracterización de pavimentos flexibles. Tesis Biblioteca Central UIS. 1993.
- BENITEZ G., Patricia. VEGA U., Sandra del pilar. Retrocálculo de los módulos dinámicos de los pavimentos flexibles utilizando una herramienta computacional. Tesis Biblioteca Central UIS. 1998.
- VANEGAS BERNAL, Manuel. Estudio de metodologías de Retrocálculo de los módulos de las capas de pavimento a partir de las deflexiones tomadas con el Deflectógrafo Lacroix. Tesis, Maestría en Ingeniería Civil, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Bogotá. 2003.
- SILVA C., Andrea del pilar, ALFARO, Camilo Alberto. Red neuronal artificial en el Retrocálculo de módulos en capas de pavimento flexible. Tesis, Maestría en Ingeniería Civil, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Bogotá. 2003.
- SANCHEZ SABOGAL, Fernando. Diseño de pavimentos. 6 Ed. Tomo I. Bogotá, 1992.
- MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2 Ed. Universidad católica de Colombia. Bogota, 2002.
- The federal aviation administration.
<http://www.airporttech.tc.faa.gov>
- Universidad de Oviedo. Área de la ingeniería de la construcción.
<http://www.construccion.uniovi.es/area/ansys>

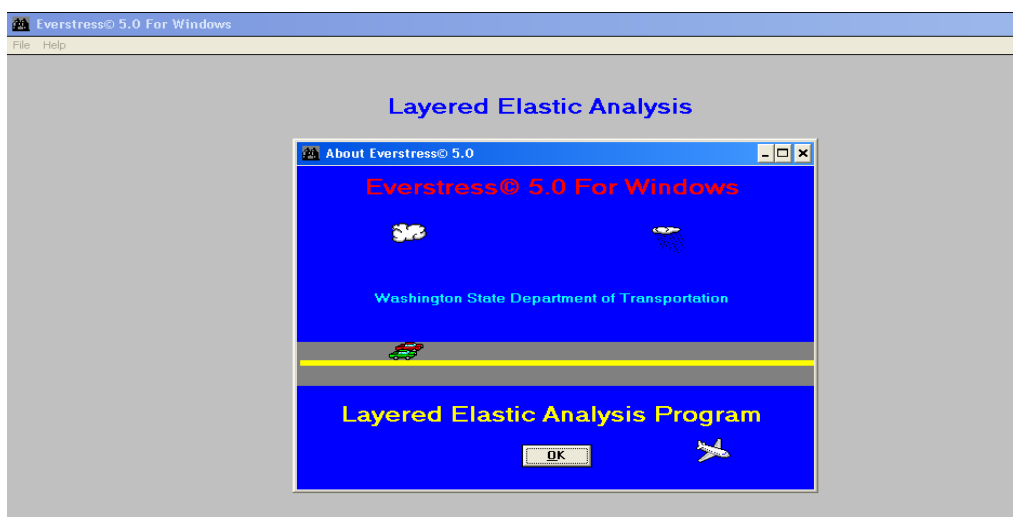
ANEXO A

Programa EVERSTRESS

Trataremos de dar una breve explicación de la obtención de los valores de módulo, los cuales son necesarios para entrar a calcular las deflexiones por medio del software ANSYS.

Mediante la aplicación del software everstress (figura 43), que a continuación se explicará en detalle, se lograron encontrar los esfuerzos principales en los diferentes puntos en que se encontraban los sensores del FWD, para con esto finalmente hallar la relación de módulos que se utilizaría en el programa ANSYS.

Figura 45. Entorno principal del programa everstress



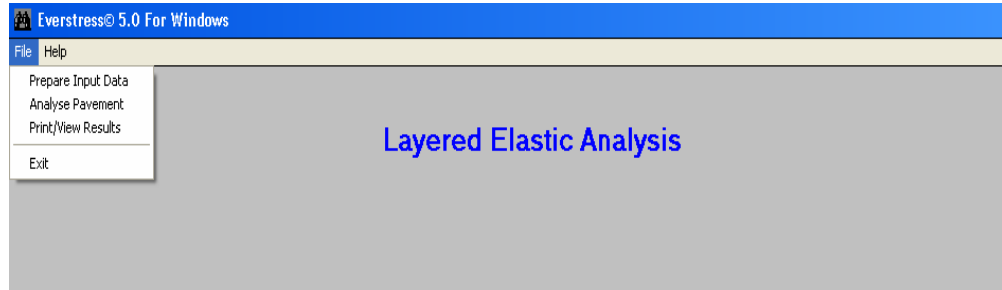
- **Software de análisis elástico Everstress.** Dicha aplicación consta de una pantalla principal, figura 44, donde se encuentra un menú de inicio con las opciones file y help.

Figura 46. Menú de inicio.



En la opción file se encuentran las ventanas, prepare input data, analyse pavement, view results y exit, como se puede ver en la figura 45.

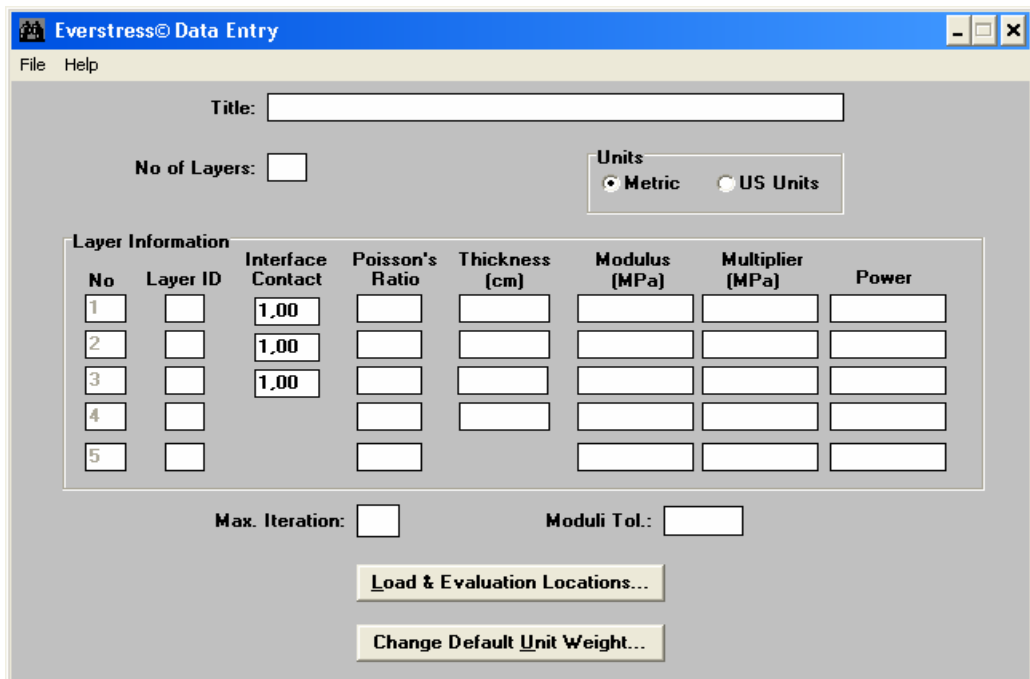
Figura 47. Opción file



- **Prepare input data (preparar entrada de información)**

Este comando suministra una forma de crear una entrada de archivos de datos o editar uno existente. La entrada de archivos contiene información de capas, información de cargas y evaluación de puntos, figura 46.

Figura 48. Ventana de entrada de datos de la estructura.



Este comando tiene otra opción (load & evaluation locations...) donde aparece otra ventana, figura 47, en la cual se ingresarán los datos de las cargas y de los puntos en los que se quiere evaluar los esfuerzos.

Figura 49. Ventana de entrada de datos de cargas y puntos de evaluación.

Load & Evaluation Points

No of Loads: No of X-Y Evaluation Points:

Load Information

X-Position (cm):

Y-Position (cm):

Load (N):

Pressure (kPa):

Radius (cm):

Evaluation Points

X-Position (cm):

Y-Position (cm):

Z-Position (cm):

Z-Position (cm):

Z-Position (cm):

Z-Position (cm):

Z-Position (cm):

Exit

- **Analyse pavement (análisis del pavimento)**

Este comando ejecuta el actual análisis. Requiere la entrada de archivos de datos.

- **View results**

Permite ver la salida de resultados teniendo como opción imprimirlos. Algunos de los resultados que se pueden ver son los esfuerzos normales, deflexiones, esfuerzos principales, como también los datos de entrada al programa. La siguiente figura muestra la salida de resultados del programa.

Figura 50. Hoja tipo de resultados del software everstress.

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0						
Title: alternativa1		No of Loads: 1		No of X-Y Evaluation Points: 7		
No of Layers: 4						
	Layer		Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	
	1		.38	20.000	609.49	
	2		.40	20.000	341.55	
	3		.45	18.000	180.18	
	4		.49		88.50	
Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)	
1	.00	.00	40000.0	567.44	15.000	
Location No: 1		X-Position (cm): .000		Y-Position (cm): .000		
Normal Stresses						
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
20.050	2	-4.54	-4.54	-216.71	.00	.00
25.000	2	14.29	14.29	-155.13	.00	.00
30.000	2	31.48	31.48	-109.32	.00	.00
35.000	2	51.37	51.37	-78.58	.00	.00
39.950	2	78.08	78.08	-55.94	.00	.00
Normal Strains and Deflections						
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)
20.050	2	245.81	245.81	-823.85	.000	.000
25.000	2	206.77	206.77	-487.85	.000	.000
30.000	2	183.29	183.29	-393.75	.000	.000
35.000	2	179.90	179.90	-344.47	.000	.000
39.950	2	202.88	202.88	-346.67	.000	.000
Principal Stresses and Strains						
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)
20.050	2	-216.71	-4.54	-4.54	-823.85	245.81
25.000	2	-155.13	14.29	14.29	-487.85	206.77
30.000	2	-109.32	31.48	31.48	-393.75	183.29
35.000	2	-78.58	51.37	51.37	-344.47	179.90
39.950	2	-55.94	78.08	78.08	-346.67	202.88

ANEXO B

- **Metodología de cálculo inverso con el programa BAKFAA usando como punto de partida los datos de campo (metodología AASHTO) alternativa No2 (K1+900).**

DATOS DE ENTRADA.

BAKFAA - FAA Backcalculation (03/24/04) with LEAF (06/11/03B)

Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness inches	Layer Changeable
1	110.086	0,37	1,00	5,51	<input checked="" type="checkbox"/>
2	70.205	0,40	1,00	4,72	<input checked="" type="checkbox"/>
3	43.749	0,45	1,00	3,94	<input checked="" type="checkbox"/>
4	26.313	0,49	1,00	64,3	<input checked="" type="checkbox"/>
5	26.000	0,49	1,00	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>
6	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
7	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
8	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
9	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
10	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, in	0,00	11,81	23,62	35,43	47,24	59,06	68,50
Defl. mils	10,28	7,24	5,94	3,31	1,102	0,87	0,39
Calc. mils	0	0	0	0	0	0	0

Plate Radius, in	5,91	Plate Load, lb	8,992
Function RMS, mils	0,2386	Iteration Number	15 (Done)

Buttons: Load FwD File, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output, Delete negative offset sensors, Evaluation Depth, inches: 25.0001, Select Load and Run LEAF, Exit

DATOS DE SALIDA.

BAKFAA - FAA Backcalculation (03/24/04) with LEAF (06/11/03B)

Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness inches	Layer Changeable
1	318.945	0,37	1,00	5,51	<input checked="" type="checkbox"/>
2	834.373	0,40	1,00	4,72	<input checked="" type="checkbox"/>
3	19.490	0,45	1,00	3,94	<input checked="" type="checkbox"/>
4	8.209	0,49	1,00	64,30	<input checked="" type="checkbox"/>
5	158.215	0,49	1,00	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>
6	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
7	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
8	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
9	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
10	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, in	0,00	11,81	23,62	35,43	47,24	59,06	68,50
Defl. mils	10,28	7,24	5,94	3,31	1,10	0,87	0,39
Calc. mils	10,27	7,60	5,26	3,28	1,81	0,81	0,30

Plate Radius, in	5,91	Plate Load, lb	8,992
Function RMS, mils	0,3973	Iteration Number	161 (Done)

Buttons: Load FwD File, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output, Delete negative offset sensors, Evaluation Depth, inches: 25.0001, Select Load and Run LEAF, Exit

- **Metodología de cálculo inverso con el programa BAKFAA usando como punto de partida los datos de campo (metodología AASHTO) alternativa No3 (K2+700).**

DATOS DE ENTRADA.

BAKFAA - FAA Backcalculation (03/24/04) with LEAF (06/11/03B)

Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter [0 to 1.0]	Thickness inches	Layer Changeable
1	214.662	0.35	1.00	5.91	<input checked="" type="checkbox"/>
2	132.764	0.40	1.00	4.33	<input checked="" type="checkbox"/>
3	93.014	0.45	1.00	3.94	<input checked="" type="checkbox"/>
4	65.783	0.49	1.00	64.29	<input checked="" type="checkbox"/>
5	65.783	0.49	1.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
6	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
7	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
8	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
9	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
10	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, in	0.00	11.81	23.62	35.43	47.24	59.06	68.50
Defl, mils	8.70	6.26	4.88	2.64	0.75	0.59	0.20
Calc. mils	9.30	7.21	5.24	3.58	2.25	1.25	0.67

Plate Radius, in	5.91	Plate Load, lb	8.992
Function RMS, mils	1.6168	Iteration Number	10 (Done)

Buttons: Load FWD File, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output, Delete negative offset sensors, Evaluation Depth, inches (25.0001), Select Load and Run LEAF, Exit

DATOS DE SALIDA.

BAKFAA - FAA Backcalculation (03/24/04) with LEAF (06/11/03B)

Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter [0 to 1.0]	Thickness inches	Layer Changeable
1	1.140.091	0.35	1.00	5.91	<input checked="" type="checkbox"/>
2	230.550	0.40	1.00	4.33	<input checked="" type="checkbox"/>
3	17.918	0.45	1.00	3.94	<input checked="" type="checkbox"/>
4	10.553	0.49	1.00	64.29	<input checked="" type="checkbox"/>
5	344.916	0.49	1.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
6	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
7	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
8	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
9	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
10	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, in	0.00	11.81	23.62	35.43	47.24	59.06	68.50
Defl, mils	8.70	6.26	4.88	2.64	0.75	0.59	0.20
Calc. mils	8.62	6.62	4.36	2.57	1.31	0.50	0.09

Plate Radius, in	5.91	Plate Load, lb	8.992
Function RMS, mils	0.3267	Iteration Number	309 (Done)

Buttons: Load FWD File, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output, Delete negative offset sensors, Evaluation Depth, inches (25.0001), Select Load and Run LEAF, Exit

- **Metodología de cálculo inverso con el programa BAKFAA usando como punto de partida el programa ANSYS (metodología de elementos finitos) alternativa No2 (K1+900).**

DATOS DE ENTRADA.

BAKFAA - FAA Backcalculation (03/24/04) with LEAF (06/11/03B)

Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness inches	Layer Changeable
1	112.259	0.35	1.00	5.51	<input checked="" type="checkbox"/>
2	27.758	0.40	1.00	4.72	<input checked="" type="checkbox"/>
3	13.527	0.45	1.00	3.94	<input checked="" type="checkbox"/>
4	4.588	0.49	1.00	64.30	<input checked="" type="checkbox"/>
5	4.500	0.49	1.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
6	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
7	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
8	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
9	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
10	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, in	0,00	11,81	23,62	35,43	47,24	59,06	68,50
Defl, mils	41,45	27,98	16,80	9,82	5,46	2,64	0,96
Calc, mils							

Buttons: Load FWD File, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output

Delete negative offset sensors:

Evaluation Depth, inches: 25.0001

Plate Radius, in: 5.91 | Plate Load, lb: 8.992

Function RMS, mils: 0.2234 | Iteration Number: 157 (Done)

Select Load and Run LEAF, Exit

DATOS DE SALIDA.

BAKFAA - FAA Backcalculation (03/24/04) with LEAF (06/11/03B)

Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness inches	Layer Changeable
1	167.360	0.35	1.00	5.51	<input checked="" type="checkbox"/>
2	8.845	0.40	1.00	4.72	<input checked="" type="checkbox"/>
3	186.159	0.45	1.00	3.94	<input checked="" type="checkbox"/>
4	2.058	0.49	1.00	64.30	<input checked="" type="checkbox"/>
5	68.006	0.49	1.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
6	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
7	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
8	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
9	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
10	0	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, in	0,00	11,81	23,62	35,43	47,24	59,06	68,50
Defl, mils	41,45	27,98	16,80	9,82	5,46	2,64	0,96
Calc, mils	41,46	27,96	16,83	9,87	5,39	2,55	1,08

Buttons: Load FWD File, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output

Delete negative offset sensors:

Evaluation Depth, inches: 25.0001

Plate Radius, in: 5.91 | Plate Load, lb: 8.992

Function RMS, mils: 0.0650 | Iteration Number: 695 (Done)

Select Load and Run LEAF, Exit

- **Metodología de cálculo inverso con el programa BAKFAA usando como punto de partida el programa ANSYS (metodología de elementos finitos) alternativa No3 (K2+700).**

DATOS DE ENTRADA.

BAKFAA - FAA Backcalculation (03/24/04) with LEAF (06/11/03B)

Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness inches	Layer Changeable
1	218.890	0,35	1,00	5,91	<input checked="" type="checkbox"/>
2	18.274	0,40	1,00	4,33	<input checked="" type="checkbox"/>
3	17.379	0,45	1,00	3,94	<input checked="" type="checkbox"/>
4	7.593	0,49	1,00	64,30	<input checked="" type="checkbox"/>
5	7.500	0,49	1,00	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>
6	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
7	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
8	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
9	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
10	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, in	0,00	11,81	23,62	35,43	47,24	59,06	68,50
Defl, mils	36,34	27,29	17,86	10,92	6,22	3,03	1,07
Calc, mils							

Buttons: Load FWD File, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output

Plate Radius, in: 5,91 | Plate Load, lb: 8,992
 Function RMS, mils: 0,0650 | Iteration Number: 695 (Done)

Evaluation Depth, inches: 25,0001

Buttons: Select Load and Run LEAF, Exit

DATOS DE SALIDA.

BAKFAA - FAA Backcalculation (03/24/04) with LEAF (06/11/03B)

Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness inches	Layer Changeable
1	152.650	0,35	1,00	5,91	<input checked="" type="checkbox"/>
2	123.029	0,40	1,00	4,33	<input checked="" type="checkbox"/>
3	404	0,45	1,00	3,94	<input checked="" type="checkbox"/>
4	3.566	0,49	1,00	64,30	<input checked="" type="checkbox"/>
5	39.128	0,49	1,00	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>
6	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
7	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
8	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
9	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
10	0	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, in	0,00	11,81	23,62	35,43	47,24	59,06	68,50
Defl, mils	36,34	27,29	17,86	10,92	6,22	3,03	1,07
Calc, mils	36,29	27,18	18,17	11,00	5,97	2,76	1,19

Buttons: Load FWD File, Load Structure, Save Structure, Backcalculate, Stop Backcalculate, Show Output

Plate Radius, in: 5,91 | Plate Load, lb: 8,992
 Function RMS, mils: 0,1952 | Iteration Number: 197 (Done)

Evaluation Depth, inches: 25,0001

Buttons: Select Load and Run LEAF, Exit

ANEXO C

- Metodología de cálculo inverso con el programa BACKMOD usando como punto de partida los datos de campo (metodología AASHTO) alternativa No2 (K1+900).

DATOS DE ENTRADA.

Programa BACKMOD - IMAE para retroajuste modular

Tipo de auscultación de la deformada: Medición Absoluta (ej. FWD)

Absoluta (FWD) ▼	radio de carga (mm)	150	presión (MPa)	0,283
	inter eje (mm)	0	trocha (mm)	20000
	carga del eje (KN)	80,0	FWD carga aplicada	40,0
			presión	0,566

Datos de la Deformada en carga medida

Distancia (mm)	0	300	600	900	1200	1500	1740		
Deflexión(mm/1000)	261	184	151	84	28	22	10		

Datos de la Estructura

Código tipo de capa	Altura (mm)	Módulo (MPa)	Ecuación Mr			Relación modular	Poisson	Interfaz	Mod max (MPa)
			coef A	coef B	coef C				
A ajustar ▼	140	774					0,37	Adherid ▼	8000
Mr ajust. F1 ▼	120	494	8000,0				0,40	Adherid ▼	8000
Mr ajust. F1 ▼	100	308	8000,0				0,45	Adherid ▼	8000
A ajustar ▼	1000	185					0,49	Adherid ▼	8000
A ajustar ▼		170					0,49	Adherid ▼	8000
▼								▼	
▼								▼	
▼								▼	

5 capas
Desarrollado por Laboratorio Vial IMAE - Oscar H. Giovanon

Ejecutar Backmod

DATOS DE SALIDA.

Resultados del Retroajuste modular Actualizar Resultados

Observaciones al ajuste

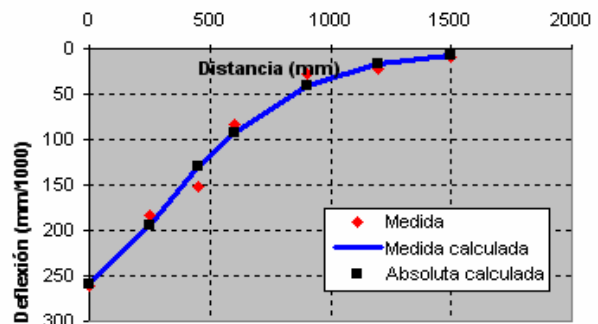
Número de iteraciones 50, Número máximo de iteraciones,

Tipo de medición de la deformada

ABSOLUTA

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)							Radio Curv
	0	300	600	900	1200	1500	1740	
Medida	261	184	151	84	28	22	10	406
Calculada	260	194	130	92	40	16	7	473
Error	1	10	21	8	12	6	3	Eprom. 8,7

Estructura	E (MPa)	h (mm)	Z (mm)
	6952	140	140
	296	60	200
	165	60	260
	37	100	360
	137	1000	1360
	519		



- Metodología de cálculo inverso con el programa BACKMOD usando como punto de partida los datos de campo (metodología AASHTO) alternativa No3 (K2+700).

DATOS DE ENTRADA.

Programa BACKMOD - IMAE para retroajuste modular
 Tipo de auscultación de la deformada: Medición Absoluta (ej. FWD)

Absoluta (FWD) ▼	radio de carga (mm)	150	presión (MPa)	0,283
	inter eje (mm)	0	trocha (mm)	20000
	carga del eje (KN)	80,0	FWD carga aplicada	40,0
			presión	0,566

Datos de la Deformada en carga medida

Distancia (mm)	0	300	600	900	1200	1500	1740		
Deflexión(mm/1000)	221	159	124	67	19	15	5		

Datos de la Estructura

Código tipo de capa	Altura (mm)	Módulo (MPa)	Ecuación Mr			Relación modular	Poisson	Interfaz	Mod max (MPa)
			coef_A	coef_B	coef_C				
A ajustar ▼	150	1509					0,35	Adherid ▼	8000
Mr ajust. F1 ▼	110	933	8000,0				0,40	Adherid ▼	8000
Mr ajust. F1 ▼	100	654	8000,0				0,45	Adherid ▼	8000
A ajustar ▼	1000	463					0,49	Adherid ▼	8000
A ajustar ▼		460					0,49	▼	8000
▼								▼	
▼								▼	
▼								▼	

Desarrollado por Laboratorio Vial IMAE - Oscar H. Giovanon

Ejecutar Backmod

DATOS DE SALIDA.

Resultados del Retroajuste modular [Actualizar Resultados](#)

Observaciones al ajuste

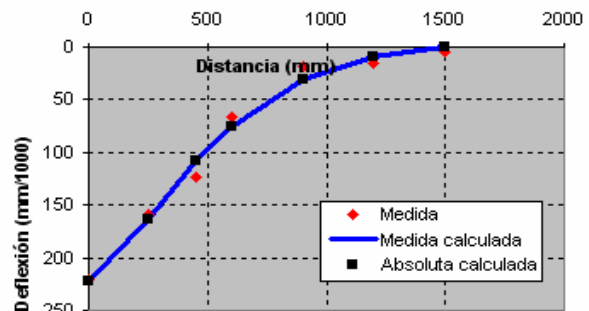
Número de iteraciones 50, Número máximo de iteraciones,

Tipo de medición de la deformada

ABSOLUTA

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)							Radio Curv	
	0	300	600	900	1200	1500	1740	0 (m)	
Medida	221	159	124	67	19	15	5		504
Calculada	222	163	108	75	31	9	0		530
Error	1	4	16	8	12	6	5		Eprom. 7,4

Estructura	E (MPa)	h (mm)	Z (mm)
	6415	150	150
	349	55	205
	211	55	260
	108	100	360
	121	1000	1360
	943		



- **Metodología de cálculo inverso con el programa BACKMOD usando como punto de partida el programa ANSYS (metodología de elementos finitos) alternativa No2 (K1+900).**

DATOS DE ENTRADA.

Programa BACKMOD - IMAE para retroajuste modular

Tipo de auscultación de la deformada: Medición Absoluta (ej. FWD)

Absoluta (FWD) ▼	radio de carga (mm)	150	presión (MPa)	0,283
	inter eje (mm)	0	trocha (mm)	20000
	carga del eje (KN)	80,0	FWD carga aplicada	40,0 presión 0,566

Datos de la Deformada en carga medida

Distancia (mm)	0	300	600	900	1200	1500	1740		
Deflexión(mm/1000)	1053	711	427	249	139	67	24		

Datos de la Estructura

Código tipo de capa	Altura (mm)	Módulo (MPa)	Ecuación Mr			Relación modular	Poisson	Interfaz	Mod max (MPa)
			coef_A	coef_B	coef_C				
A ajustar ▼	140	774					0,37	Adherid ▼	8000
Mr ajust. F1 ▼	120	494	8000,0				0,40	Adherid ▼	8000
Mr ajust. F1 ▼	100	308	8000,0				0,45	Adherid ▼	8000
A ajustar ▼	1000	185					0,49	Adherid ▼	8000
A ajustar ▼		170					0,40	▼	8000
▼								▼	
▼								▼	
▼								▼	

Desarrollado por Laboratorio Visi IMAE - Oscar H. Giovanon

Ejecutar Backmod

DATOS DE SALIDA.

Resultados del Retroajuste modular [Actualizar Resultados](#)

Observaciones al ajuste

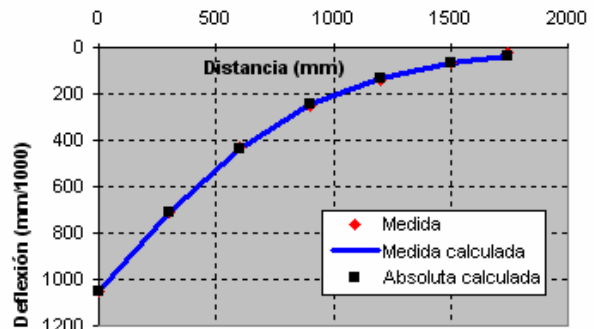
Número de iteraciones 22, Convergencia de módulos,

Tipo de medición de la deformada

ABSOLUTA

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)							Radio Curv	
	0	300	600	900	1200	1500	1740	0 (m)	
Medida	1053	711	427	249	139	67	24		132
Calculada	1052	709	435	246	130	65	34		131
Error	1	2	8	3	9	2	10		Eprom. 5

Estructura	E (MPa)	h (mm)	Z (mm)
	747	140	140
	367	60	200
	144	60	260
	152	100	360
	18	1000	1360
	95		



- Metodología de cálculo inverso con el programa BACKMOD usando como punto de partida el programa ANSYS (metodología de elementos finitos) alternativa No3 (K2+700).

DATOS DE ENTRADA.

Programa BACKMOD - IMAE para retroajuste modular
Tipo de auscultación de la deformada: Medición Absoluta (ej. FWD)

Absoluta (FWD) ▼	radio de carga (mm)	150	presión (MPa)	0,283
	inter eje (mm)	0	trocha (mm)	20000
	carga del eje (KN)	80,0	FWD carga aplicada	40,0
			presión	0,566

Datos de la Deformada en carga medida

Distancia (mm)	0	300	600	900	1200	1500	1740		
Deflexión(mm/1000)	923	693	454	277	158	77	27		

Datos de la Estructura

Código tipo de capa	Altura (mm)	Módulo (MPa)	Ecuación Mr			Relación modular	Poisson	Interfaz	Mod max (MPa)
			coef_A	coef_B	coef_C				
A ajustar ▼	150	1509					0,35	Adheric ▼	8000
Mr ajust. F1 ▼	110	933	8000,0				0,40	Adheric ▼	8000
Mr ajust. F1 ▼	100	654	8000,0				0,45	Adheric ▼	8000
A ajustar ▼	1000	463					0,49	Adheric ▼	8000
A ajustar ▼		460					0,49	Adheric ▼	8000
▼								▼	
▼								▼	
▼								▼	

Desarrollado por Laboratorio Vial IMAE - Oscar H. Giovanon

Ejecutar Backmod

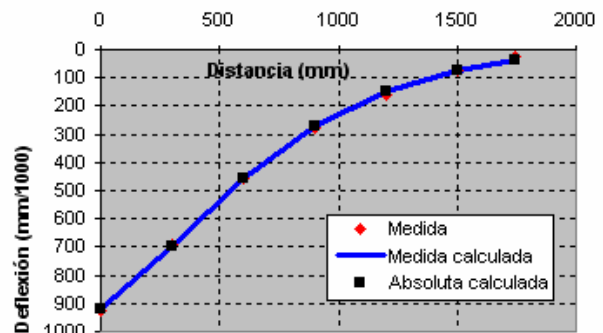
DATOS DE SALIDA.

Resultados del Retroajuste modular **Actualizar Resultados**

Observaciones al ajuste **Número de iteraciones 5, Convergencia de módulos,**
 Tipo de medición de la deformada **ABSOLUTA**

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)							Radio Curv (m)
	0	300	600	900	1200	1500	1740	
Medida	923	693	454	277	158	77	27	196
Calculada	921	697	457	274	150	75	37	201
Error	2	4	3	3	8	2	10	Eprom. 4,6

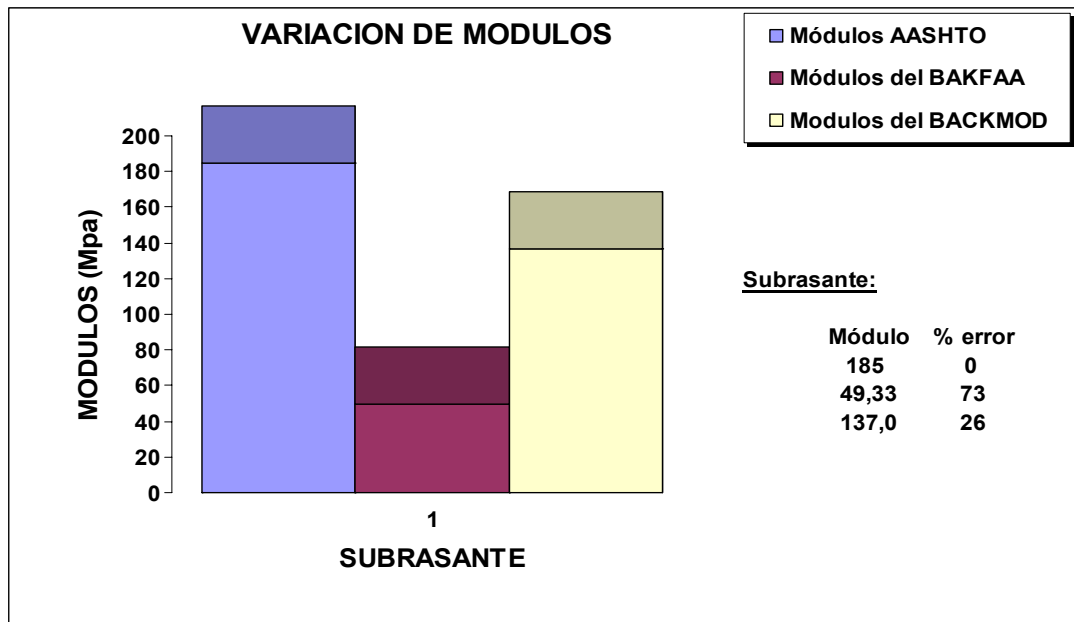
Estructura	E (MPa)	h (mm)	Z (mm)
	1947	150	150
	200	55	205
	121	55	260
	152	100	360
	14	1000	1360
	100		



ANEXO D

Comparación y verificación de las metodologías a partir de los datos de campo.

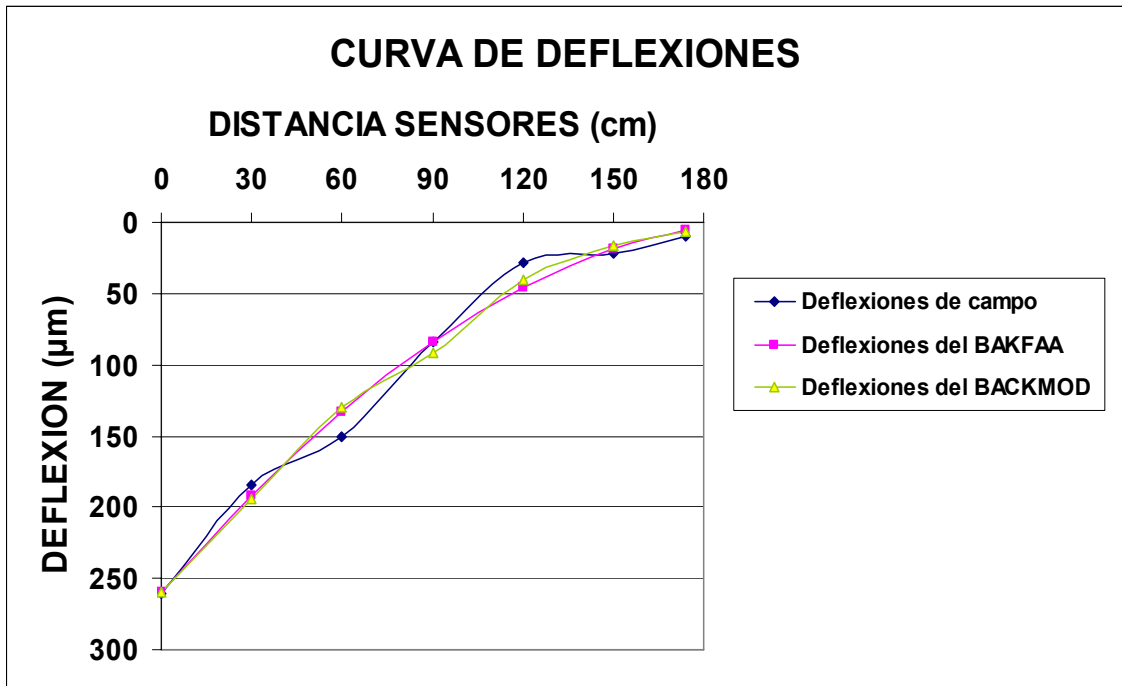
- Gráfico comparativo de módulos en la subrasante para la alternativa N° 2 (K1+900).



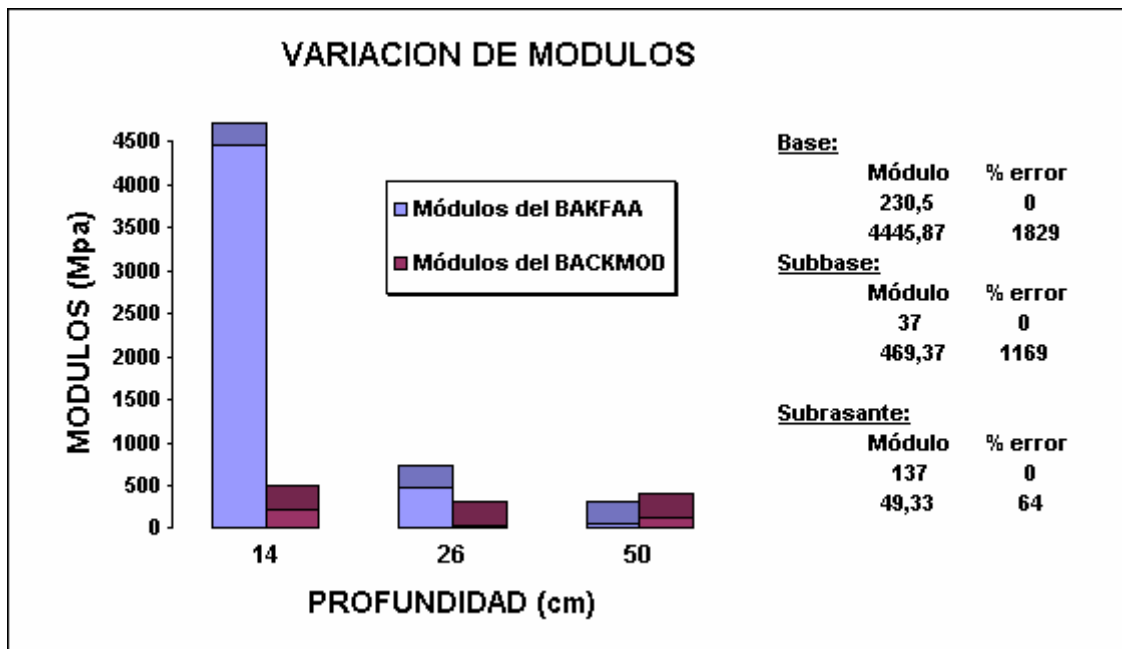
A partir de la información suministrada en el gráfico anterior, se concluye lo siguiente:

- Aunque aún los valores se encuentran alejados, la diferencia de valor en el módulo hallado mediante el procedimiento de la AASHTO y el módulo arrojado por el programa BACKMOD, es muy pequeño comparado con el porcentaje de error de la alternativa N° 1.
- El módulo presentado por el programa BAKFAA, aún presenta desviaciones de error muy grandes con respecto al valor de la AASHTO.

- Gráfico comparativo de deflexiones para la alternativa N° 2 (K1+900).

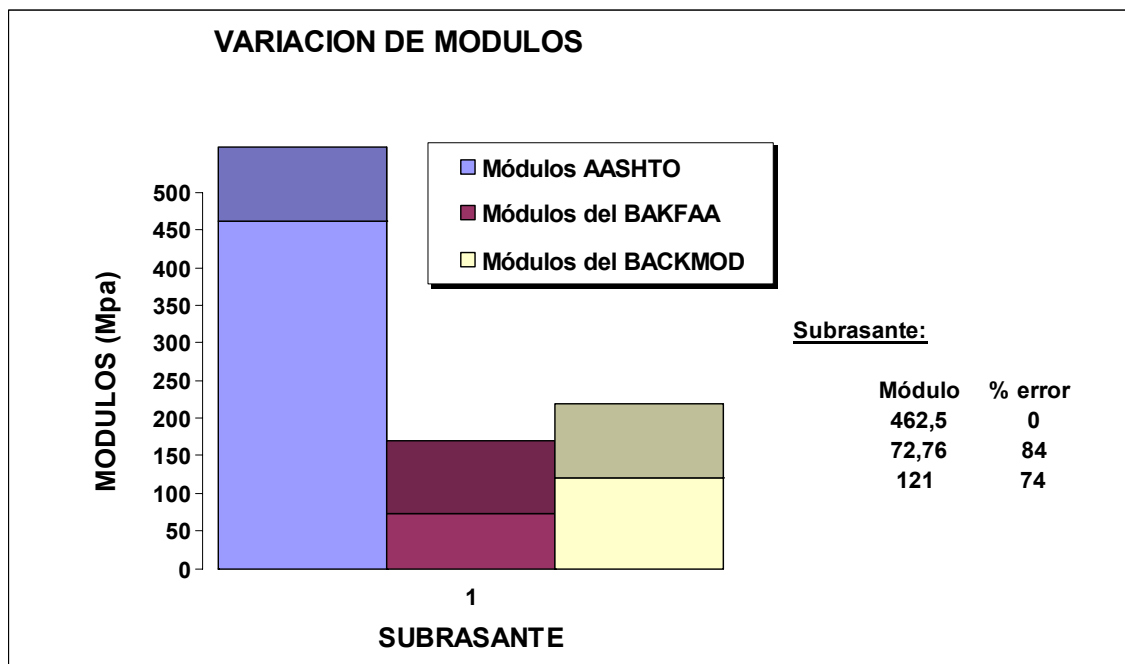


- Gráfico comparativo de módulos entre el BAKFAA y el BACKMOD para la alternativa N° 2 (K1+900).



Verificando la anterior información, se puede concluir que:

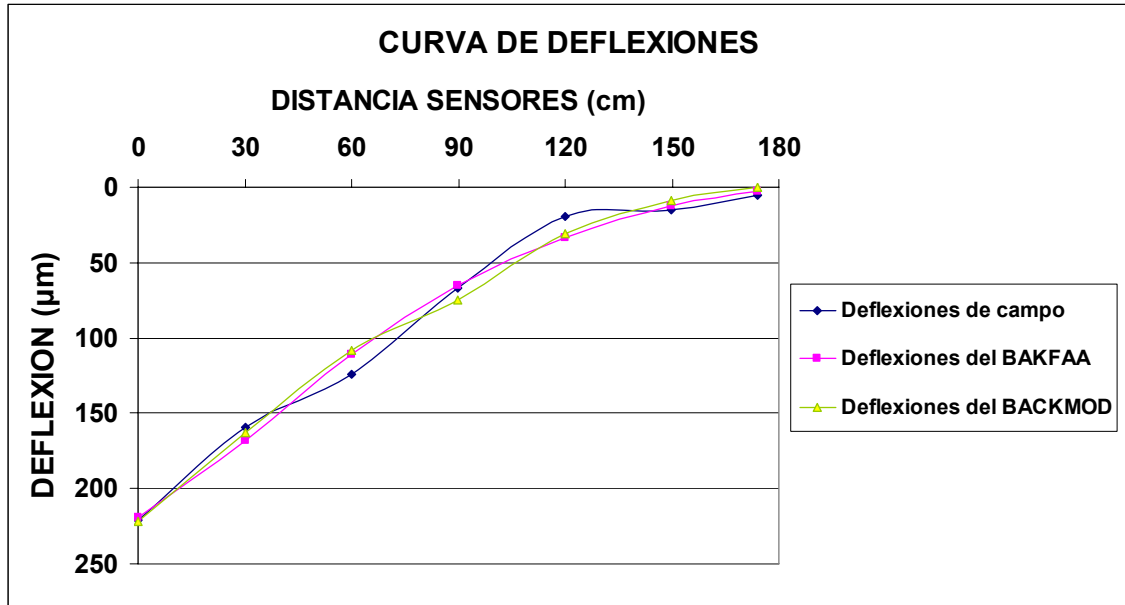
- El valor del módulo para la base granular en esta alternativa y mediante el programa BAKFAA, resulto más alto de lo esperado y comparándolo con la alternativa N° 1, la cual es una estructura más débil verificándose en su capa de subrasante. Este valor puede ser un indicador del mal comportamiento que ofrece el programa BAKFAA.
- Al contrario de lo sucedido con la alternativa N° 1, los porcentajes de error para esta alternativa están siendo más altos.
- Los módulos de la subbase granular y de la subrasante para ambos software, están resultando bajos, lo cual no es suficiente para decir cual de los dos programas es más eficiente. Sus valores aún no son tan equivalentes para concluir cual de los dos trabaja mejor.
- Gráfico comparativo de módulos en la subrasante para la alternativa N° 3 (K2+700).



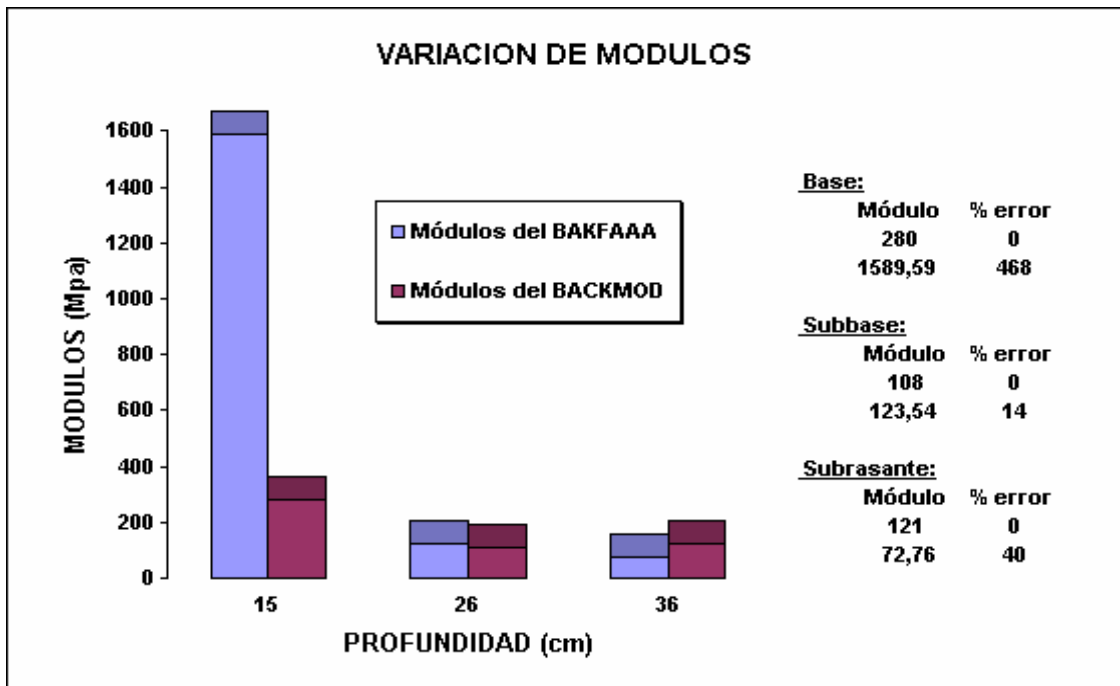
Con este gráfico se puede deducir lo siguiente:

- La cercanía de los módulos no es lo suficiente como para afirmar que los módulos arrojados por uno de los dos software son lo suficientemente acertados para tomarlos como válidos, debido a la discrepancia que existe entre estas metodologías.

- No se puede afirmar con certeza, cual de las dos herramientas computacionales es la más acertada para ser utilizada como una ayuda alternativa.
- Gráfico comparativo de deflexiones para la alternativa N° 3 (K2+700).



- Gráfico comparativo de módulos entre el BAKFAA y el BACKMOD para la alternativa N° 3 (K2+700).



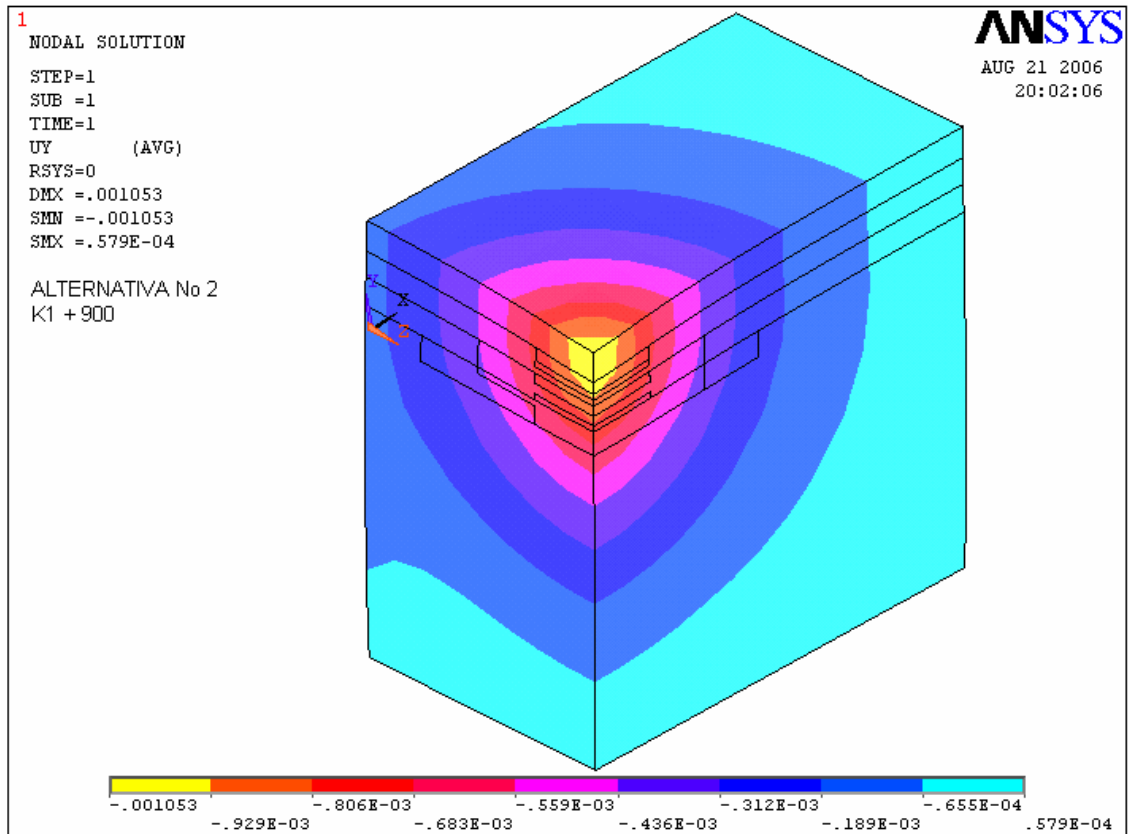
Con respecto a los dos gráficos anteriores se puede afirmar que:

- La homogeneidad en las tres alternativas con respecto a las deflexiones, no se ve cumplida en ninguna de las tres alternativas. Los dos programas utilizados, son los que mejor acomodan sus deflexiones.
- La diversidad en el módulo, se ve mucho más reflejada en las tres alternativas en la base. Por lo general los módulos que se tratan de ajustar lo más posible, son los que se ven en la subbase y en la subrasante.
- En cada una de las alternativas se pudo observar que la variación de módulos en los programas es un indicador suficiente como para buscar nuevas metodologías de comprobación.

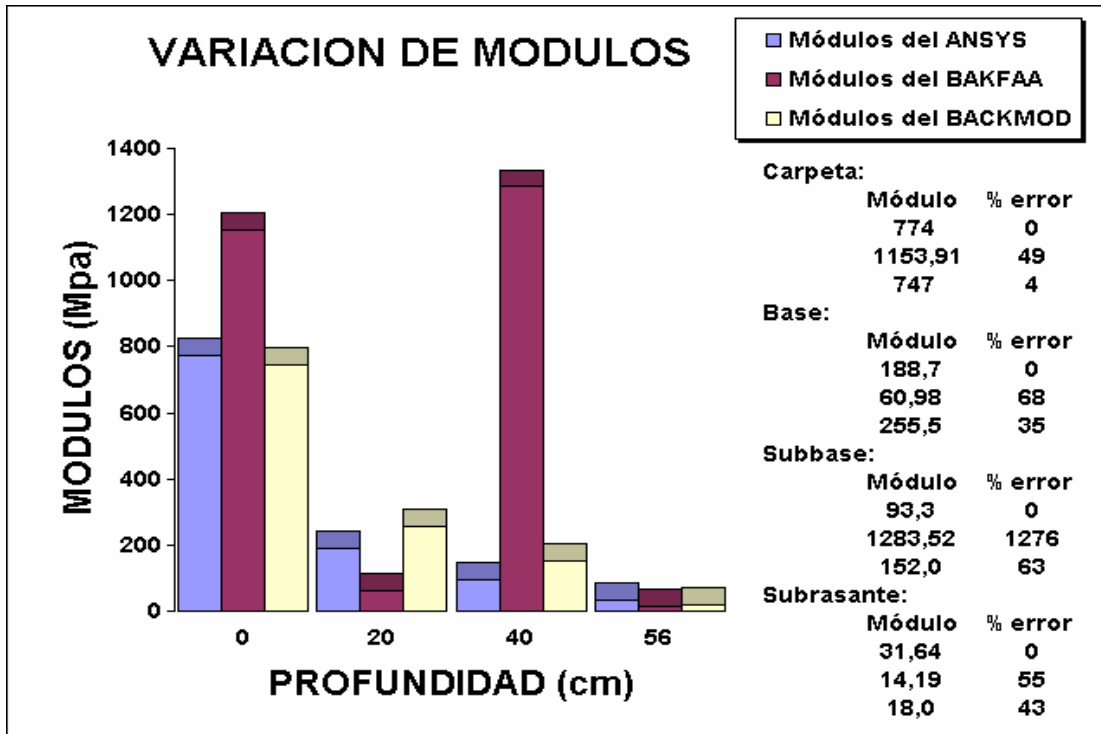
ANEXO E

Comparación y verificación de las metodologías a partir del programa ANSYS.

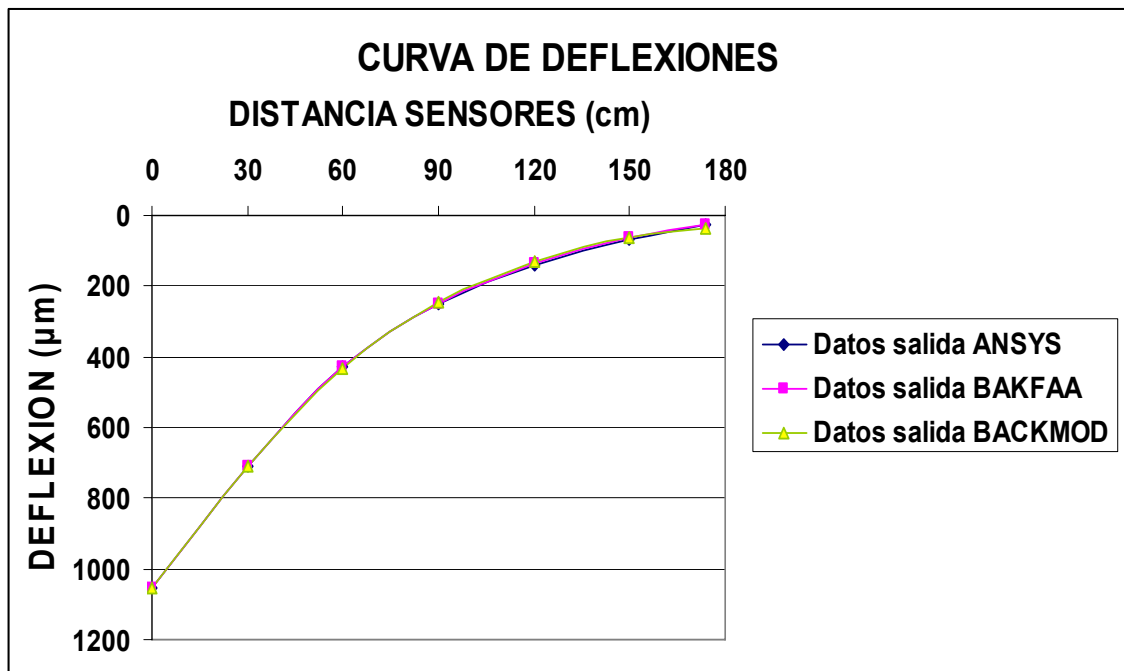
- Datos de salida y cuadro comparativo de las deflexiones y módulos para la alternativa No 2 (K1+900) con el programa ANSYS.



- Gráfico comparativo de módulos y porcentajes de error para la alternativa N° 2 (K1+900).

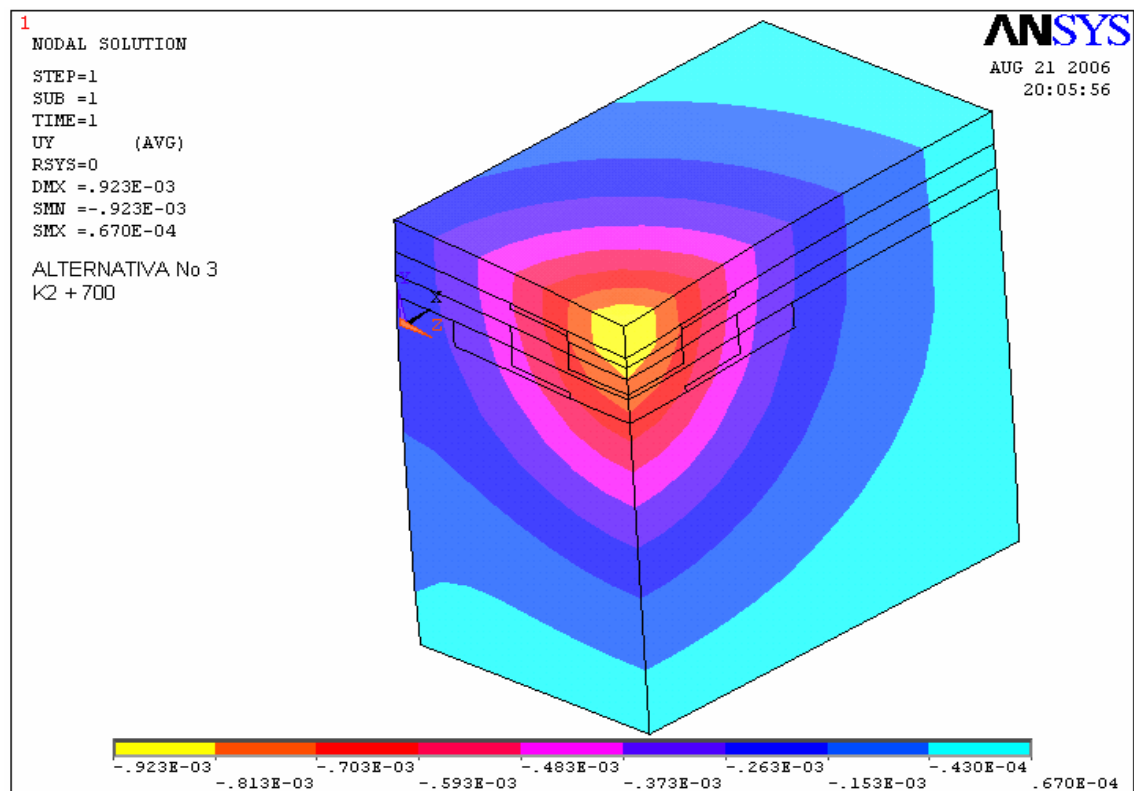


- Comparación curva de deflexiones para la alternativa N° 2 (K1+900).

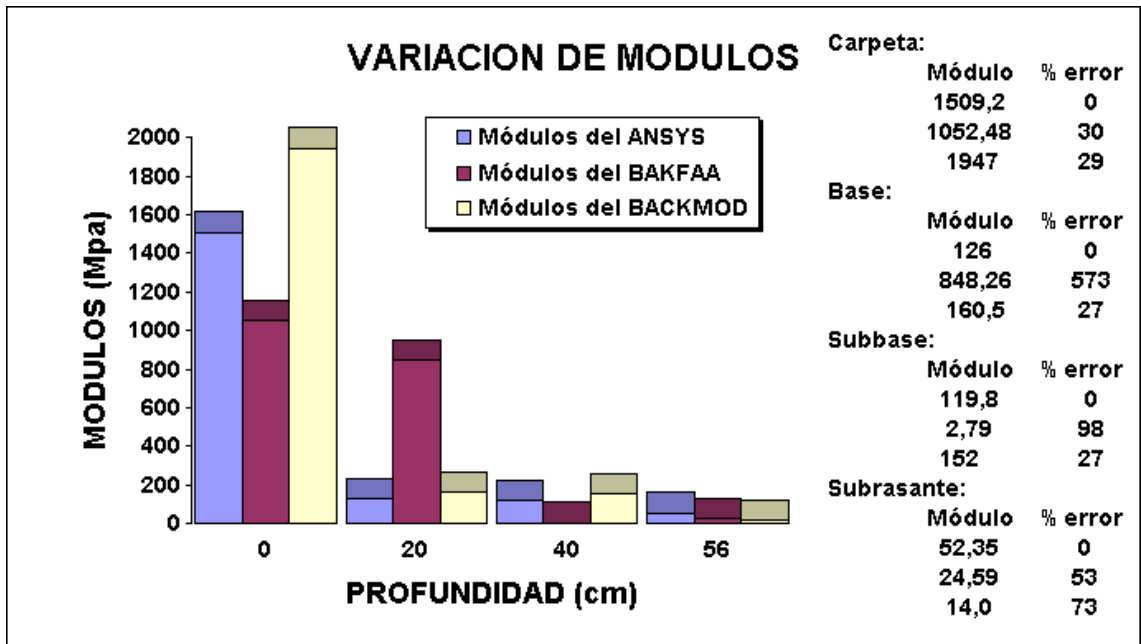


Con respecto a los resultados representados en las graficas anteriores se concluyo:

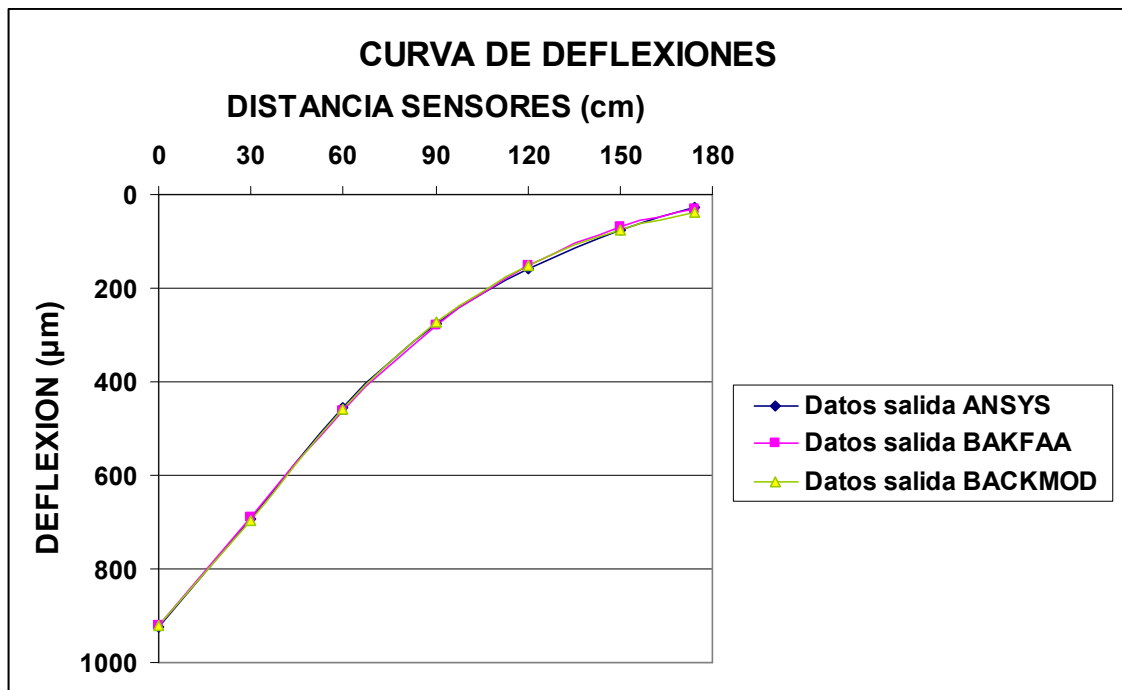
- En todas las capas se presentaron módulos semejantes a los incluidos en el programa ANSYS con respecto al programa BACKMOD, con lo cual se está accediendo a una herramienta adicional en lo que tiene que ver al diseño de un pavimento.
- Los resultados arrojados por el programa BAKFAA se encuentran en un porcentaje de error muy alto con lo cual se demuestra que este programa no converge a las soluciones esperadas.
- Con respecto a las deflexiones, los datos arrojados por las tres herramientas computacionales, tienden a tener una misma ecuación, con lo cual se podría pensar que las deflexiones arrojadas por el ANSYS tendrían una mejor linealidad comparándolas con las obtenidas mediante el FWD.
- Datos de salida y cuadro comparativo de las deflexiones y módulos para la alternativa No 3 (K2+700) con el programa ANSYS.



- Gráfico comparativo de módulos y porcentajes de error para la alternativa N° 3 (K2+700).



- Comparación curva de deflexiones para la alternativa N° 3 (K2+700).



En base a la información anterior se analizó lo siguiente:

- Los resultados más exactos y con menor porcentaje de error, siempre estuvieron arrojados por el programa BACKMOD, con lo que queda constatado que esta herramienta, es la que ofrece mejores ventajas a la hora de tener como opción de diseño, con lo cual se podría estar afirmando la utilización de una ecuación constitutiva a la hora de diseñar un pavimento.
- En cuanto a las deflexiones obtenidas, los resultados más favorables se vieron siempre en la segunda parte de este estudio.
- Los valores de módulo arrojados por el BAKFAA, en su mayoría de veces resultaron muy elevados, con lo cual se descarta esta herramienta como ayuda complementaría a la hora de hacerse estudios.