

**EFFECTOS DEL TIPO DE SUBRASANTE EN EL MODELAMIENTO
INVERSO DE PAVIMENTOS**

**LUIS FREDY OROZCO FIGUEREDO
OSCAR JAVIER VILLAMARIN VERDUGO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2007**

**EFFECTOS DEL TIPO DE SUBRASANTE EN EL MODELAMIENTO
INVERSO DE PAVIMENTOS**

**LUIS FREDY OROZCO FIGUEREDO
OSCAR JAVIER VILLAMARIN VERDUGO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el titulo de
ingeniero civil**

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

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2007**

AGRADECIMIENTOS

Al Director del Proyecto, **Eduardo Castañeda**, por su invaluable conocimiento, acertadas orientaciones y por su constante motivación y dedicación al desarrollo del proyecto.

A nuestras familias por apoyarnos incondicionalmente en los momentos difíciles, por su paciencia, confianza y apoyo incondicional.

A nuestros amigos, porque con su valiosa amistad estuvieron incondicionalmente apoyándonos.

A la Universidad Industrial de Santander, por habernos permitido crecer de manera integral a nivel personal y profesional.

DEDICATORIA

A mi padre por su apoyo incondicional y por enseñarme los valores fundamentales para ser la persona que soy.

A Patricia por su apoyo, paciencia y motivación para seguir siempre adelante y no detenerme ante ningún obstáculo.

A mi hijo que con su amor y alegría me proporciono la fuerza para continuar sin mirar atrás.

A mis hermanos por su apoyo y compañía durante este proceso.

A mis amigos por sus consejos y voz de aliento.

A todas las personas que con su apoyo y compañía hicieron posible la terminación de este proceso en mi vida.

Luis Fredy Orozco Figueredo

DEDICATORIA

*A mis padres quienes son el motivo principal de este éxito
A mis hermanos quienes con su "apoyo" colaboraron en
el triunfo de esta empresa.*

*A todos los amigos de Barney por los mejores tiempos que
He pasado en esta universidad.*

*Finalmente a Silvio Antonio Verdugo, mi abuelo
2. E. P. D.*

Oscar Javier Villamarin Verdugo

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	1
1.MARCO TEORICO.....	2
1.1. CONCEPTOS GENERALES	2
1.1.1. Teoría general de modelamiento inverso.....	2
1.1.2. Diseño mecanicista de pavimento.	2
1.1.3. Deflexiones en el pavimento.....	4
1.1.4. Cálculo inverso o retrocálculo de pavimentos. e.	5
1.1.5. Equipos.....	6
1.1.6. Análisis de variables estructurales.....	8
2.APLICACION DE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS.....	13
3.METODOLOGIA DE ESTUDIO	20
3.1. DETERMINACION DE MODULO RESILIENTE (MR) DE LAS CAPAS	20
3.1.1 Materiales Cohesivos:.....	21
3.1.2 Materiales Granulares:.....	21
3.2. APLICACIÓN DE MODULOS PARA MODELAMIENTO INVERSO.....	21
4.EVALUACION DE RESULTADOS	30
4.1. MODELO CON SUBRASANTE DE ARCILLA.....	30
4.2. MODELO CON SUBRASANTE DE LIMO.....	36
5.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	41
BIBLIOGRAFIA	42

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. EJEMPLO PROGRAMA EVERSTRESS	43
ANEXO B. MODELO ARCILLA CON ESPESOR DE SUBRASANTE DE 60CM.....	47
ANEXO C. DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO CON SUBRASANTE LIMO Y ESPESOR DE SUBRASANTE 60 CM	53
ANEXO D. DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO CON SUBRASANTE LIMO Y ESPESOR DE SUBRASANTE 5 CM.....	59

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Calculo Directo.....	4
FIGURA 2. Calculo Inverso	5
FIGURA 3. Cuenca de Deflexiones	6
FIGURA 4. Esquema de FWD.....	7
FIGURA 5. Menú de utilidades.	15
FIGURA 6. Menú de entrada.	15
FIGURA 7. Barra de herramientas.....	15
FIGURA 8. Menú principal.....	15
FIGURA 9. Ventana de preferencias.	17
FIGURA 10. Ventana ingreso de las propiedades de los materiales.....	18
FIGURA 11. Estructura de pavimento con subrasante arcillosa.	22
FIGURA 12. Modelamiento ANSYS con varios módulos por capa, subrasante arcillosa	23
FIGURA 13. Enmallado ANSYS	23
FIGURA 14. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS para modelo con varios módulos por capa, subrasante arcilla	25
FIGURA 15. Estructura de pavimento con subrasante Limo	26
FIGURA 16. Modelamiento ANSYS con varios módulos por capa, subrasante Limo..	27
FIGURA 17. Enmallado ANSYS	27
FIGURA 18. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS para modelo con varios módulos por capa, subrasante limo.	29
FIGURA 19. Modelo de varios módulos por capa.	30
FIGURA 20. Distribución de módulos por capa.....	31
FIGURA 21. Distribución de módulo único por capa.	31
FIGURA 22. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa y un modelo con módulo único por capa.	32
FIGURA 23. Comparación entre un modelo con único módulo por capa dividido cada 30 cm. y un modelo con único módulo por capa sin divisiones.....	33
FIGURA 24. Comparación deflexiones entre el modelo con único módulo por capa dividido cada 30 cm. y un modelo con único módulo por capa sin divisiones.	34
FIGURA 25. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto por varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.....	35
FIGURA 26. Comparación ajuste de deflexiones del diseño en EVERSTRESS contra el modelo de varios módulos por capa.....	36
FIGURA 27. Distribución de módulos por capa.....	36
FIGURA 28. Distribución de módulo único por capa	37
FIGURA 29. Comparación deflexiones entre el modelo compuesto por varios módulos por capa y un modelo con módulo único por capa.	38
FIGURA 30. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.....	39
FIGURA 31. Entorno principal del programa EVERSTRESS	43
FIGURA 32. Menú de inicio.....	43

FIGURA 33. Opción file.	44
FIGURA 34. Ventana de entrada de datos de la estructura.....	44
FIGURA 35. Ventana de entrada de datos de cargas y puntos de evaluación.....	45
FIGURA 36. Hoja tipo de resultados del software EVERSTRESS.....	46
FIGURA 37. Modelo compuesto de varios módulos por capa, con subrasante de 60cm de espesor.....	47
FIGURA 38. Enmallado modelo compuesto de varios módulos por capa, con subrasante de 60cm de espesor.....	48
FIGURA 39. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS modelo compuesto de varios módulos por capa.	48
FIGURA 40. Modelo con único módulo por capa, subrasante de arcilla con espesor de 60cm.....	49
FIGURA 41. Enmallado modelo con único módulo por capa, subrasante de arcilla con espesor de 60cm.....	49
FIGURA 42. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS modelo con único módulo por capa.	50
FIGURA 43. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa.....	51
FIGURA 44. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS con espesor de 60cm.....	52
FIGURA 45. Modelo compuesto de varios módulos por capa, con subrasante de limo y 60cm de espesor.....	53
FIGURA 46. Enmallado modelo compuesto de varios módulos por capa, con subrasante de limo y 60cm de espesor.....	53
FIGURA 47. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS, modelo compuesto de varios módulos por capa, con subrasante de limo y espesor de 60cm.....	54
FIGURA 48. Modelo con único módulo por capa, con subrasante de limo y 60cm de espesor.....	55
FIGURA 49. Enmallado modelo con único módulo por capa, con subrasante de limo y 60cm de espesor.....	55
FIGURA 50. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS modelo con único modulo por capa, con subrasante de limo y espesor de 60cm.....	56
FIGURA 51. Comparación modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa, con subrasante de limo y espesor 60cm.	57
FIGURA 52. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.....	58
FIGURA 53. Modelo compuesto de varios módulos por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.	59
FIGURA 54. Distribución de módulos por capa.....	60
FIGURA 55. Enmallado modelo compuesto de varios módulos por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.	61

FIGURA 56. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS modelo compuesto de varios módulos por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.	61
FIGURA 57. Modelo con único módulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.	62
FIGURA 58. Enmallado modelo con único módulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.	63
FIGURA 59. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS modelo con único módulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.....	63
FIGURA 60. Comparación modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa, con subrasante de limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.....	64
FIGURA 61. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de niveles de procesamiento entorno ANSYS.	14
Tabla 2. Características del suelo de subrasante.....	20
Tabla 3. Diseño de la estructura de pavimento modelo subrasante arcillosa.....	22
Tabla 4. Módulos obtenidos por SHELL 78 y BARBER.....	24
Tabla 5. Valores de módulos insertados a ANSYS modelo compuesto de varios módulos por capa.....	24
Tabla 6. Diseño de la estructura de pavimento modelo subrasante limo	26
Tabla 7. Módulos obtenidos por SHELL 78 y BARBER.....	28
Tabla 8. Módulos insertados a ANSYS, modelo compuesto de varios módulos por capa y subrasante Limo.	28
Tabla 9. Deflexiones obtenidas por ANSYS.....	32
Tabla 10. Resultados deflexiones modelo con único módulo por capa dividido cada 30 cm. y un modelo con único módulo por capa sin divisiones.	33
Tabla 11. Resultado deflexiones entre el modelo compuesto por varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.....	34
Tabla 12. Ajuste de deflexiones del diseño en EVERSTRESS contra modelo compuesto por varios módulos por capa.	35
Tabla 13. Deflexiones obtenidas por el programa ANSYS	37
Tabla 14. Resultado deflexiones entre el modelo compuesto por varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.....	39
Tabla 15. Espesores de las capas de Estructura de pavimento ensayada.	47
Tabla 16. Comparación de deflexiones modelo compuesto por varios módulos por capa contra modelo con único módulo por capa.	50
Tabla 17. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS con espesor de 60cm.....	51
Tabla 18. Comparación modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa, con subrasante de limo y espesor 60cm.....	56
Tabla 19. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.....	57
Tabla 20. Espesores de la estructura de pavimento ensayada.....	59
Tabla 21. Valores de módulos insertados a ANSYS modelo compuesto de varios módulos por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.	60
Tabla 22. Caracterización modelo con único módulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.	62
Tabla 23. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa y un modelo con único módulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.	64
Tabla 24. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.	65

RESUMEN

TITULO:

EFFECTOS DEL TIPO DE SUBRASANTE EN EL MODELAMIENTO INVERSO DE PAVIMENTOS*

AUTORES:

OROZCO FIGUEREDO, Luis Fredy
VILLAMARIN VERDUGO, Oscar Javier**

PALABRAS CLAVES:

Herramientas computacionales, Retrocálculo (calculo inverso), Módulos resilientes, suelo de subrasante, Elementos finitos.

DESCRIPCION:

El desarrollo tecnológico en la ingeniería ha permitido mejorar e innovar los recursos de investigación que se tienen a disposición. La ingeniería civil y en especial su área de pavimentos no han sido ajenas a este avance; estas nuevas metodologías permiten el análisis de estructuras de pavimento a través de ensayos no destructivos, los cuales junto con determinados dispositivos y herramientas computacionales permiten al investigador realizar un modelo de la estructura que describe de forma mas precisa el comportamiento del pavimento.

La presente investigación sigue una metodología de cálculo inverso que implementa una herramienta computacional para determinar el valor de los módulos de las diferentes capas de una estructura de pavimento flexible cuando cambia el suelo de subrasante. Teniendo en cuenta las deflexiones, los espesores de cada capa, la carga aplicada y con la ayuda del programa ANSYS se encontrara los módulos de la base, subbase y la subrasante en cada punto de análisis.

Fundamentalmente la investigación esta basada en dos principios; el primero es la caracterización de dos tipos de suelo de subrasante: un suelo cohesivo (Arcilla) y un suelo friccionante (Limo) sobre los cuales están cimentadas las capas que componen el pavimento. El segundo es el Deflectómetro de Impacto (FWD) que se apoya en la teoría racional de pavimentos. La información es recopilada y almacenada para luego mediante un análisis de elementos finitos modelar el comportamiento real de una estructura de pavimento en servicio

* Tesis de grado

** Facultad de ingenierías físico mecánicas. Ingeniería civil. ING. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON.

ABSTRACT

TITLE:

EFFECTS OF THE TYPE SUBGRADE IN THE INVERSE MODELING OF PAVEMENTS*

AUTHORS:

OROZCO FIGUEREDO, Luis Fredy
VILLAMARIN VERDUGO, Oscar Javier**

KEYWORDS:

Computational tools, Back-calculation (Inverse modeling), Resident modules, Subgrade soil, Finite elements.

DESCRIPTION:

Technological development in engineering has helped improve and innovate investigative resources that are available. The civil engineering and especially the pavements have not been outside this breakthrough; these new methodologies allow analysis of pavement structures through non-destructive testing, which together with certain devices and computational tools allow the investigator to conduct a model the structure that describes more precise.

A Back-calculation methodology that a computational tool to determine the value of the modules of the different capes of a structure of flexible pavement when the subgrade changes harnesses the present investigation. Taking the deflections basin, the thicknesses of every cape, the applied load and with the help of the program ANSYS find themselves the base modules, subbase and subgrade in each point of analysis.

Fundamentally investigation this based in two principles; The first is the characterization of two types of subgrade: A cohesive soil (Clay) and a subgrade frictionant (Silt) on which the capes that fix the pavement are established. The second in falling weight deflectometer (FWD) that abuts up against the rational theory of pavements. The information is compiled and stored stop next intervening an analysis of finite elements to model the real behavior of a structure of pavement at call.

* DEGREE Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical engineering. Civil Engineering. ENGINEER
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON

INTRODUCCION

La historia y desarrollo de los pavimentos se asocian con la evolución y necesidad de los países. Las vías de comunicación condicionan el progreso de una nación en la medida en que facilitan la comercialización de su producción agrícola e industrial y permiten el desarrollo de sistemas de transporte rápido y eficaz. Por eso, el estado invierte cuantiosas sumas de dinero al diseño, construcción y/o rehabilitación de las mismas. La investigación e innovación en nuevos materiales y equipos, técnicas de construcción y metodologías de diseño es otra de las formas con las cuales se puede contribuir a este progreso.

En el diseño de pavimentos es viable suponer soluciones a partir de las que, mediante un proceso de ajustes sucesivos, puede lograrse una condición favorable en la estructura del pavimento que garantice unas condiciones de equilibrio durante determinado período de tiempo. Este procedimiento para el dimensionamiento de las estructuras de pavimento se conoce como "métodos analíticos o racionales"; ellos se fundamentan en el análisis del estado de esfuerzos y deformaciones que les inducen diferentes sollicitaciones como tránsito, clima y características de los materiales de cada una de las capas y del suelo de fundación o subrasante.

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, es necesario estudiar los módulos de las capas de la estructura de pavimento mediante ensayos no destructivos. Para lograrlo es fundamental estudiar el cálculo inverso de los módulos de las capas de la estructura del pavimento a partir de las deflexiones medidas.

Teniendo en cuenta lo anterior, y asumiendo que la mejor técnica de cálculo inverso para determinar el módulo de las capas de una estructura de pavimento flexible, a partir de deflexiones tomadas en campo es la metodología de elementos finitos evidenciada en el programa ANSYS, el objetivo del presente estudio es analizar su influencia en diferentes tipos de suelo de subrasante y caracterizar el comportamiento de los mismos.

La metodología de estudio se vera reflejada en el avance en la investigación, observando sus alcances a medida que se obtengan los resultados mas apropiados. Como se podrá ver, inicialmente se efectuaran los pasos recomendados para este tipo de investigación, en una primera etapa se establecerá los objetivos, justificación, alcance, marco teórico y metodología. En una segunda etapa se analizara cada tipo de suelo en el programa ANSYS para luego recolectar información detallada y obtener conclusiones para cada caso en particular.

1. MARCO TEORICO

Inicialmente se tomaran en cuenta ciertos conceptos generales relacionados con las características básicas del método racional de pavimentos debido a que estos fundamentan la presente investigación, además de dar al lector una introducción al concepto de modelación inversa de una estructura. Para finalmente describir, en forma general temas en los cuales se basa esta investigación como la medida de las deflexiones por medio del deflectómetro de impacto (FWD) y métodos según los cuales se pueden obtener los módulos de las capas de pavimento.

1.1. CONCEPTOS GENERALES

1.1.1. Teoría general de modelamiento inverso. Los problemas inversos son clasificados como problemas mal puestos (ill-posed) según Hadamard, quien a comienzos del siglo XX enunció sus tres principios que determinaban cuando un problema estaba bien puesto y ellos eran: Existencia, Unicidad, Dependencia continua de los datos. Así que los problemas inversos son mal puestos ya que algunos datos de su ecuación son desconocidos como por ejemplo algunos parámetros o la geometría del dominio.

Los problemas inversos son una clase de problemas en los cuales se intenta determinar propiedades internas de un material por medio de mediciones a lo largo de su frontera o parte de ella que es accesible, sin tener que utilizar medios invasivos para este estudio. Posee grandes aplicaciones en áreas tales como la geofísica, medicina y otras.

1.1.2. Diseño mecanicista de pavimento. El método de diseño mecanicista de pavimentos, tiene las siguientes características¹:

- 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 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.

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

- 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.
- Permite la utilización de los materiales disponibles dentro de los parámetros generales de diseño establecidos.
- 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.

✓ **Fundamentos del diseño mecanicista de pavimentos**

El diseño mecanicista de pavimentos se fundamenta en cinco aspectos principales²:

- 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.
- 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
- Las características geotécnicas de la subrasante, que son un conjunto de parámetros que describen las propiedades de la subrasante.
- 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.

✓ **Calculo directo.**

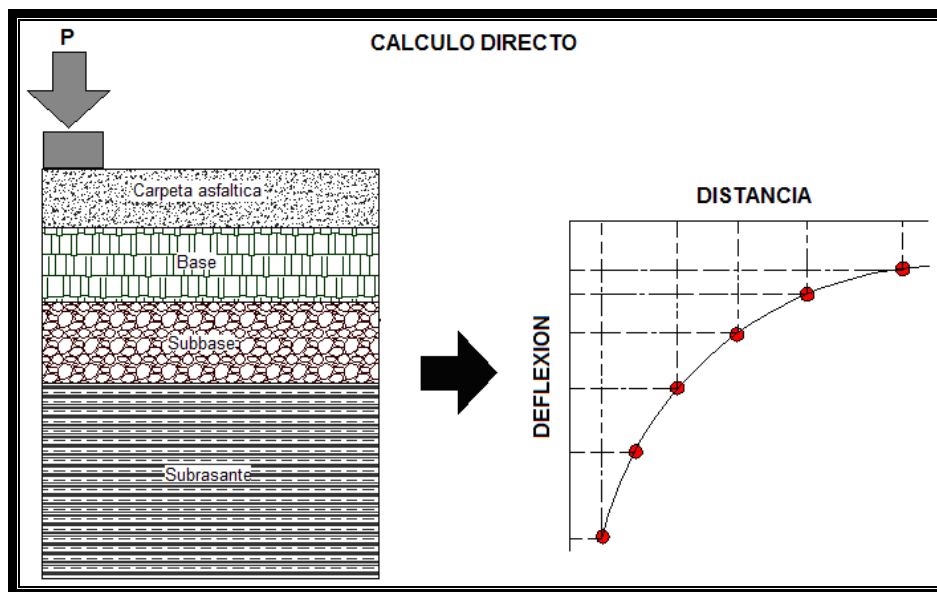
En el cálculo de las solicitaciones en el pavimento inducidas por la carga de diseño, es común suponer que el suelo de subrasante se comporta como un medio elástico definido tanto por el Modulo Resiliente (Mr) como por la relación de Poisson. Teniendo en cuenta lo anterior y en contribución a la presente investigación es posible señalar que junto con las características geotécnicas y mecánicas de la subrasante y de los materiales que componen las diferentes capas de pavimento como son: Modulo Elástico y relación de Poisson y, en base a medidas tomadas por el deflectómetro de impacto es posible realizar cálculos inversos siempre que se mida toda la cuenca de deflexiones.

En general, en 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

² Ibid., p. 35

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. Cálculo Directo



1.1.3. Deflexiones en el pavimento. Un pavimento es una estructura que está conformada 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 vertical hacia abajo de la superficie de la estructura del pavimento producido por la aplicación de 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

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

capas. Existiendo una correspondencia entre los valores de los módulos y los valores de la deflexión.

1.1.4. Cálculo inverso o retrocálculo de pavimentos. El retrocálculo es la traducción local de "backcalculation", y "cálculo inverso" es quizás el término que mejor lo describe.

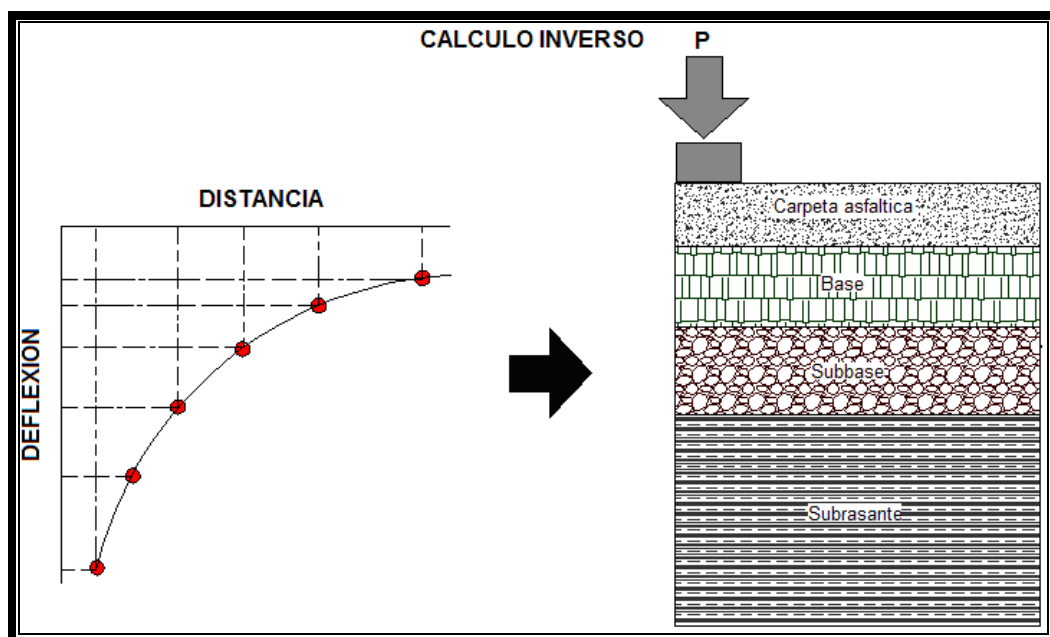
Conociendo el espesor de las diferentes capas que componen la estructura de pavimento, la carga aplicada y la curva de deformación producida en el pavimento (en este caso las deflexiones medidas con el deflectómetro de impacto), el objetivo es determinar y analizar los diferentes parámetros estructurales (módulos) que caracterizan el pavimento.

Para analizar la integridad estructural del pavimento existente, es posible utilizar un método sencillo y funcional; el cual consiste en aplicar una carga al mismo y medir la curva de deformación producida (deflexiones) para luego determinar a partir de la misma los parámetros estructurales actuales (módulos) del pavimento.

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 calculadas y medidas 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 siguiente esquema puede ilustrar de manera adecuada el procedimiento descrito anteriormente:

FIGURA 2. Cálculo Inverso



A continuación se ilustra de forma general, el procedimiento para el diseño de una estructura nueva de pavimento (Cálculo Directo), comparado 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”).

CALCULO DIRECTO

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

CÁLCULO INVERSO O RETROCALCULO

$$Resultados(\delta, \sigma, \varepsilon) \leftarrow Datos(E, \nu, h)$$

1.1.5. Equipos. Actualmente existe una amplia gama de equipos de auscultación como Equipo de la Medida del Rozamiento Transversal (SCRIM), Deflectógrafo tipo Lacroix, Viga Benkelman, etc. cada uno con características específicas que ofrecen una variada selección de pruebas y ensayos.

Entre los cuales se encuentra el deflectómetro de impacto (FWD) del cual realizaremos una breve descripción.

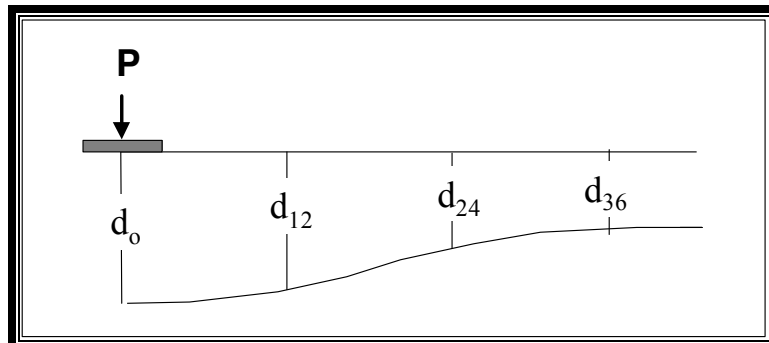
✓ Deflectómetro de impacto - FWD

Este equipo ofrece la ventaja de aplicar una carga estandarizada sobre la estructura y, a partir del cuenco de deflexiones generadas en el pavimento calcular variables estructurales como:

- Módulo resiliente M_r .
- Módulo equivalente de los materiales de la estructura de pavimento existente EP.
- Número estructural SN.

Todas ajustadas bajo la metodología AASHTO. Estas variables son fundamentales en el establecimiento de un diagnóstico estructural y por ende los espesores requeridos en la rehabilitación del pavimento (ver figura 3).

FIGURA 3. Cuenca de Deflexiones



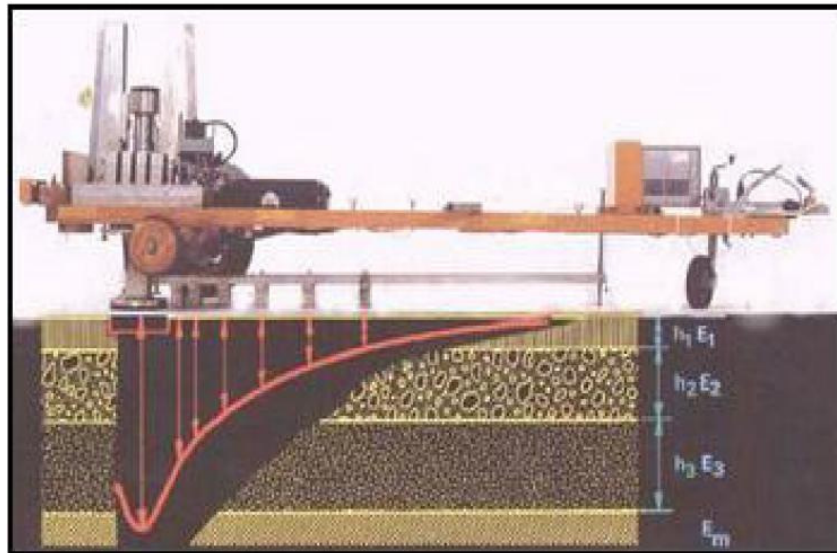
Fuente: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.

Es muy frecuente el uso del deflectómetro de impacto ya que permite efectuar con rapidez la evaluación de la estructura con respecto a la extracción de muestras con sus ensayos respectivos.

Este instrumento tiene como finalidad medir en terreno los módulos elásticos de los materiales del subsuelo y los que se encuentran debajo del punto de aplicación de la carga hasta una profundidad variable de hasta 2 m. El deflectómetro registra la fuerza de impacto y los máximos de deformación registrados mediante los sismómetros. Con esta información y un modelo elástico, mediante cálculo inverso es posible encontrar los módulos elásticos de hasta cinco capas estructurales.

✓ **Descripción del FWD**

FIGURA 4. Esquema de FWD



El equipo consta de un carro de arrastre con los sistemas de carga y medición, una interface de medición y comunicaciones montado en el vehículo y un sistema de control de ensayo, implementado a través de un programa de computador. El carro de arrastre contiene 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, como en 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 interface que es el puente entre el computador y el carro de arrastre el cual transforma las señales eléctricas provenientes del carro de arrastre, en señales digitales para que el computador las procese.

Figura 4. Sensores y plato de carga del equipo KUAB 50



Fuente: Archivo fotografico Geovial Ltda

✓ **Funcionamiento del FWD.**

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; 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 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 sensores⁴.

1.1.6. Análisis de variables estructurales

1.1.6.1 Metodología AASTHO

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

⁴ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Modelación inversa de estructuras de pavimento 2006, Pág.10.

La guía de diseño de la AASHTO presenta la metodología para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante (M_r) 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:

M_r - Módulo resiliente de la subrasante, en psi

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

d_r - deflexión medida a una distancia r del centro del plato de carga, en pulgadas. En este estudio se empleó la deflexión D_6 , 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:

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

✓ Módulo equivalente (E_p). 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.

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 fórmula⁵:

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

Donde:

d_0 - 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,

M_r - Módulo resiliente de la subrasante, en psi.

E_p - Módulo efectivo de todas las capas del pavimento, en psi.

⁵

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

✓ 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:

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

1.1.6.2 Modelamiento inverso de estructuras de capa elástica. El software actualmente utilizado calcula esfuerzos, tensiones y deformaciones en una estructura de pavimento dividida en varias capas sometida a cargas estáticas; para cada capa hay que definir:

- El modulo de elasticidad.
- La relación de Poisson.
- El espesor.

En adición a la magnitud de la carga, presión de contacto (o el radio de la carga), y la localización de la carga.

El modelo de la estructura de pavimento consta de un sistema de multicapa elástica utilizando diversas cargas de rueda (máximo 20 cargas), el programa puede analizar mezclas calientes de asfalto. La estructura de pavimento puede ser definida hasta con un máximo de 5 capas y cada una se puede caracterizar con unas propiedades de materiales ilimitadas mediante un ajuste iterativo de módulos basados en las siguientes relaciones entre módulos y esfuerzos:

$$Eb = K1 * \theta^{K2} \quad \text{Para suelos granulares.}$$

$$Es = K3 * \sigma_d^{K4} \quad \text{Para suelos fino-granulares.}$$

Donde:

- Eb = Modulo resiliente de suelos granulares (Ksi o Mpa).
 Es = Modulo resiliente de suelos fino granulares (Ksi o Mpa).
 θ = Tensión volumétrica (Ksi o Mpa).
 σ_d = Esfuerzo desviador (Ksi o Mpa).
 K1, K2, K3, K4 = Constantes de regresión.

K1 Y K3 dependen del contenido de humedad cuando cambia la estación, K2 y K4 son relativas al tipo de suelo ya sea granular o fino granular. K2 es positiva y K4 es negativa y relativamente constante con la estación.

En cada iteración del programa, cuando las presiones dependen de las capas son incluidas en el análisis del pavimento, se calculan, comparan y finalmente se ajustan estos módulos.

1.1.6.3 Implementación de modelos con elementos finitos. Las limitaciones de la mente humana no permiten captar el comportamiento del complejo mundo que lo rodea en una sola operación global. Por ello una forma natural de proceder de ingenieros, científicos, consiste en separar los sistemas en sus componentes individuales, o elementos, cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad y a continuación reconstruir el sistema original para estudiarlo a partir de dichos componentes.

En muchos casos, se obtiene un modelo adecuado utilizando un número finito de componentes bien definidos; estos problemas se denominan discretos. En otros, la subdivisión prosigue indefinidamente y el problema, solo puede definirse haciendo uso de la ficción matemática de infinitésimos. Ello nos conduce a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicados a los cuales se les llama sistemas continuos.

Para resolver la dificultad que presenta la solución de problemas continuos reales, ingenieros y matemáticos han ido proponiendo a través de los años, diversos métodos de discretización. La aplicación de estos métodos hace necesario efectuar alguna aproximación de tal manera que quepa esperar que la misma se acerque tan estrechamente como se quiera, a la solución continua verdadera a medida que crezca el número de variables discretas.

En síntesis el método de elementos finitos nos permite:

- El tratamiento de materiales continuos que no presenten comportamiento linealmente elástico a través de un proceso interactivo.
- Resolver prácticamente cualquier situación física que pueda formularse mediante un sistema de ecuaciones diferenciales.
- Hacer uso de la subdivisión del medio en el cual están definidas las ecuaciones, en formas geométricas simples denominadas elementos finitos.
- Las propiedades y las relaciones gobernantes en estos elementos se expresan en función de los valores desconocidos en las esquinas de los elementos llamados nodos⁶.

En el desarrollo de mejoras de pavimentos existentes es de vital importancia el conocimiento de los módulos de trabajo de cada una de las capas que lo conforman para poder optimizar las técnicas de construcción y validar metodologías de diseño. Sin embargo lo ideal es la realización de ensayos específicos para cada tipo de material del pavimento y de esta forma encontrar una ecuación que lo caracterice y ofrezca el modulo real de acuerdo a los diferentes modos de carga a que se encuentre sometido.

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.

⁶ INGENIERIA DE PAVIMENTOS, FUNDAMENTOS, ESTUDIOS BASICOS Y DISEÑO. Alfonso Montejo Fonseca. 3^{era} Edición, tomo 1, Cáp. 5, pag174

✓ **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 mas centrados en la realidad del comportamiento del pavimento⁷

Actualmente existen muchos programas basados en la teoría de elementos finitos, entre los cuales⁸ : NASTRAN, COSMOS, ABAQUS, PATRAN, STRUDL, etc. Para efecto de esta investigación se ha elegido el programa ANSYS ya que se trata de una herramienta muy completa para análisis por elementos finitos, además de ofrecer una inmejorable relación entre la calidad del producto y su costo.

Este método como formulación matemática es 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.

⁷ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Modelación inversa de estructuras de pavimento 2006, Pág. 29.

⁸ SUAREZ DOMINGUEZ, Federico J. Manual de diseño de ANSYS, España 2001, Available from internet:< www.construccion.uniovi.es/área/cursos/C1840012.htm>

2. APLICACION DE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

✓ **Especificaciones programa ANSYS.**

El programa de elementos finitos ANSYS permite desarrollar entre otras las siguientes actividades:

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

✓ **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 electo 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, También sería posible obtener la evolución temporal de cualquiera de los grados de libertad⁹.

✓ **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:

Tabla 1. Resumen de niveles de procesamiento entorno 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

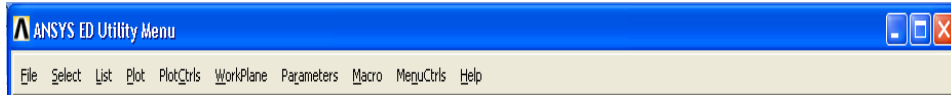
Para retornar al nivel de entrada o de comienzo desde cualquier proceso, hay que activar el comando FINISH desde el menú principal del programa y si se desea salir del programa hay que activar el comando EXIT. Por defecto, inmediatamente antes de salir del programa, el modelo y las cargas son guardadas 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.

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 5, 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.

⁹ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Modelación inversa de estructuras de pavimento 2006, Pág. 31.

FIGURA 5. Menú de utilidades.



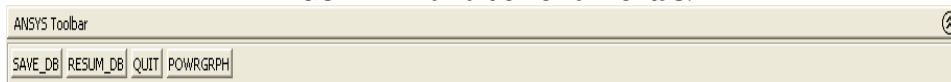
- Menú de entrada: Es donde se pueden digitar directamente los comandos de ANSYS para ser ejecutados por el programa. Todos los comandos digitados previamente también aparecen para referenciarlos rápidamente y reutilizarlos.

FIGURA 6. Menú de entrada.



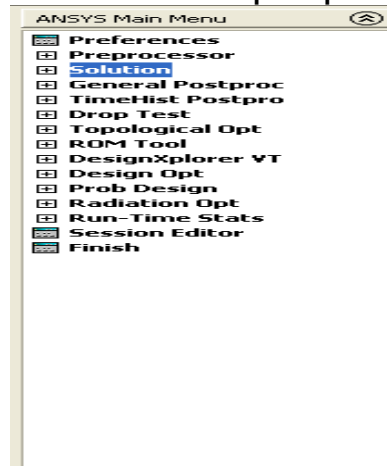
- Barra de herramientas: Es donde se permite guardar, quitar o cerrar el proyecto que se este realizando.

FIGURA 7. 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.

FIGURA 8. Menú principal.



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

✓ Organización del menú principal

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

- 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.

✓ 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 »offset Wp by increments : Esta opción permite modificar el eje de coordenadas locales con respecto al eje de coordenadas globales. Movemos nuestro plano de coordenadas en cualquier dirección para luego proceder a la división.

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.

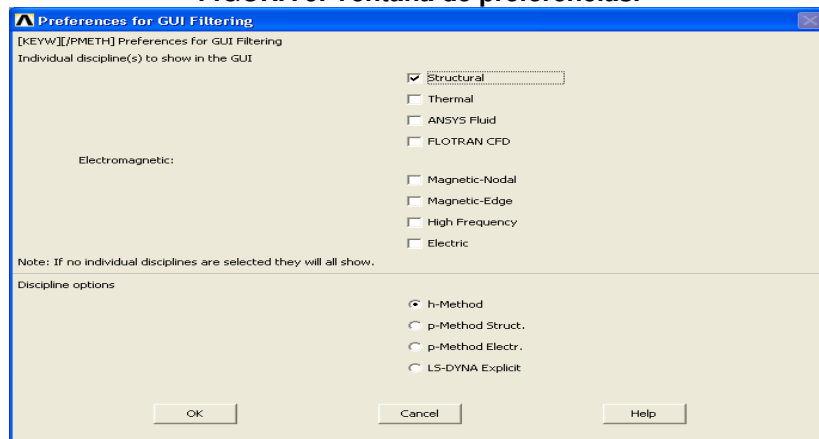
/Clear: Borra la base de datos.

✓ 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.

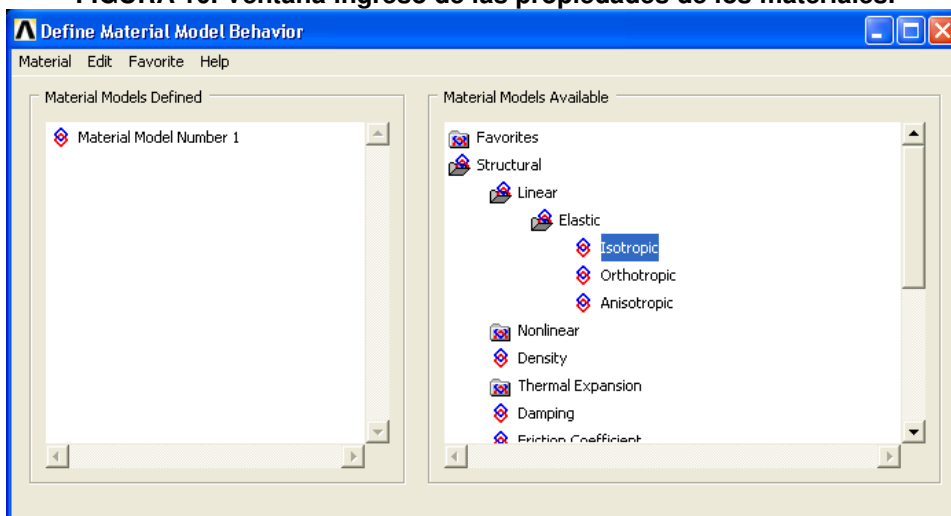
- **Preferences** Con esta opción es que se comienza la idealización del modelo escogiéndose la disciplina en la que se va a trabajar. Para nuestro diseño se la alternativa es estructural solamente.

FIGURA 9. Ventana de preferencias.



- **Preprocessor » Modeling » Create » Volumes » Block » By dimensions** Con este comando se procede a la creación de un volumen que forman parte de la capa de suelo de nuestro diseño, aunque hay varias maneras de crear la geometría dentro de ANSYS.
- **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 workplane** 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 10. Ventana ingreso de las propiedades de los materiales.



- **Preprocessor » Modeling » Create » Areas » Circle » by dimensions** Este comando permite la creación del cuarto de circunferencia de radio 15 cm en donde se aplicará la carga ejercida por el disco. Una vez realizado el cuarto de circunferencia le damos la opción de Preprocessor » Modeling » Operate » Extrude » Áreas » Along normal y lo alargamos al espesor de la capa, este procedimiento lo realizamos también con el pedazo restante del área donde realizamos el cuarto de circunferencia. Después de realizado los nuevos volúmenes procedemos a borrar los volúmenes y áreas sobrantes con la opción Preprocessor » Modeling » Operate » Booleans » Delete.

- **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 » 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 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).
- **Preprocessor » Loads » Define loads » Apply » Structural » Displacement » Symmetry B.C » on 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 » Pressure** Permite la aplicación de las cargas que ocasionaran la deformación de la estructura. Para nuestro análisis la presión a utilizar es de 567440 N/m²
- **Solution » Solve » Current LS** Es el procedimiento a seguir para resolver el caso de carga planteado.
- **General Postproc » Plot results » Contour Plot » Nodal solu » DOF Solution** 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. METODOLOGIA DE ESTUDIO

3.1. DETERMINACION DE MODULO RESILIENTE (Mr) DE LAS CAPAS

En el presente capítulo, vamos a realizar un retrocálculo de los módulos de las capas del pavimento para observar las diferencias entre las deflexiones obtenidas a través de un programa tradicional y uno de elementos finitos. Se realizara una comparación de las deflexiones obtenidas a través del programa EVERSTRESS y el programa de elementos finitos ANSYS, dado que este último proporciona resultados mas aproximados a los datos reales de una estructura de pavimento.

A partir de los Mr suministrados en el informe de investigación, MODULO RESILIENTE PARA SUELOS FINOGRANULARES de la UNIVERSIDAD EAFIT de Medellín, se calcularon los módulos de la estructura de pavimento tomando como referencia dos métodos de cálculo de módulos de elasticidad, como son SHELL 78 y BARBER.

Tabla 2. Características del suelo de subrasante

SUBRASANTE	MODULO RESILIENTE	ECUACION CARACTERISTICA
Suelo arcilloso.	26810 KPa.	$96682 * \sigma_d^{-0.3454}$
Suelo limoso.	150222 KPa.	$3000000 * \sigma_d^{-0.8063}$

- **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 expresión¹⁰:

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

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. 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 Busmister D. (1945)

¹⁰ SANCHEZ SABOGAL, Fernando. Pavimentos. 6 Ed. Tomo 1. Bogotá 1992. P. 82.

La identificación de los valores de módulos en la estructura de pavimento se llevó a cabo con la sectorización de tramos homogéneos de esfuerzos sabiendo que los módulos elásticos de los materiales son función del estado de esfuerzos al cual se encuentran sometidos a estos se les llaman modelos no lineales, y se expresan mediante ecuaciones como las que se presentan a continuación:

3.1.1 Materiales Cohesivos:

$$Mr = K_3 \sigma_d^{-k_4}$$

Donde:

M_r = Modulo resiliente

σ_d = Esfuerzo desviador.

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$

σ_3 = Presión de confinamiento

k_3, k_4 = Constantes de regresión las cuales son función del tipo de material.

3.1.2 Materiales Granulares:

$$Mr = K_1 \theta^{-k_2}$$

Donde:

M_r = Modulo resiliente

θ = Tensión volumétrica

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

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

3.2. APLICACIÓN DE MODULOS PARA MODELAMIENTO INVERSO

Para nuestra investigación se utilizara la formulación para materiales cohesivos en la subrasante y materiales granulares en la base y subbase. Se tomaran los valores de los módulos obtenidos por los métodos de cálculo de SHELL 78 y de BARBER los cuales introduciremos al programa EVERSTRESS, este nos proporciona los esfuerzos principales los cuales adaptaremos para así obtener el esfuerzo desviador en el caso de la subrasante y la tensión volumétrica para la capa de base y subbase. Finalmente después de encontrar e identificar las zonas de módulos homogéneas se procede a establecer la geometría de la estructura de pavimento en base a la homogeneidad de

los materiales que la conformarían aplicándolas al programa ANSYS, el cual queda de la siguiente forma.

✓ **ESTRUCTURA DE PAVIMENTO CON SUBRASANTE COMPUESTA DE ARCILLA**

Tabla 3. Diseño de la estructura de pavimento modelo subrasante arcillosa

CAPA	Relación Poisson's	Espesor Capa (cm)	Ecuación	Modulo (Mpa)
Carpeta Asfáltica	0.36	20	-----	1500
Base	0.4	20	$Mr = K_1 \theta^{-k_2}$	179.53
Subbase	0.45	16	$Mr = K_1 \theta^{-k_2}$	71.85
Subrasante	0.49		$Mr = K_3 \sigma_d^{-k_4}$	26.81

FIGURA 11. Estructura de pavimento con subrasante arcillosa.

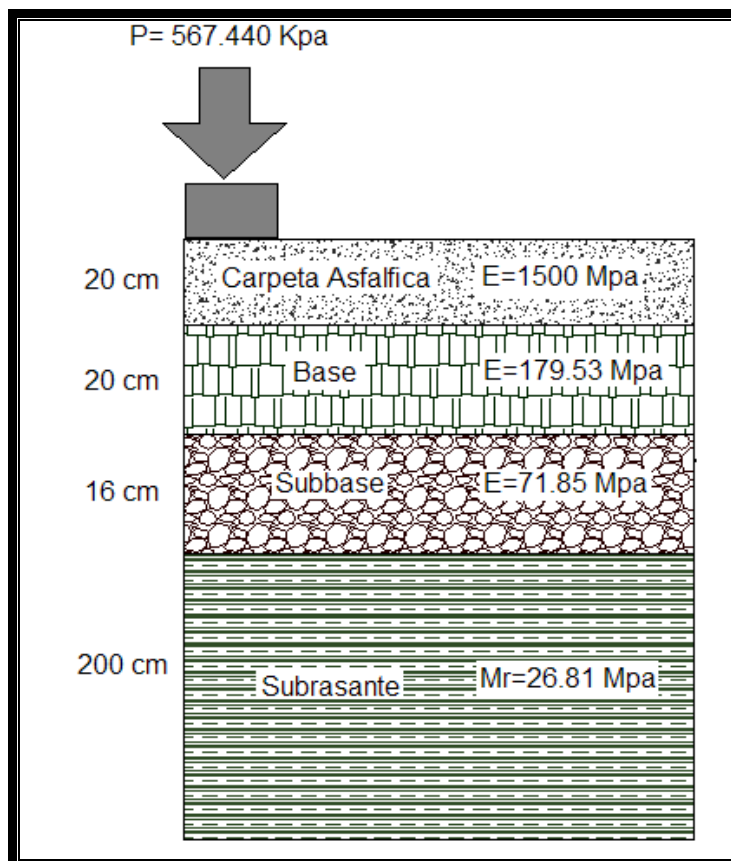


FIGURA 12. Modelamiento ANSYS con varios módulos por capa, subrasante arcillosa

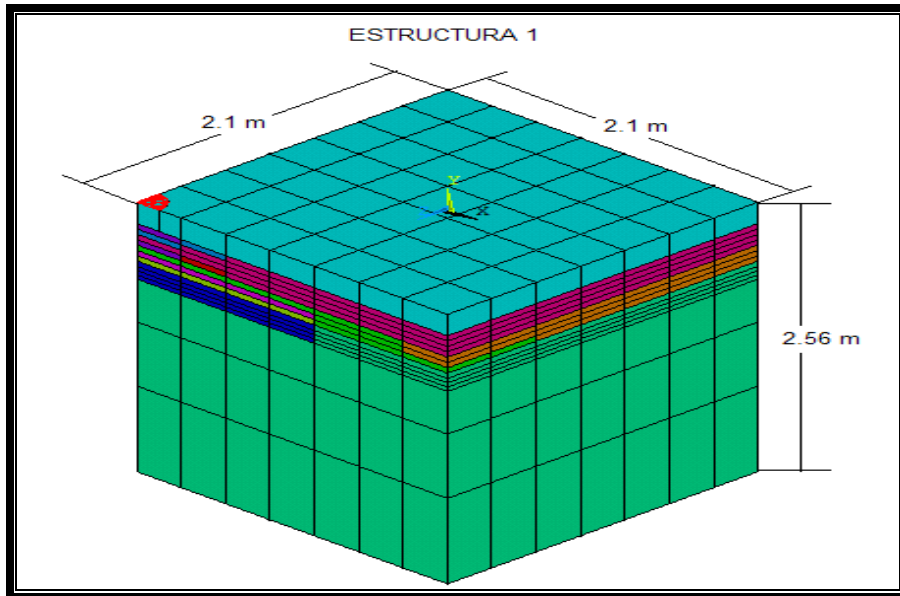
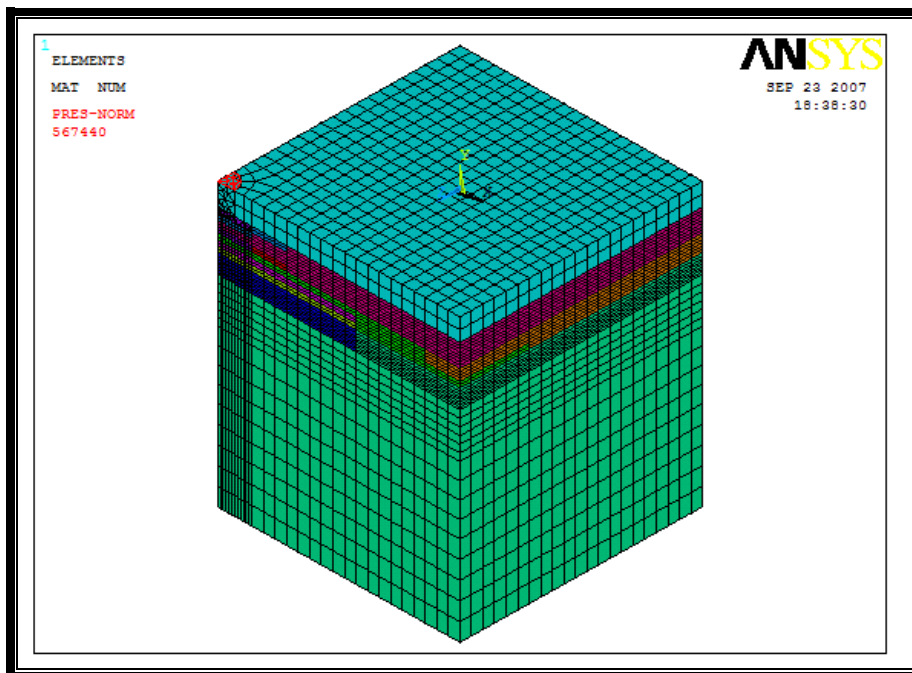


FIGURA 13. Enmallado ANSYS



En la siguiente tabla se muestra los módulos incorporados a los diferentes modelos como se dijo anteriormente estos fueron hallados con los métodos de cálculo de SHELL 78 y de BARBER y posteriormente adaptados para así conseguir los módulos y asociarlos al diseño con el programa ANSYS para el modelo con varios módulos por capa.

Tabla 4. Módulos obtenidos por SHELL 78 y BARBER.

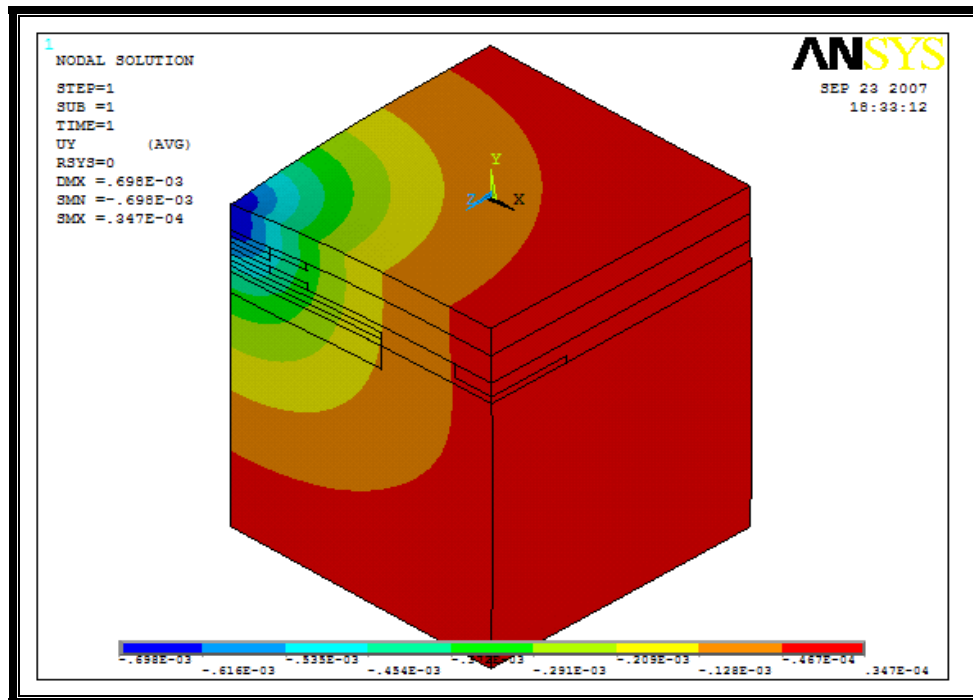
Nº de capa	Relación Poisson's	Espesor Capa (cm)	Modulo (Mpa)
1	0.36	20	1500
2	0.4	20	179.530
3	0.45	16	71.852
4	0.49		26.810

Tabla 5. Valores de módulos insertados a ANSYS modelo compuesto de varios módulos por capa.

CAPA	MODULOS INSERTADOS	
	# MODULO	VALOR(Mpa)
Carpeta Asfáltica	MODULO 1	1500
Base	MODULO 2	154.09
	MODULO3	103.57
	MODULO 4	85.52
	MODULO 5	55.57
Subbase	MODULO 6	50.07
	MODULO 7	46.82
	MODULO 8	36.77
	MODULO 9	20.02
Subrasante	MODULO 10	50.07
	MODULO 11	34.34
	MODULO 12	38.91

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.

FIGURA 14. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS para modelo con varios módulos por capa, subrasante arcilla



✓ ESTRUCTURA DE PAVIMENTO CON SUBRASANTE COMPUESTA DE LIMO.

Tabla 6. Diseño de la estructura de pavimento modelo subrasante limo

CAPA	Relación Poisson's	Espesor Capa (cm)	Ecuación	Modulo (Mpa)
Carpeta Asfáltica	0.36	20	-----	1500
Base	0.4	20	$Mr = K_1 \theta^{-k_2}$	586.441
Subbase	0.45	16	$Mr = K_1 \theta^{-k_2}$	308.245
Subrasante	0.49		$Mr = K_3 \sigma_d^{-k_4}$	150.222

FIGURA 15. Estructura de pavimento con subrasante Limo

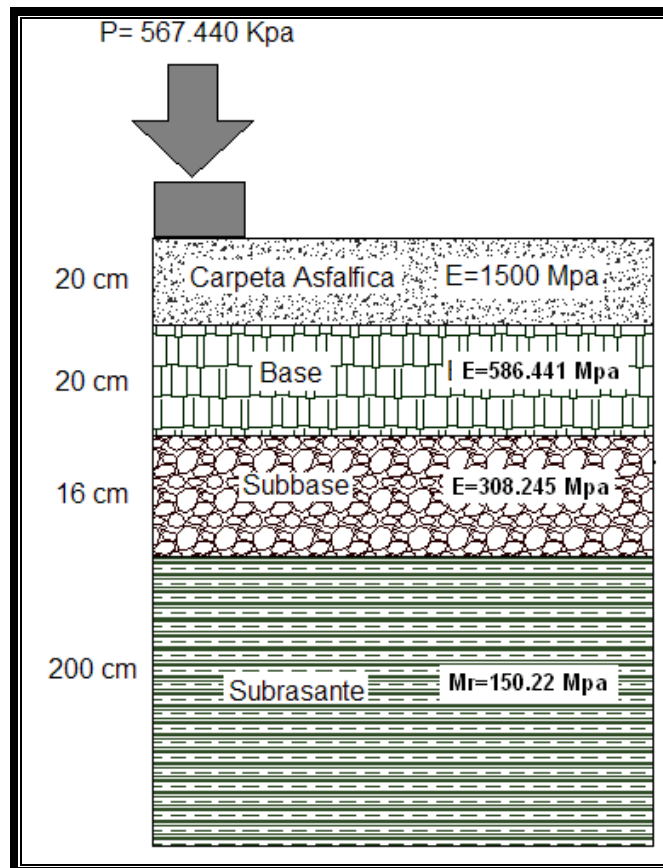


FIGURA 16. Modelamiento ANSYS con varios módulos por capa, subrasante Limo

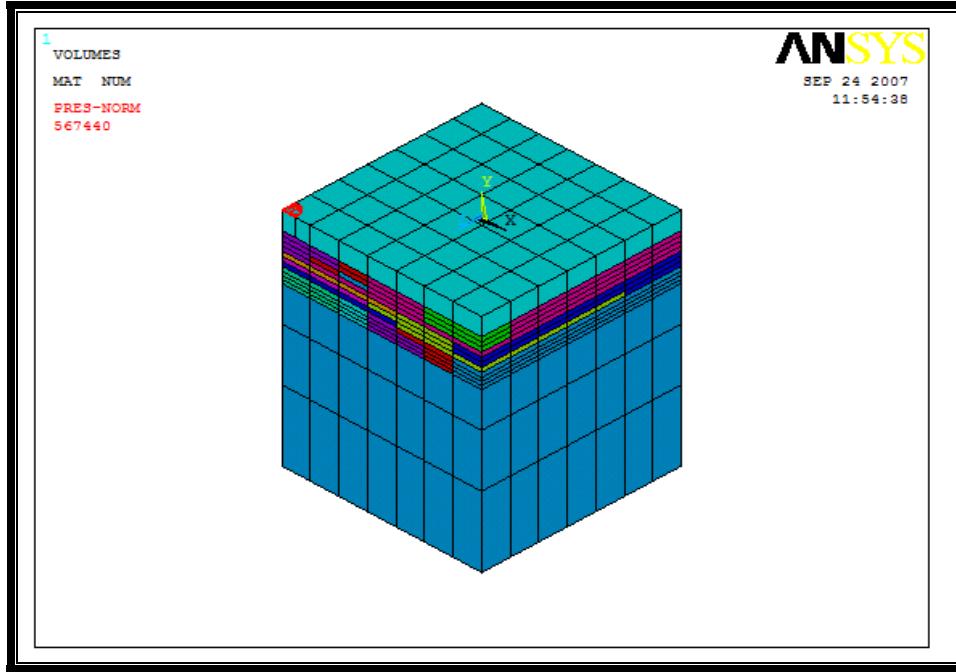
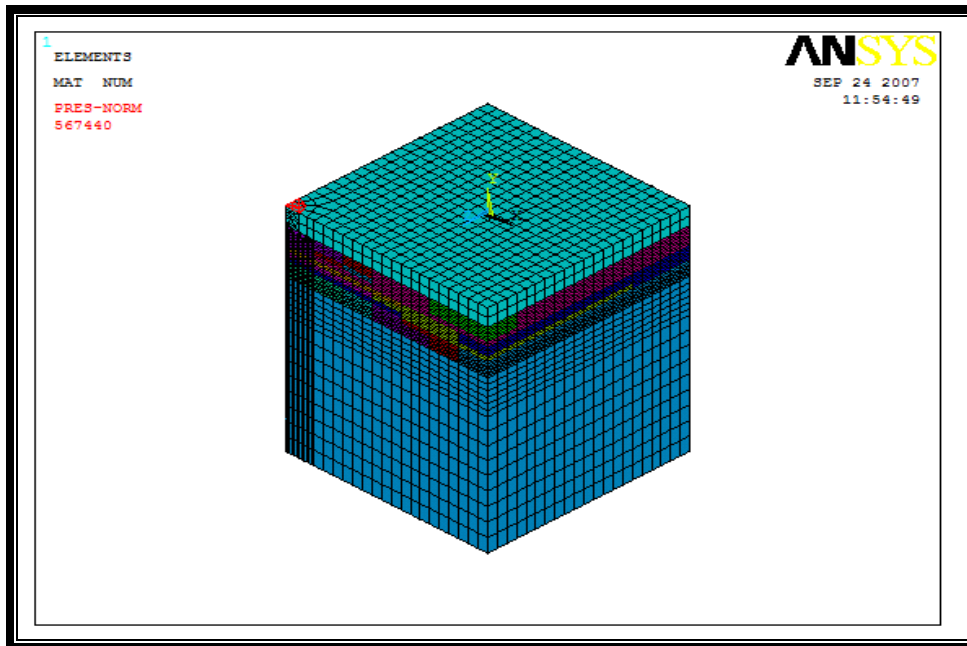


FIGURA 17. Enmallado ANSYS



En la siguiente tabla se muestra los módulos incorporados a los diferentes modelos hallados con los métodos de cálculo de SHELL 78 y de BARBER y posteriormente adaptados para así conseguir los módulos y asociarlos al diseño con el programa ANSYS para el modelo con varios módulos por capa.

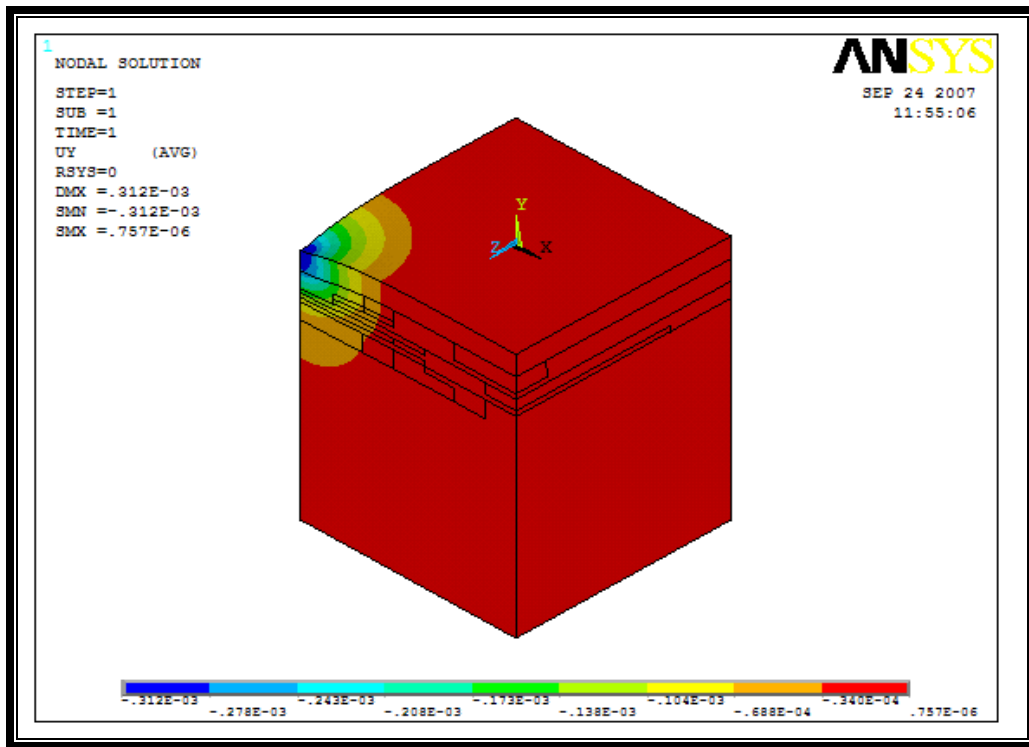
Tabla 7. Módulos obtenidos por SHELL 78 y BARBER.

Nº de capa	Relación Poisson's	Espesor Capa (cm)	Modulo (Mpa)
1	0.36	20	1500
2	0.4	20	586.441
3	0.45	16	308.245
4	0.49		150.222

Tabla 8. Módulos insertados a ANSYS, modelo compuesto de varios módulos por capa y subrasante Limo.

CAPA	MODULOS INSERTADOS	
	# MODULO	VALOR(Mpa)
Carpeta Asfáltica	MODULO 1	1500
Base	MODULO 2	145.94
	MODULO 3	77.59
	MODULO 4	65.03
	MODULO 5	56.07
	MODULO 6	43.82
Subbase	MODULO 7	70.85
	MODULO 8	58.13
	MODULO 9	51.23
	MODULO 10	47.09
	MODULO 11	35.87
Subrasante	MODULO 12	182.73
	MODULO 13	231.89
	MODULO 14	286.86
	MODULO 15	335.3
	MODULO 16	372.76

FIGURA 18. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS para modelo con varios módulos por capa, subrasante limo.



4. EVALUACION DE RESULTADOS

Según el proceso constructivo se realizó dos modelos diferentes:

- Un modelo compuesto de varias subcapas a las cuales se les ajusto módulos diferentes, los cuales fueron hallados según el procedimiento descrito anteriormente del programa EVERSTRESS.
- Un modelo simple conformado por cuatro capas, cada una con modulo específico.

4.1. MODELO CON SUBRASANTE DE ARCILLA

FIGURA 19. Modelo de varios módulos por capa.

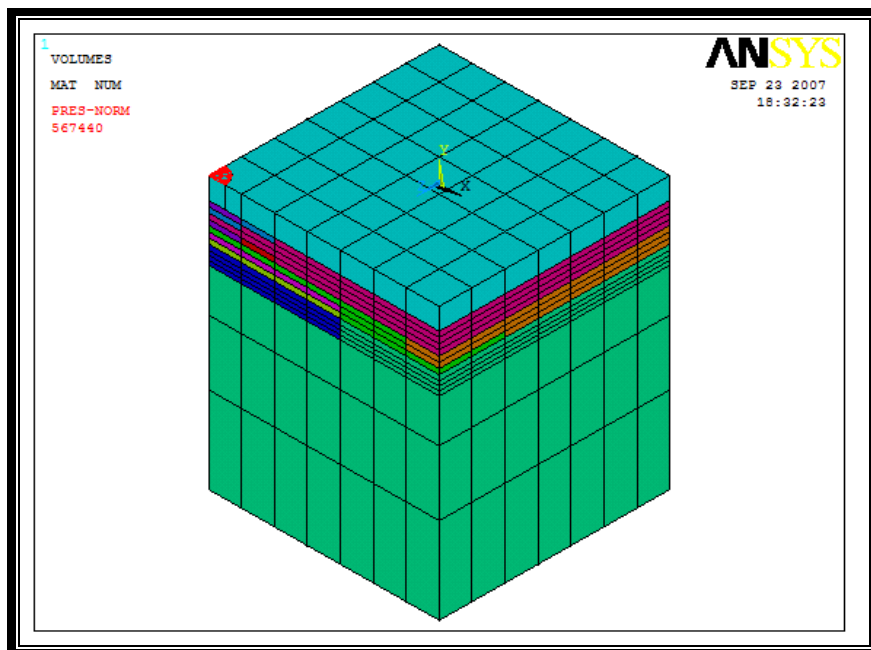


FIGURA 20. Distribución de módulos por capa.

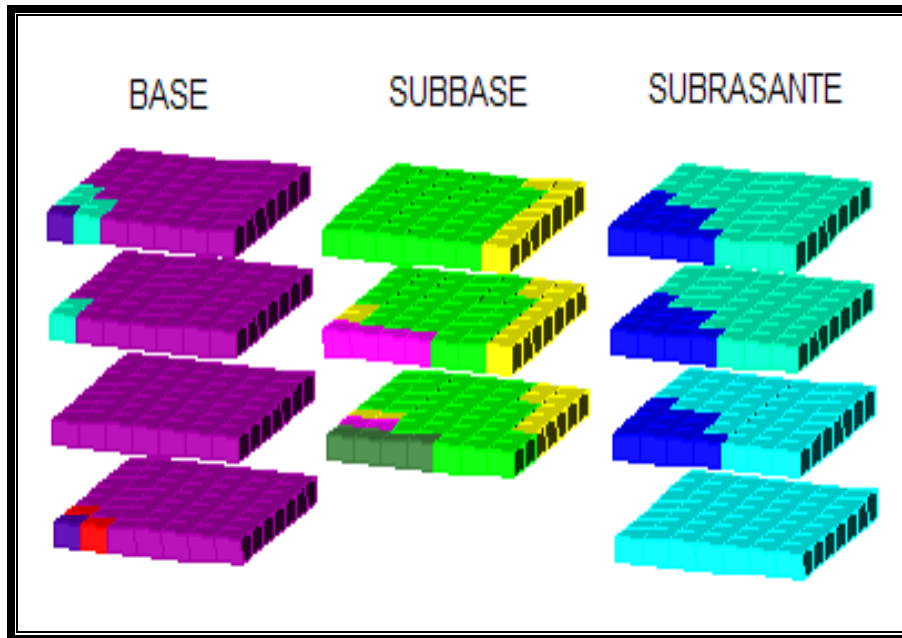
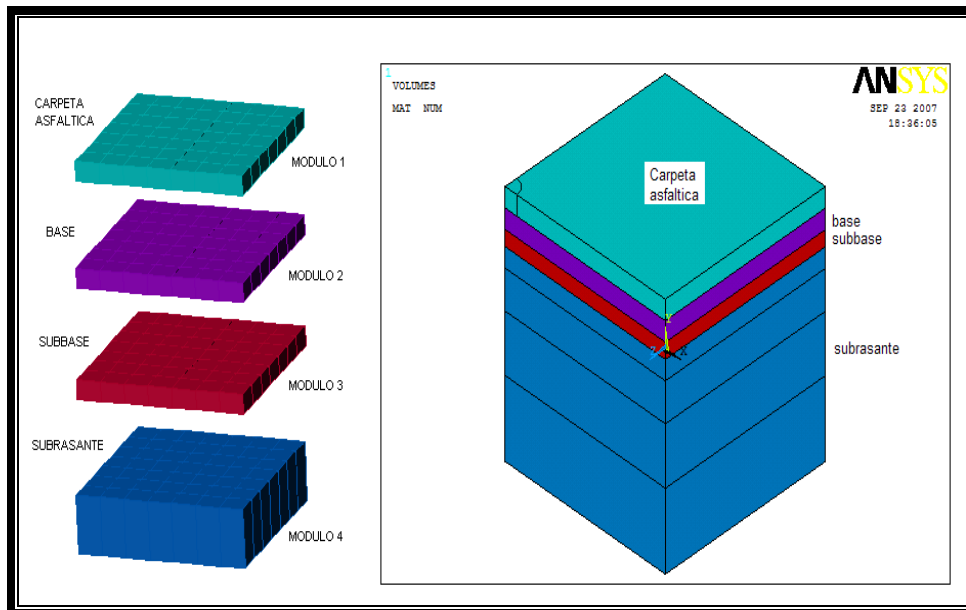


FIGURA 21. Distribución de módulo único por capa.



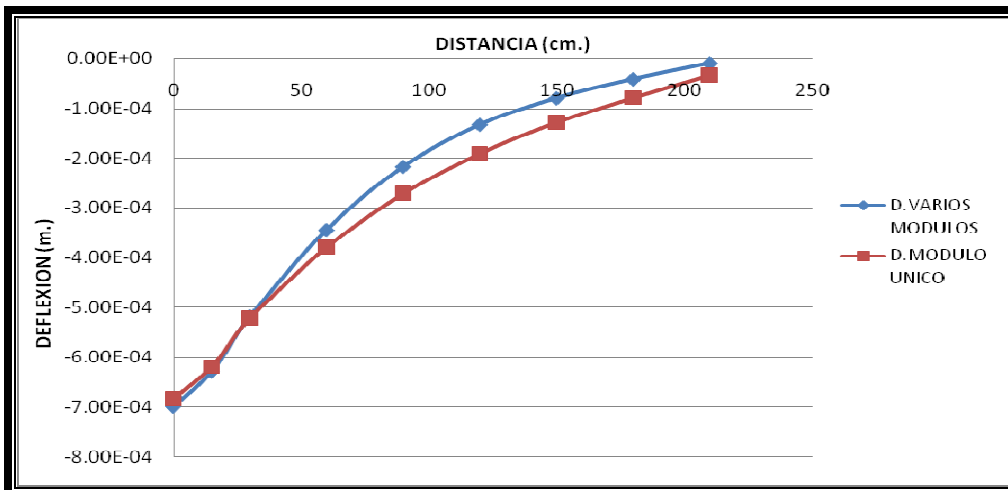
Después de realizar los dos diseños en el programa ANSYS comparamos los resultados de las deflexiones para así poder observar como primera medida la diferencia que se pueden encontrar entre lo modelación del diseño compuesto por varios módulos en el cual tenemos en cuenta el esfuerzo desviador en la subrasante y el segundo modelo que esta compuesto en cada capa con un solo módulo elástico.

Tabla 9. Deflexiones obtenidas por ANSYS.

Distancia (cm.)	DEFLEXION (m.)	
	Modelo compuesto de varios Módulos por capa	Modelo con único Módulo por capa
0	-6.98E-04	-6.83E-04
15	-6.28E-04	-6.19E-04
30	-5.18E-04	-5.21E-04
60	-3.43E-04	-3.78E-04
90	-2.16E-04	-2.71E-04
120	-1.33E-04	-1.90E-04
150	-7.91E-05	-1.28E-04
180	-4.15E-05	-7.79E-05
210	-9.89E-06	-3.33E-05

En la siguiente figura, se puede observar con mayor exactitud la variación de deflexiones para los dos modelos tomando como alternativa una arcilla en la subrasante.

FIGURA 22. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa y un modelo con módulo único por capa.



Como se puede observar se encuentran una variación entre los dos modelos, el modelo compuesto por varios módulos por capa presenta unas deflexiones menores, pero en el punto de aplicación de la carga las deflexiones son muy semejantes.

Adicionalmente se realizó otro modelo simple en el cual no se hicieron divisiones cada 30 cm. como se muestra en la figura, esto se hizo con el fin de analizar si las divisiones en el primer modelo tienen alguna influencia en los resultados obtenidos.

FIGURA 23. Comparación entre un modelo con único módulo por capa dividido cada 30 cm. y un modelo con único módulo por capa sin divisiones.

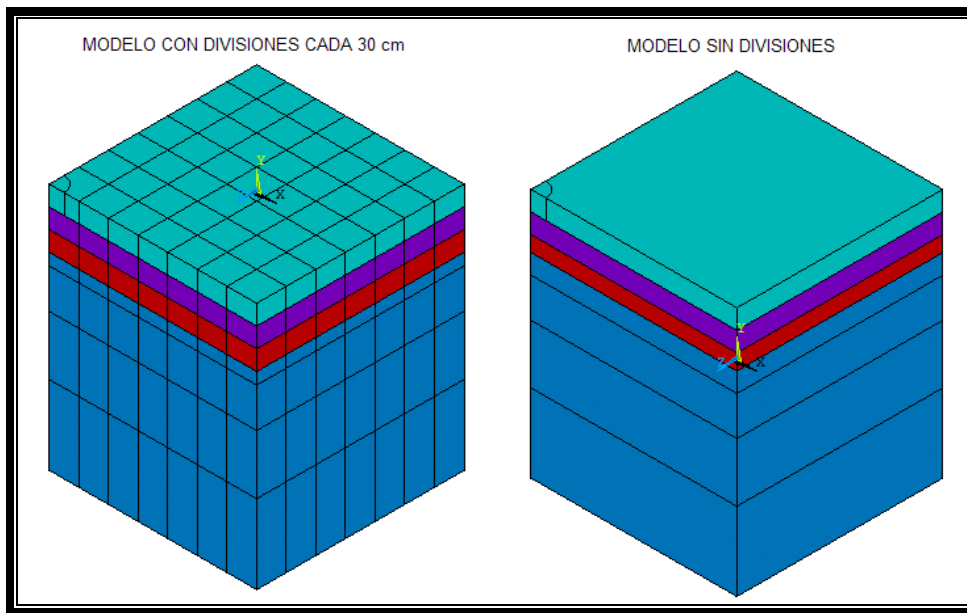
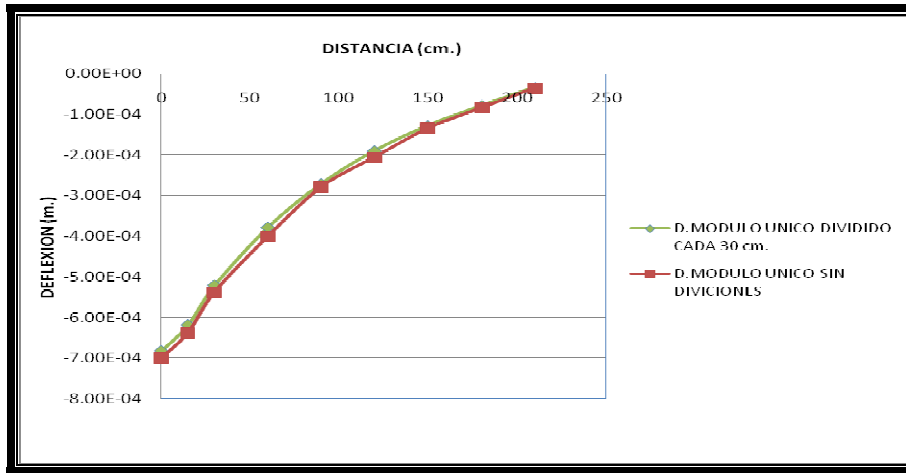


Tabla 10. Resultados deflexiones modelo con único módulo por capa dividido cada 30 cm. y un modelo con único módulo por capa sin divisiones.

Distancia (cm.)	DEFLEXIONES (m.)	
	Modelo con módulo único Por capa dividido cada 30 cm	Modelo con módulo único Por capa sin divisiones
0	-6.83E-04	-7.00E-04
15	-6.19E-04	-6.37E-04
30	-5.21E-04	-5.37E-04
60	-3.78E-04	-4.00E-04
90	-2.71E-04	-2.79E-04
120	-1.90E-04	-2.06E-04
150	-1.28E-04	-1.35E-04
180	-7.79E-05	-8.33E-05
210	-3.33E-05	-3.51E-05

FIGURA 24. Comparación deflexiones entre el modelo con único módulo por capa dividido cada 30 cm. y un modelo con único módulo por capa sin divisiones.



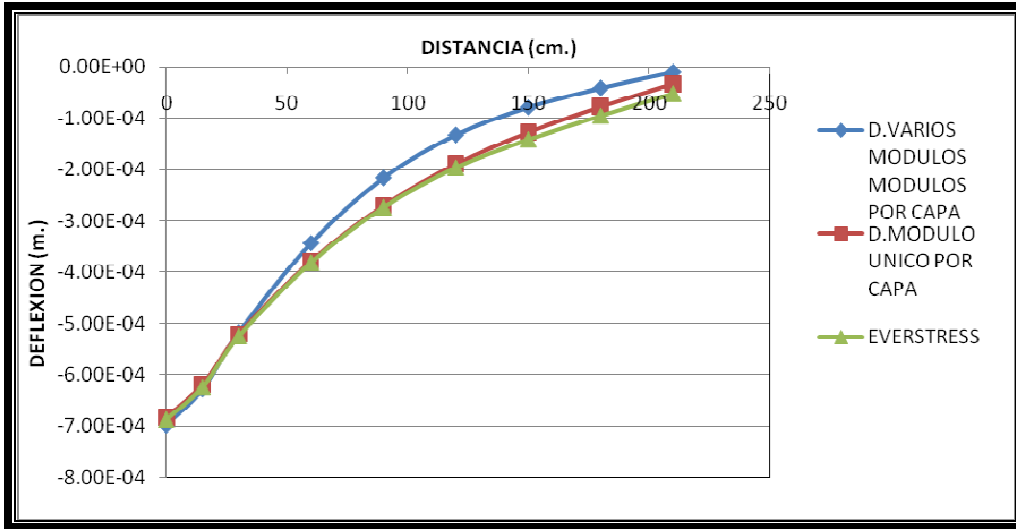
Como nos podemos dar cuenta las deflexiones entre los modelos son casi exactas por lo cual podríamos decir que las divisiones cada 30 cm no tienen tanta influencia en los resultados.

Después de haber calculado las deflexiones con el programa de elementos finitos ANSYS, ahora las comparamos con las deflexiones arrojadas por el programa EVERSTRESS como se a continuación.

Tabla 11. Resultado deflexiones entre el modelo compuesto por varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.

Distancia (cm.)	DEFLEXIONES (m.)		
	Modelo compuesto por Varios módulos por capa	Modelo con único Módulo por capa	EVERSTRESS
0	-6.98E-04	-6.83E-04	-6.87E-04
15	-6.28E-04	-6.19E-04	-6.24E-04
30	-5.18E-04	-5.21E-04	-5.24E-04
60	-3.43E-04	-3.78E-04	-3.81E-04
90	-2.16E-04	-2.71E-04	-2.73E-04
120	-1.33E-04	-1.90E-04	-1.96E-04
150	-7.91E-05	-1.28E-04	-1.41E-04
180	-4.15E-05	-7.79E-05	-9.48E-05
210	-9.89E-06	-3.33E-05	-5.14E-05

FIGURA 25. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto por varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.



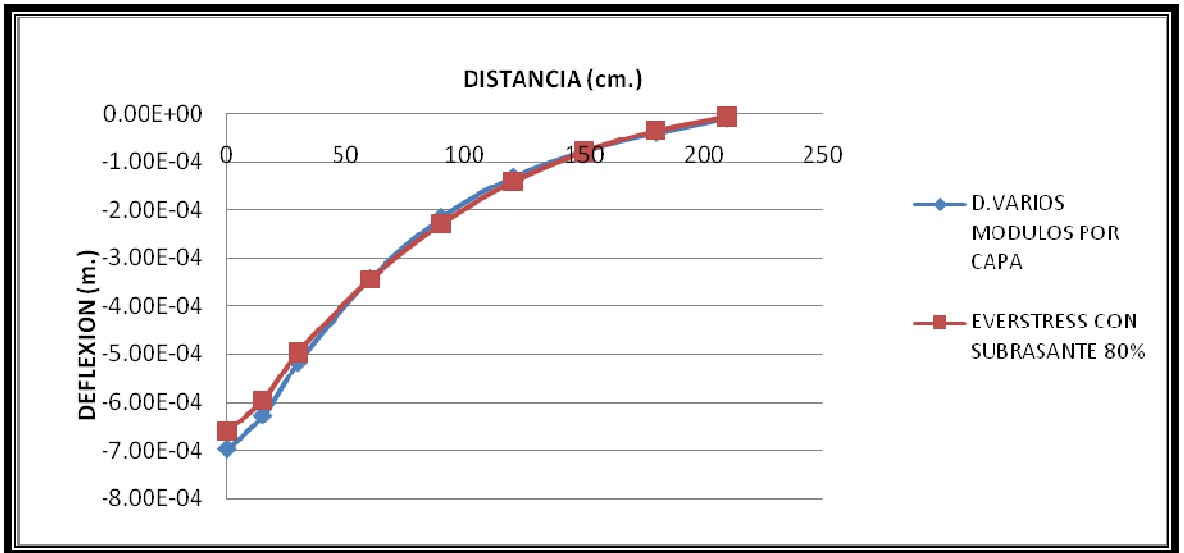
De acuerdo a los resultados anteriores y comparando las dos metodologías de diseño con elementos finitos ANSYS y el programa EVERSTRESS, nos podemos dar cuenta que los resultados del programa EVERSTRESS se asemejan a los resultados obtenidos en el modelo simple realizado con ANSYS. El modelo compuesto muestra la diferencia entre los resultados de las metodologías de los diseños, dándonos a conocer que los modelos con programas como el EVERSTRESS no tienen en cuenta la influencia de tiene los materiales cohesivos en la subrasante.

Para observar la diferencia existente entre el modelo compuesto de varios módulos y los resultados de un diseño simple como el EVERSTRESS, reducimos el módulo de la subrasante en un 20% dando los siguientes resultados.

Tabla 12. Ajuste de deflexiones del diseño en EVERSTRESS contra modelo compuesto por varios módulos por capa.

Distancia (cm.)	DEFLEXIONES (m.)	
	Modelo compuesto por varios módulos por capa	Modelo EVERSTRESS con subrasante 80%
0	-6.98E-04	-6.60E-04
15	-6.28E-04	-5.96E-04
30	-5.18E-04	-4.95E-04
60	-3.43E-04	-3.45E-04
90	-2.16E-04	-2.29E-04
120	-1.33E-04	-1.42E-04
150	-7.91E-05	-7.86E-05
180	-4.15E-05	-3.47E-05
210	-9.89E-06	-5.56E-06

FIGURA 26. Comparación ajuste de deflexiones del diseño en EVERSTRESS contra el modelo de varios módulos por capa.



Se observa que con una capa de subrasante al 80% de valor del modulo inicial los resultados son casi iguales con la única diferencia el punto de aplicación de la carga.

4.2. MODELO CON SUBRASANTE DE LIMO

En la figura 16 se observó la distribución general de los módulos de cada capa de la estructura de pavimento con subrasante limosa. Podremos apreciar una distribución mas detallada de los módulos de cada capa de pavimento en la siguiente figura.

FIGURA 27. Distribución de módulos por capa

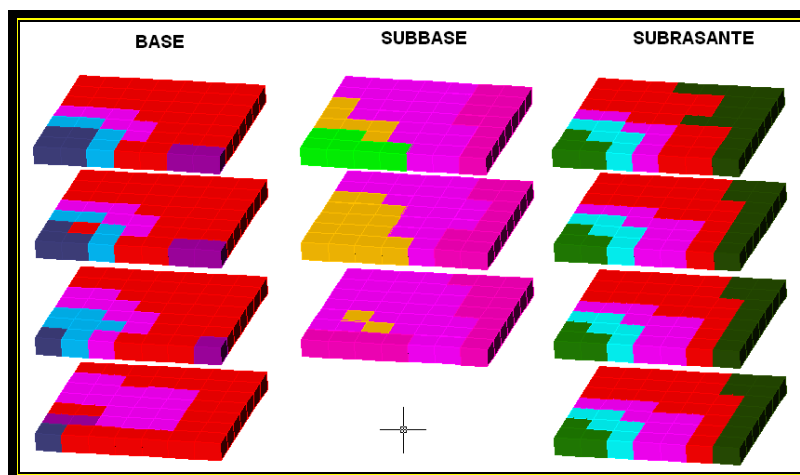
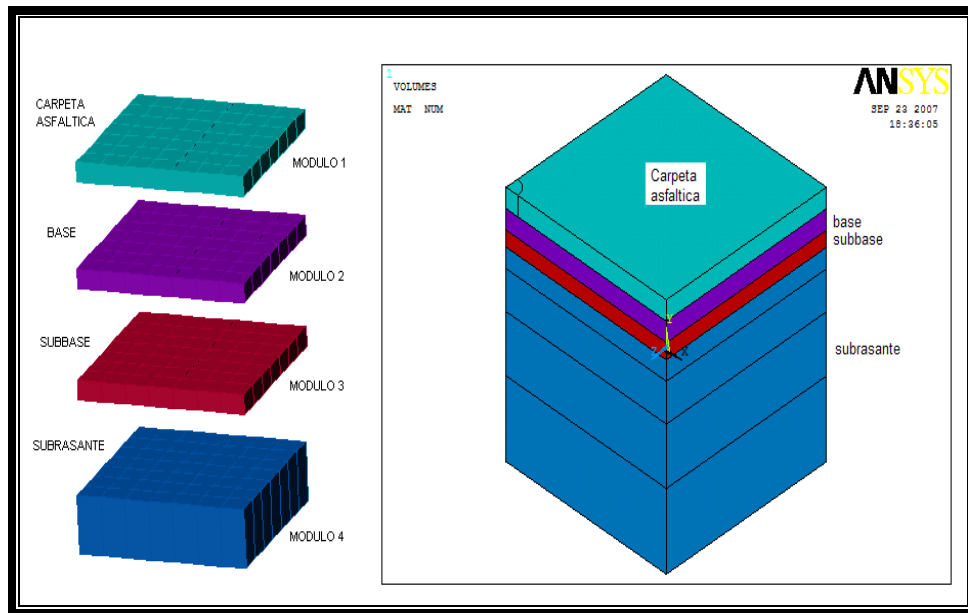


FIGURA 28. Distribución de módulo único por capa

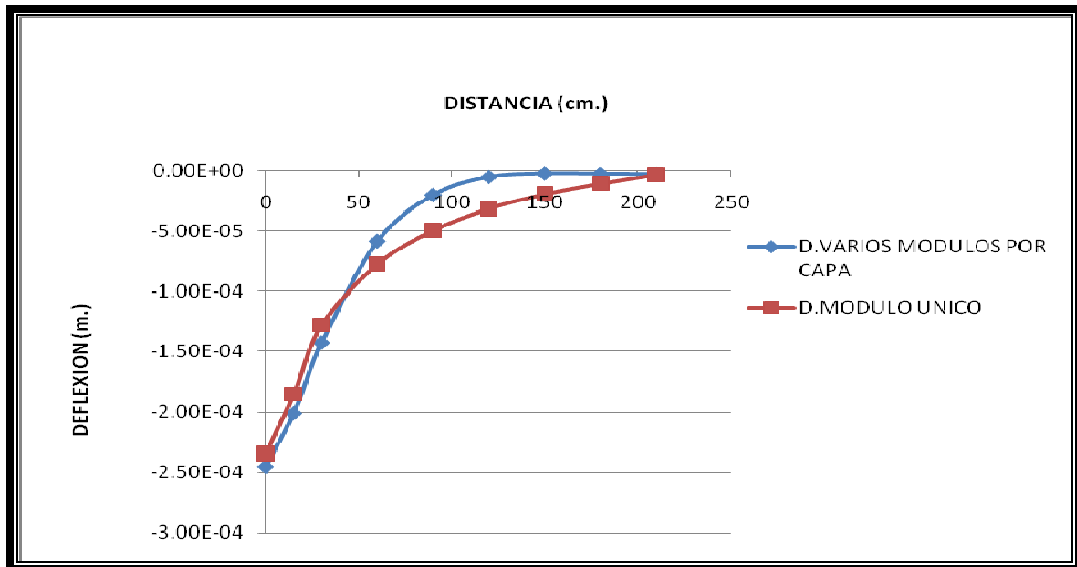


Una vez realizados los diseños en el programa ANSYS confrontamos resultados de deflexiones para analizar posibles diferencias encontradas entre el modelo compuesto por varios módulos por capa y el modelo conformado por un módulo único en cada capa; teniendo en cuenta que en los dos modelamientos se utiliza el esfuerzo desviador en la subrasante y en las demás capas las tensiones volumétricas a las que esta sometida la estructura.

Tabla 13. Deflexiones obtenidas por el programa ANSYS

Distancia (cm.)	DEFLEXIONES (m.)	
	Modelo compuesto por varios módulos por capa	Modelo con único Módulo por capa
0	-2.45E-04	-2.32E-04
15	-2.01E-04	-1.85E-04
30	-1.42E-04	-1.28E-04
60	-5.81E-05	-7.75E-05
90	-2.01E-05	-4.92E-05
120	-4.88E-06	-3.14E-05
150	-2.02E-06	-1.96E-05
180	-2.21E-06	-1.09E-05
210	-2.51E-06	-3.25E-06

FIGURA 29. Comparación deflexiones entre el modelo compuesto por varios módulos por capa y un modelo con módulo único por capa.



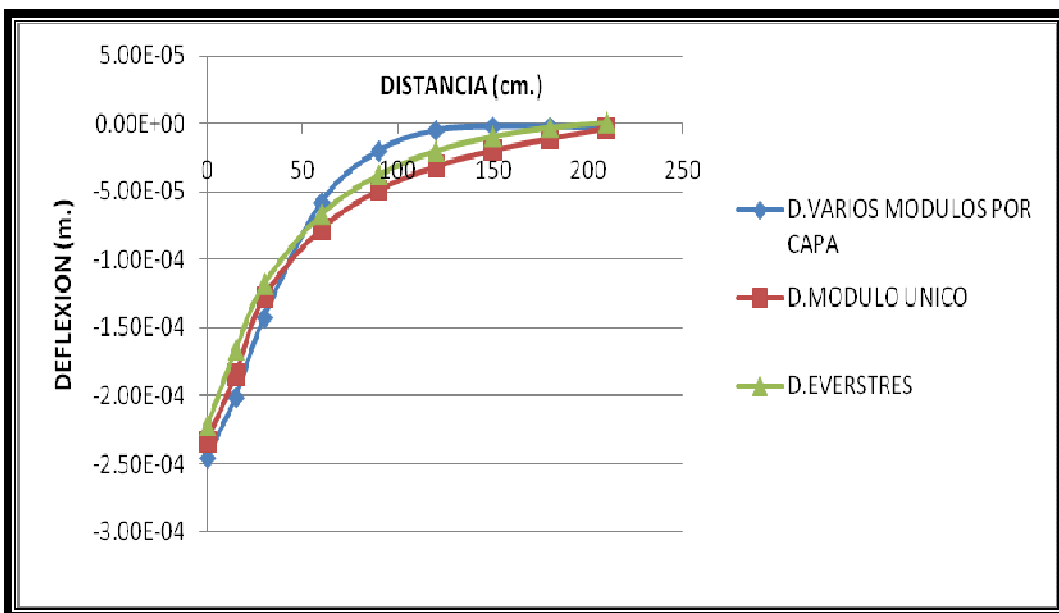
Se puede observar una variación entre los dos modelos, el modelo compuesto de varios módulos por capa presenta unas deflexiones mayores y una tendencia aproximadamente igual hasta una distancia de 50 cm. del punto de aplicación de la carga. De allí en adelante las deflexiones son menores que en el modelo con módulo único por capa.

Luego de calcular deflexiones con el programa de elementos finitos ANSYS, se comparan estas con las obtenidas mediante el programa EVERSTRESS como se muestra a continuación:

Tabla 14. Resultado deflexiones entre el modelo compuesto por varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.

Distancia (cm.)	DEFLEXIONES (m.)		
	Modelo compuesto por varios módulos por capa	Modelo con único módulo por capa	EVERSTRESS
0	-2.45E-04	-2.35E-04	-2.22E-04
15	-2.01E-04	-1.85E-04	-1.67E-04
30	-1.42E-04	-1.28E-04	-1.18E-04
60	-5.81E-05	-7.75E-05	-6.67E-05
90	-2.01E-05	-4.92E-05	-3.78E-05
120	-4.88E-06	-3.14E-05	-2.00E-05
150	-2.02E-06	-1.96E-05	-9.22E-06
180	-2.21E-06	-1.09E-05	-2.79E-06
210	-2.51E-06	-3.25E-06	8.48E-07

FIGURA 30. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.



De la anterior grafica podemos observar que el modelamiento hecho con EVESTRESS y un modelo de elementos finitos con módulo único en cada capa siguen la misma tendencia, pero el último ofrece deflexiones mayores. El comportamiento del modelo compuesto por varios módulos en cada capa es totalmente diferente a los de los modelos que tienen un modulo único por capa. Este comportamiento puede ser influenciado por la distribución de módulos del primero y el valor del módulo resiliente que es muy alto en la subrasante.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- El software convencional para el calculo inverso de estructuras multicapa trabaja con un solo modulo de rigidez por cada capa y permite variar los módulos con la profundidad a la que se encuentra el material, mientras que en el modelo diseñado en ANSYS se sectorizaron los módulos en todas las capas y en todas las direcciones llegando así a obtener una cuenca de deflexiones mas acorde con la realidad de la estructura de pavimento.
- El análisis formulado con elementos finitos en el que el suelo cambia su rigidez tanto en profundidad como lateralmente, refleja de forma más exacta el comportamiento real del pavimento, ya que este modelo permite tomar en cuenta las variaciones de rigidez de los materiales que se observan en ensayos triaxiales.
- El modelamiento inverso realizado, muestra que para el suelo cohesivo es posible encontrar un factor de ajuste del 20% en el módulo de la subrasante para un modelo con único modulo de rigidez por capa para que semeje el comportamiento real de una estructura de pavimento. Mientras que el suelo friccionante no permite encontrar ningún factor de ajuste en los resultados obtenidos.
- Estructuras de pavimento con módulos resilientes muy elevados en la subrasante y espesores altos en la carpeta asfáltica pueden originar un debilitamiento en las capas granulares; lo recomendable en estos casos es evaluar la necesidad de estas capas en la estructura ó analizar una posible disminución en el espesor de la carpeta asfáltica.
- Se recomienda un estudio individual tanto de los suelos cohesivos como friccionantes analizando diferentes intervalos de módulos resilientes y distintos espesores de las capas que componen la estructura de pavimento.
- Es necesario adecuar un banco de datos con los resultados obtenidos de las verificaciones del comportamiento de las estructuras de pavimento, lo que facilitara en un futuro disponer una mayor capacidad de análisis y confiabilidad de los datos.
- El siguiente paso en el análisis de estructuras de pavimento con elementos finitos es programar el software utilizado para que este pueda desarrollar la sectorización de los módulos, de esta manera se puede ahorrar tiempo y además da al diseñador mayor seguridad en los resultados.

BIBLIOGRAFIA

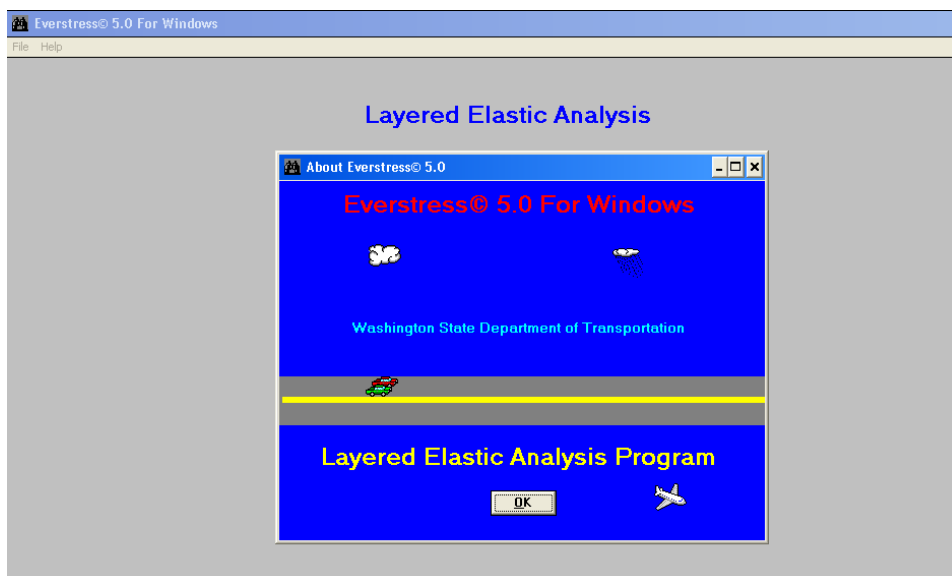
- AMEZQUITA C., Román Andrés, JIMENEZ H., John Alexander. Modelación inversa de estructuras de pavimento. Tesis, biblioteca central, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Bucaramanga. 2006.
- BENITEZ G., Patricia. VEGA U., Sandra del pilar. Retrocálculo de los módulos dinámicos de los pavimentos flexibles utilizando una herramienta computacional. Tesis Biblioteca Central UIS. 1998.
- GUALDRON SUAREZ, Guillermo. Ensayos no destructivos en la caracterización de pavimentos flexibles. Tesis Biblioteca Central UIS. 1993.
- MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2 Ed. Universidad católica de Colombia. Bogota, 2002.
- SANCHEZ SABOGAL, Fernando. Diseño de pavimentos. 6 Ed. Tomo I. Bogotá, 1992.
- 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.
- 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.
- The federal aviation administ
<http://www.airporttech.tc.faa.gov>

ANEXO A. EJEMPLO PROGRAMA EVERSTRESS

Programa EVERSTRESS

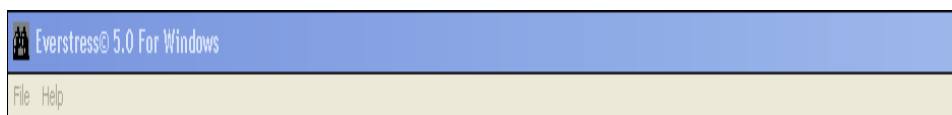
Mediante la aplicación del software EVERSTRESS (figura 23), que a continuación se explicará en detalle, se lograron encontrar los esfuerzos principales en los diferentes puntos en que se encontraban los sensores del FWD, para con esto finalmente hallar la relación de módulos que se utilizaría en el programa ANSYS.

FIGURA 31. Entorno principal del programa EVERSTRESS



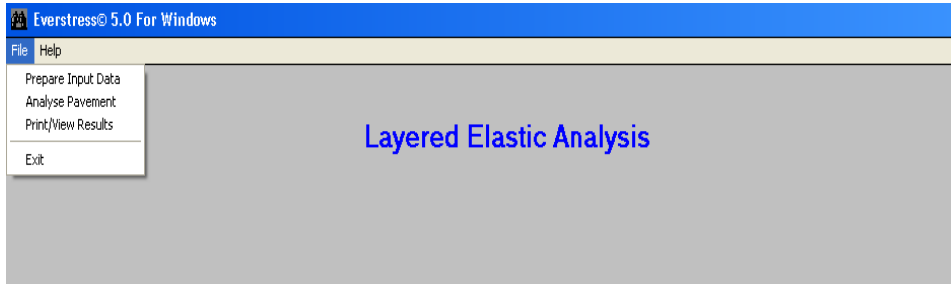
- **Software de análisis elástico Everstress.** Dicha aplicación consta de una pantalla principal, figura 24, donde se encuentra un menú de inicio con las opciones file y help.

FIGURA 32. 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 25.

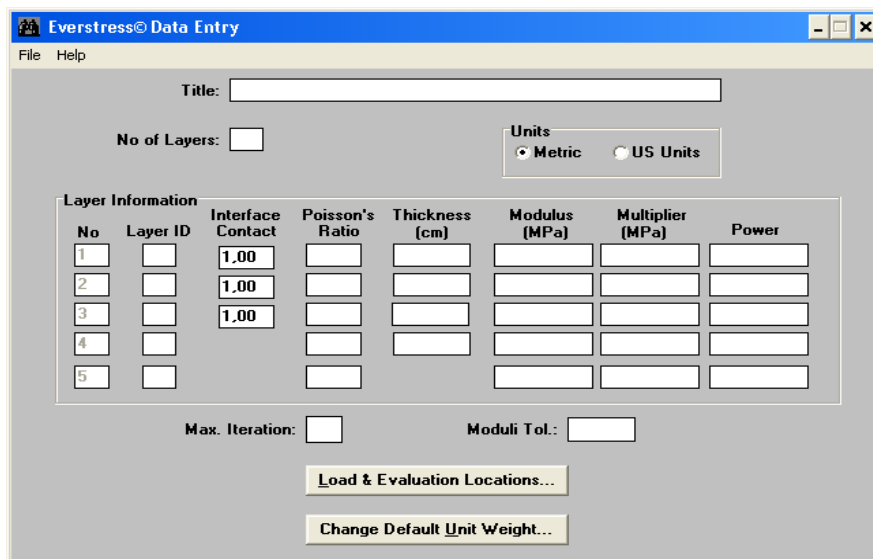
FIGURA 33.Opción file.



- **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 34.Ventana de entrada de datos de la estructura.



Este comando tiene otra opción (load & evaluation locations...) donde aparece otra ventana, figura 27, en la cual se ingresarán los datos de las cargas y de los puntos en los que se quiere evaluar los esfuerzos.

FIGURA 35. Ventana de entrada de datos de cargas y puntos de evaluación.

The image shows a software dialog box titled "Load & Evaluation Points". At the top, there are two input fields: "No of Loads:" and "No of X-Y Evaluation Points:". Below these are two main sections. The first section, "Load Information", contains five rows of input fields: "X-Position (cm)", "Y-Position (cm)", "Load (N)", "Pressure (kPa)", and "Radius (cm)". Each row has eight input boxes. The second section, "Evaluation Points", contains five rows of input fields: "X-Position (cm)", "Y-Position (cm)", and three rows of "Z-Position (cm)". Each row has eight input boxes. At the bottom center of the dialog is an "Exit" button.

- **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 36. 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)		Modul(1) (MPa)	
	1	.30	20.000		609.49	
	2	.40	20.000		341.55	
	3	.45	16.000		183.16	
	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)	Szy (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	31.46	31.46	-109.32	.00	.00
35.000	2	51.37	51.37	-76.58	.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	-523.85	.000	.000
25.000	2	266.77	266.77	-487.65	.000	.000
30.000	2	183.29	183.29	-393.79	.000	.000
35.000	2	179.90	179.90	-344.47	.000	.000
39.950	2	202.08	202.08	-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	-523.85	245.81
25.000	2	-155.13	14.29	14.29	-487.65	266.77
30.000	2	-109.32	31.46	31.46	-393.79	183.29
35.000	2	-76.58	51.37	51.37	-344.47	179.90
39.950	2	-55.94	78.08	78.08	-346.67	202.08

ANEXO B. MODELO ARCILLA CON ESPESOR DE SUBRASANTE DE 60CM.

Además de los diseños mostrados anteriormente, se trabajo con otro tipo de estructura de pavimento la cual estaba compuesta por las siguientes capas y espesores:

Tabla 15. Espesores de las capas de Estructura de pavimento ensayada.

CAPA	ESPESOR (cm.)
Carpeta asfáltica	20
Base	20
Subbase	16
Subrasante	60

Estos espesores son validos para los dos modelos trabajados (subrasante Arcillosa y subrasante Limosa). Este modelamiento fue realizado para verificar la influencia del espesor de la subrasante en la estructura de pavimento. A continuación se describen los diseños realizados

- Diseño del modelo compuesto de varios módulos por capa, subrasante de arcilla con espesor de 60 cm.

FIGURA 37. Modelo compuesto de varios módulos por capa, con subrasante de 60cm de espesor

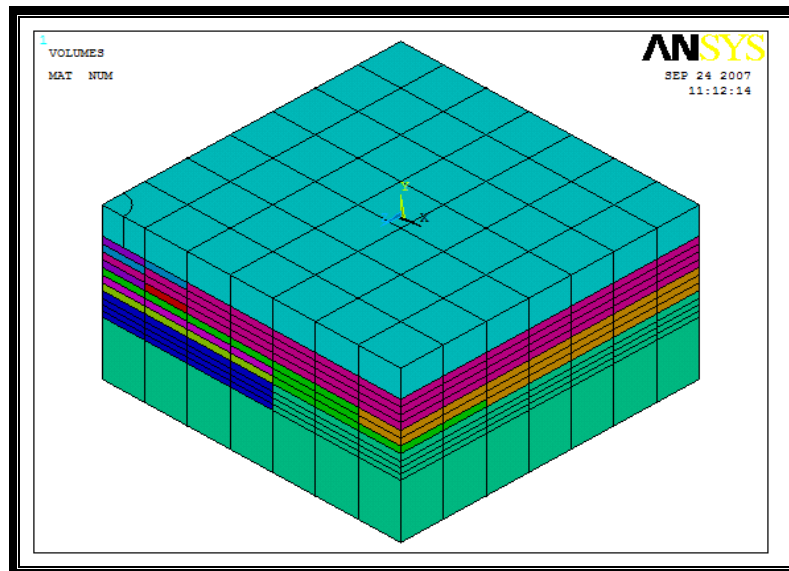


FIGURA 38. Enmallado modelo compuesto de varios módulos por capa, con subrasante de 60cm de espesor

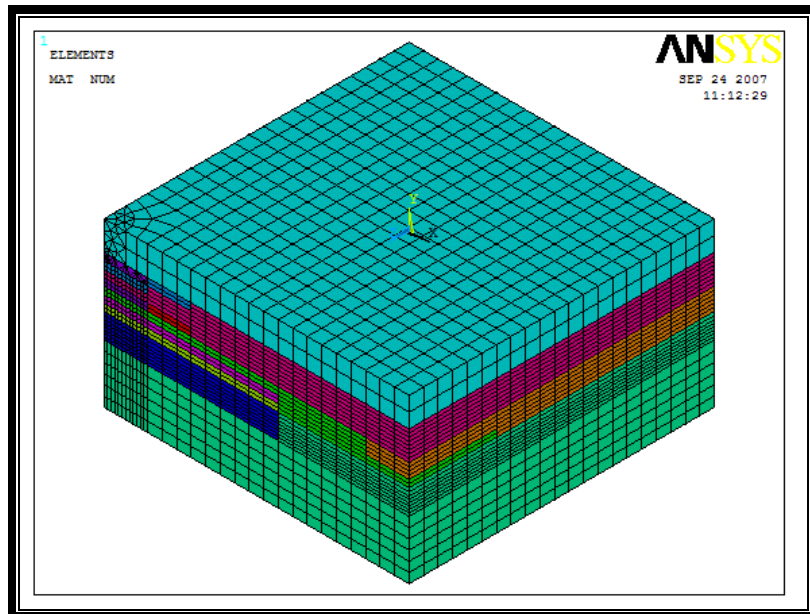
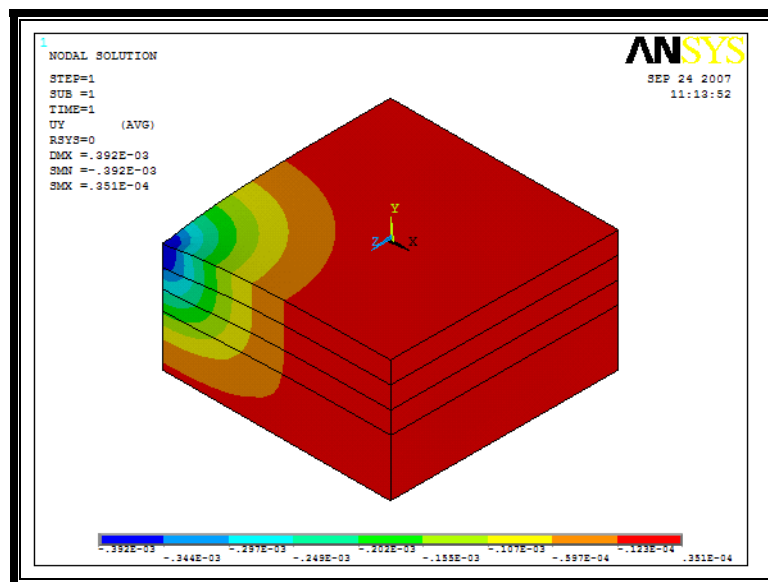


FIGURA 39. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS modelo compuesto de varios módulos por capa.



- Diseño del modelo con único módulo por capa, subrasante de arcilla con espesor de 60 cm.

FIGURA 40. Modelo con único módulo por capa, subrasante de arcilla con espesor de 60cm

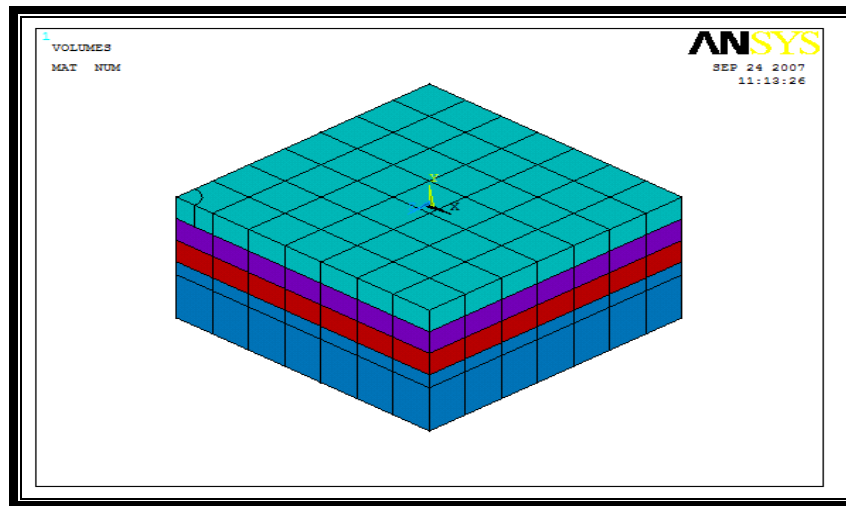


FIGURA 41. Enmallado modelo con único módulo por capa, subrasante de arcilla con espesor de 60cm

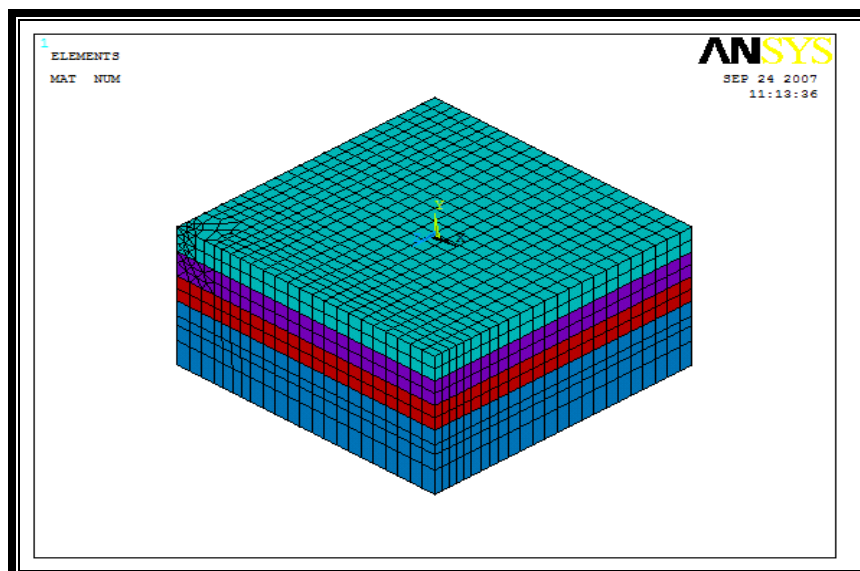
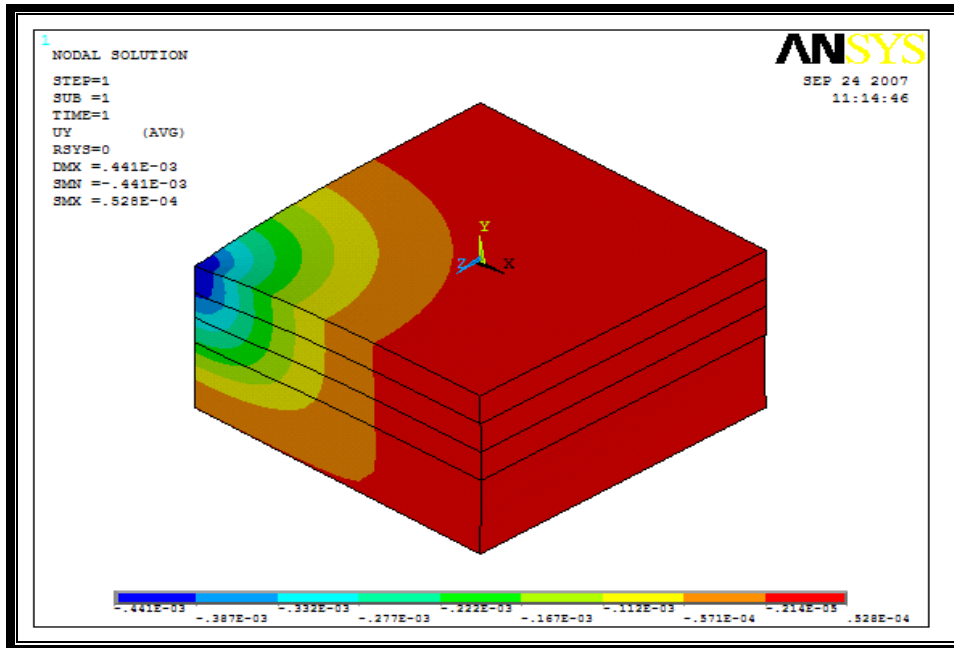


FIGURA 42. Distribución de las deformaciones arrojas por el programa ANSYS modelo con único módulo por capa.

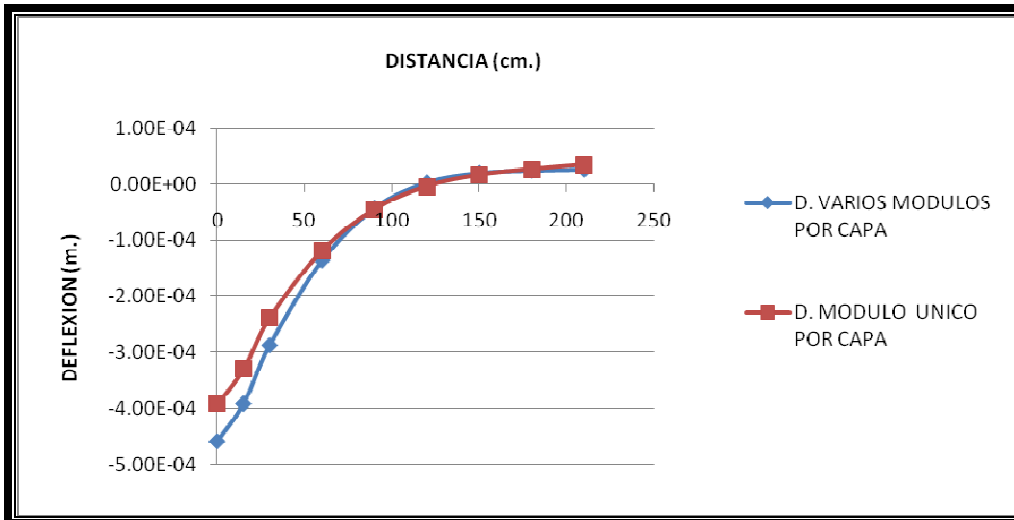


- Comparación entre modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa.

Tabla 16. Comparación de deflexiones modelo compuesto por varios módulos por capa contra modelo con único módulo por capa.

Distancia (cm.)	DEFLEXIONES (m.)	
	Modelo compuesto de Varios módulos por capa.	Modelo con único Módulo por capa.
0	-4.59E-04	-3.92E-04
15	-3.92E-04	-3.29E-04
30	-2.87E-04	-2.38E-04
60	-1.36E-04	-1.18E-04
90	-4.23E-05	-4.47E-05
120	3.37E-06	-3.92E-06
150	2.04E-05	1.64E-05
180	2.48E-05	2.68E-05
210	2.66E-05	3.48E-05

FIGURA 43. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa.

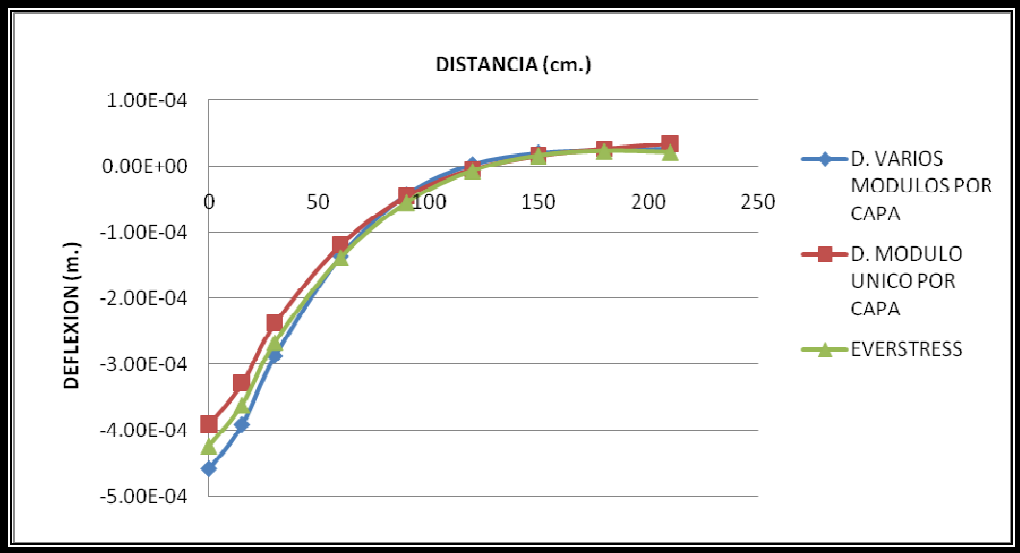


- Comparación entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.

Tabla 17. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS con espesor de 60cm

Distancia (cm.)	DEFLEXIONES (m.)		
	Modelo compuesto de varios módulos por capa.	Modelo con único módulo por capa.	EVERSTRESS
0	-4.59E-04	-3.92E-04	-4.24E-04
15	-3.92E-04	-3.29E-04	-3.62E-04
30	-2.87E-04	-2.38E-04	-2.67E-04
60	-1.36E-04	-1.18E-04	-1.38E-04
90	-4.23E-05	-4.47E-05	-5.51E-05
120	3.37E-06	-3.92E-06	-7.07E-06
150	2.04E-05	1.64E-05	1.58E-05
180	2.48E-05	2.68E-05	2.27E-05
210	2.66E-05	3.48E-05	2.08E-05

FIGURA 44. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS con espesor de 60cm



ANEXO C. DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO CON SUBRASANTE LIMO Y ESPESOR DE SUBRASANTE 60 cm

- Diseño de una estructura de pavimento con subrasante Limo y espesor de subrasante 60 cm.

FIGURA 45. Modelo compuesto de varios módulos por capa, con subrasante de limo y 60cm de espesor

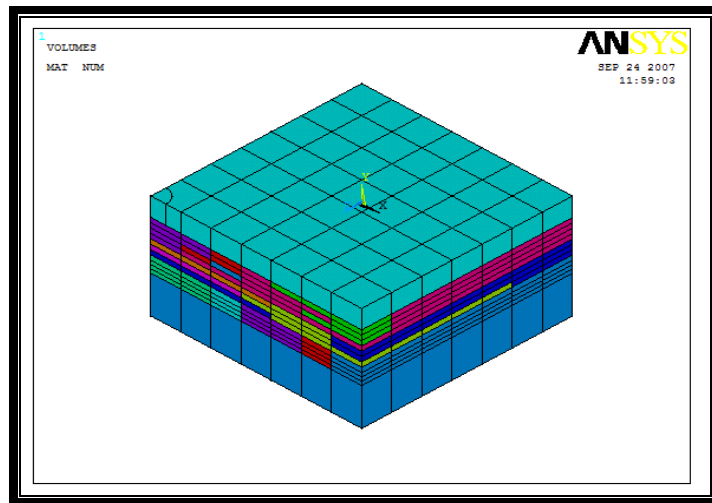


FIGURA 46. Enmallado modelo compuesto de varios módulos por capa, con subrasante de limo y 60cm de espesor

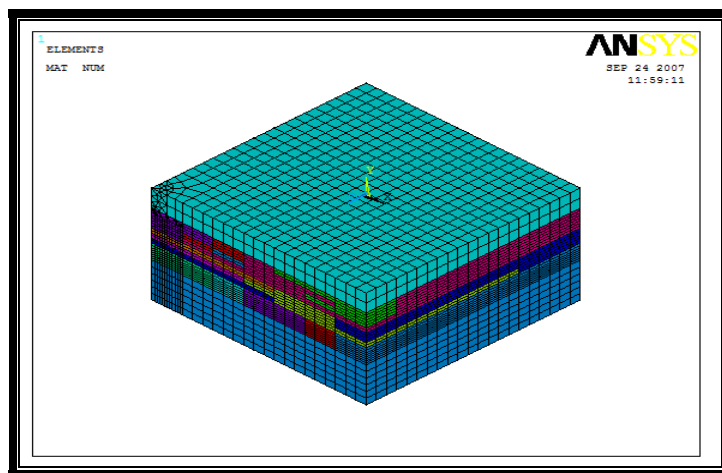
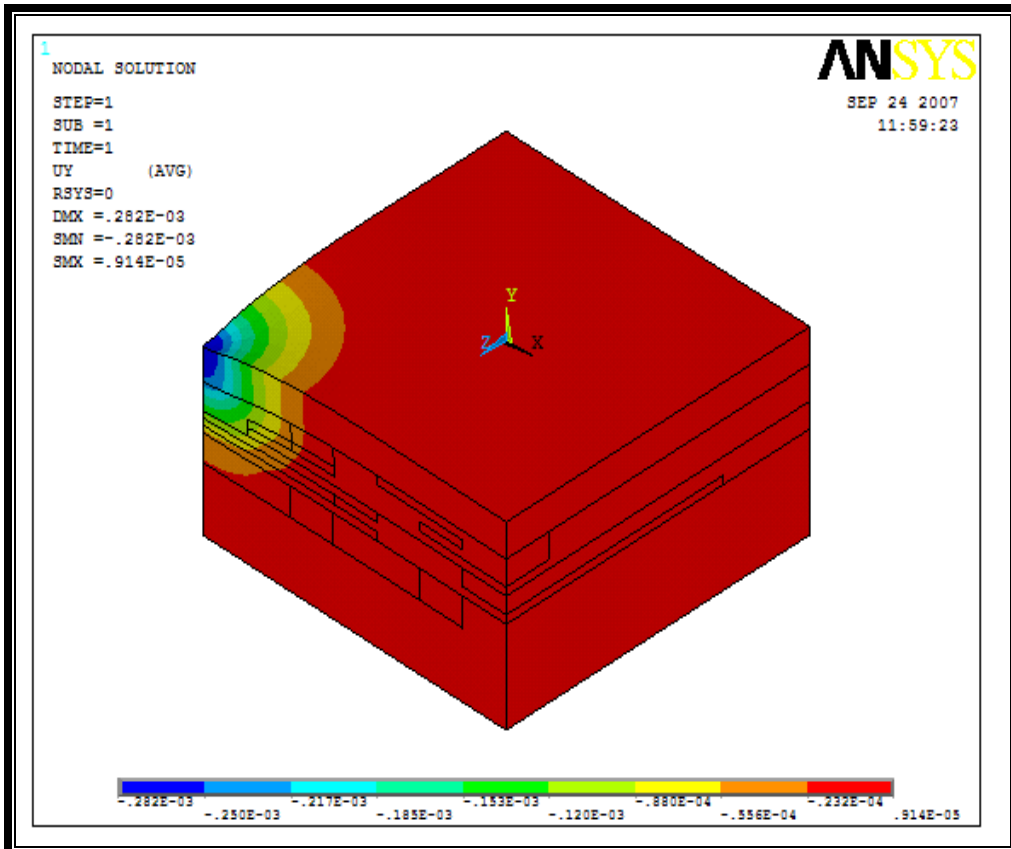


FIGURA 47. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS, modelo compuesto de varios módulos por capa, con subrasante de limo y espesor de 60cm.



- Diseño del modelo con único módulo por capa, subrasante de LIMO con espesor de 60 cm.

FIGURA 48. Modelo con único módulo por capa, con subrasante de limo y 60cm de espesor

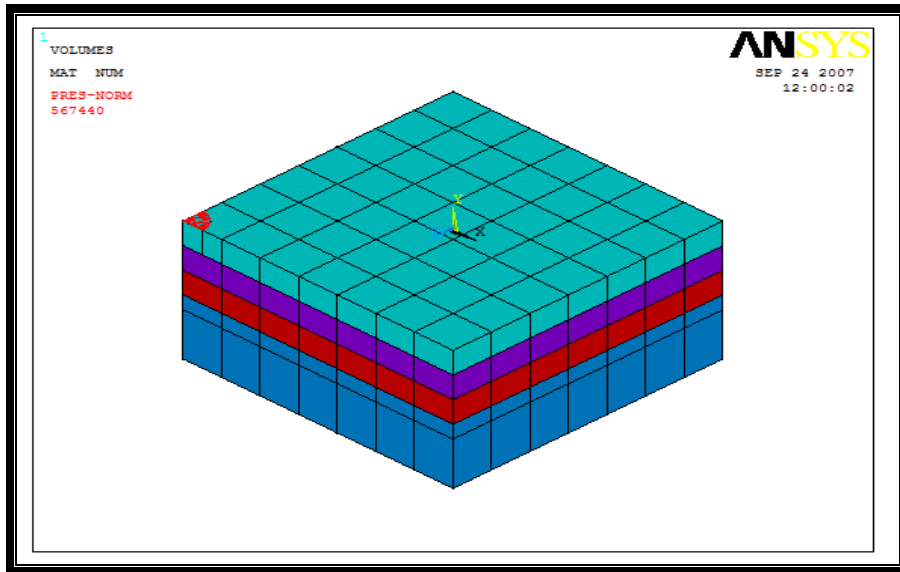


FIGURA 49. Enmallado modelo con único módulo por capa, con subrasante de limo y 60cm de espesor

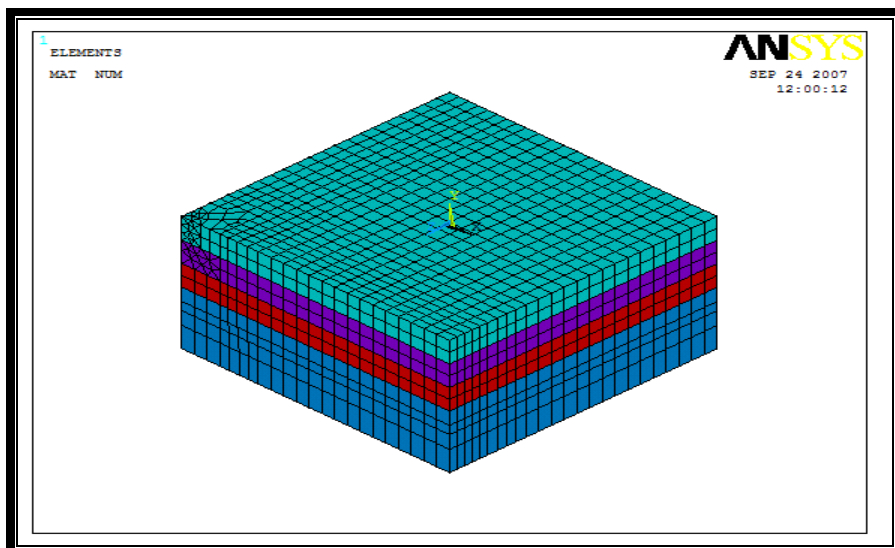
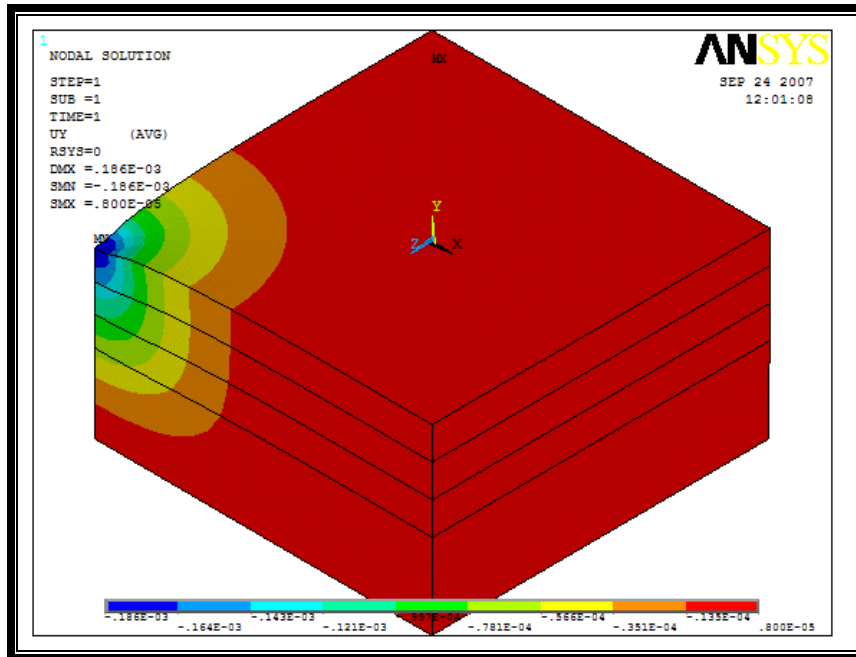


FIGURA 50. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS modelo con único modulo por capa, con subrasante de limo y espesor de 60cm

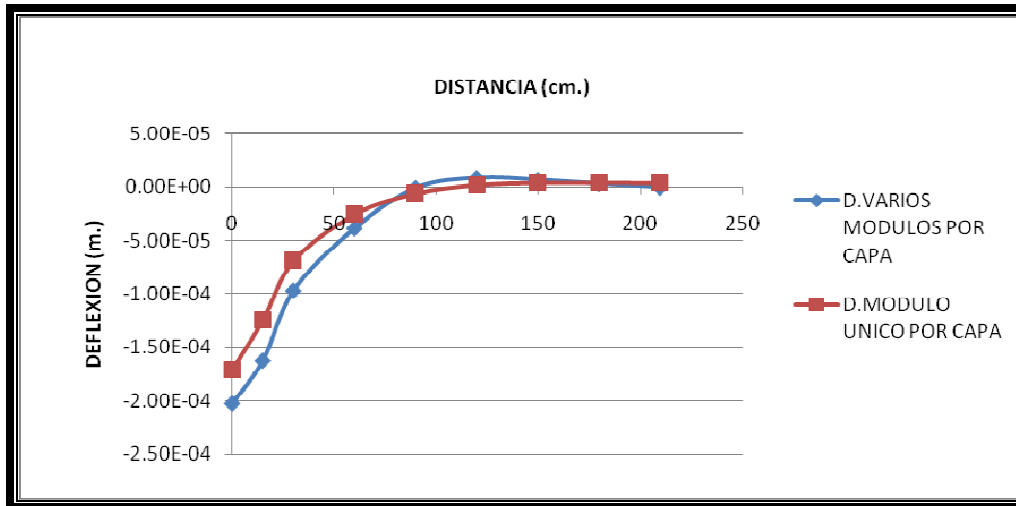


- Comparación entre modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa.

Tabla 18. Comparación modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa, con subrasante de limo y espesor 60cm.

Distancia (cm.)	DEFLEXIONES (m.)	
	Modelo compuesto de varios módulos por capa.	Modelo con único módulo por capa
0	-2.02E-04	-1.71E-04
15	-1.62E-04	-1.24E-04
30	-9.67E-05	-6.90E-05
60	-3.84E-05	-2.53E-05
90	-9.40E-07	-5.94E-06
120	8.71E-06	1.90E-06
150	6.89E-06	4.13E-06
180	3.09E-06	4.15E-06
210	-2.30E-07	3.92E-06

FIGURA 51. Comparación modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa, con subrasante de limo y espesor 60cm.

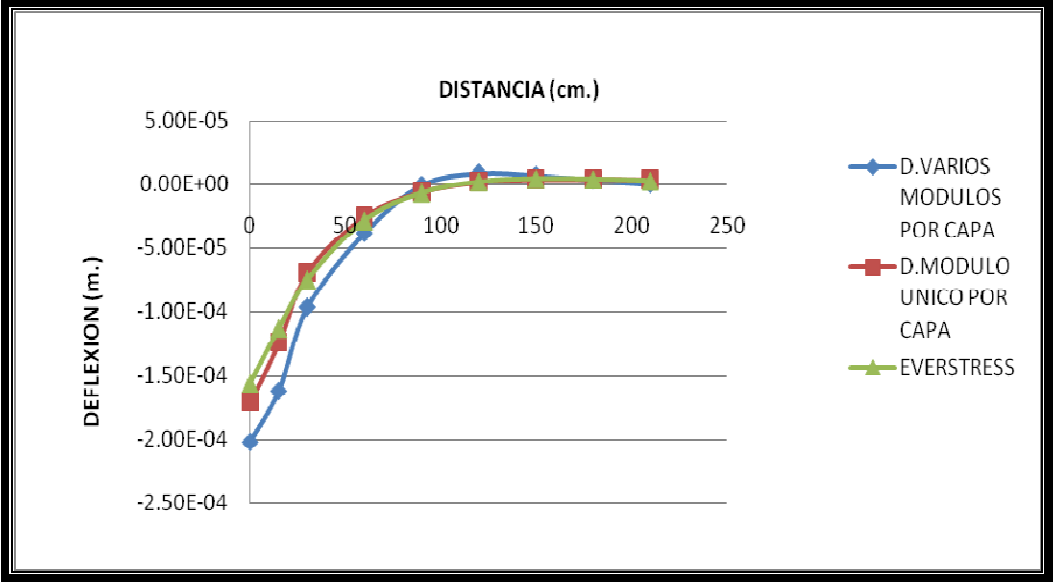


- Comparación entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.

Tabla 19. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.

Distancia (cm.)	DEFLEXIONES (m.)		
	Modelo compuesto de varios módulos por capa	Modelo con único modulo por capa	EVERSTRESS
0	-2.02E-04	-1.71E-04	-1.56E-04
15	-1.62E-04	-1.24E-04	-1.13E-04
30	-9.67E-05	-6.90E-05	-7.47E-05
60	-3.84E-05	-2.53E-05	-2.84E-05
90	-9.40E-07	-5.94E-06	-7.03E-06
120	8.71E-06	1.90E-06	1.84E-06
150	6.89E-06	4.13E-06	4.33E-06
180	3.09E-06	4.15E-06	3.93E-06
210	-2.30E-07	3.92E-06	2.61E-06

FIGURA 52. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS.



ANEXO D. DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO CON SUBRASANTE LIMO Y ESPESOR DE SUBRASANTE 5 cm

En este anexo se muestra el diseño de una nueva estructura de pavimento la cual tiene subrasante limosa y esta conformada por las siguientes capas:

Tabla 20. Espesores de la estructura de pavimento ensayada.

CAPA	ESPESOR (cm.)
Carpeta asfáltica	5
Base	20
Subbase	16
Subrasante	200

- Diseño del modelo compuesto de varios módulos por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

FIGURA 53. Modelo compuesto de varios módulos por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

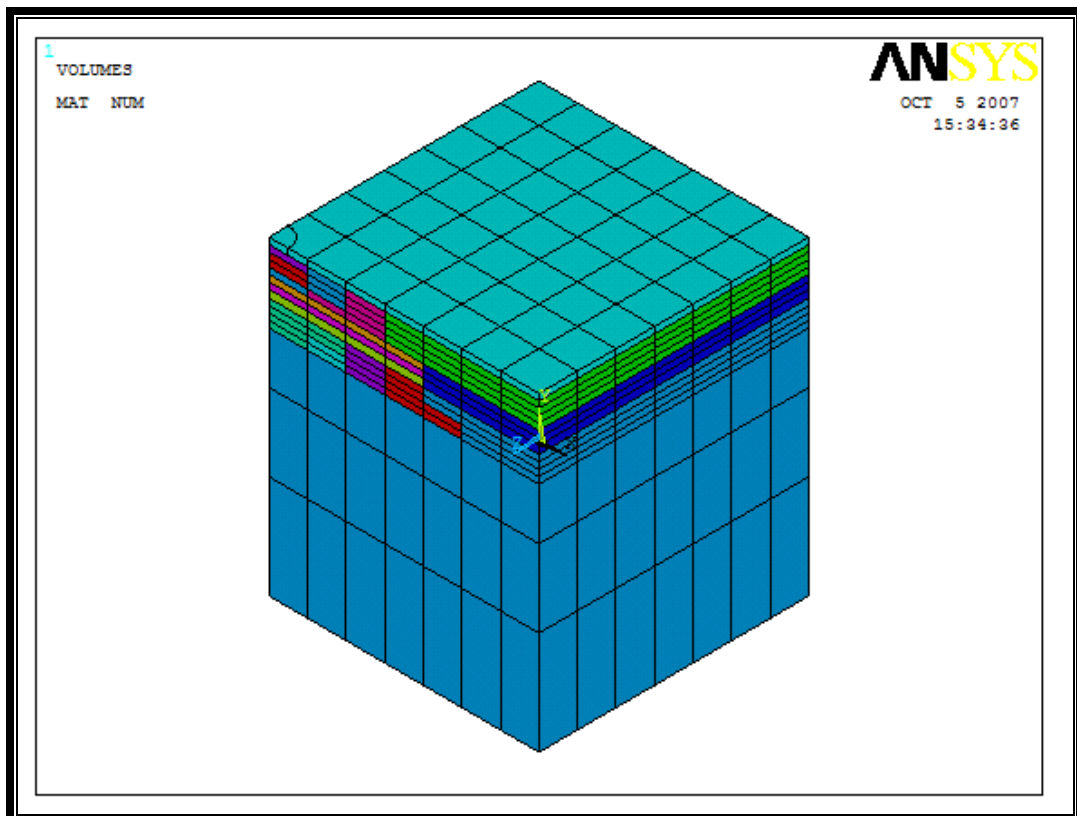


Tabla 21. Valores de módulos insertados a ANSYS modelo compuesto de varios módulos por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

CAPA	MODULOS INSERTADOS	
	# MODULO	VALOR(Mpa)
Carpeta Asfáltica	MODULO 1	1500
Base	MODULO 2	719.96
	MODULO 3	448.34
	MODULO 4	151.55
	MODULO 5	74.87
	MODULO 6	51.65
Subbase	MODULO 7	116.46
	MODULO 8	92.36
	MODULO 9	61.18
	MODULO 10	49.31
Subrasante	MODULO 12	126.33
	MODULO 13	156.91
	MODULO 14	215.13
	MODULO 15	279.34
	MODULO 16	357.89

La siguiente grafica muestra de manera detallada la distribución de los anteriores módulos en cada capa de la estructura de pavimento.

FIGURA 54. Distribución de módulos por capa

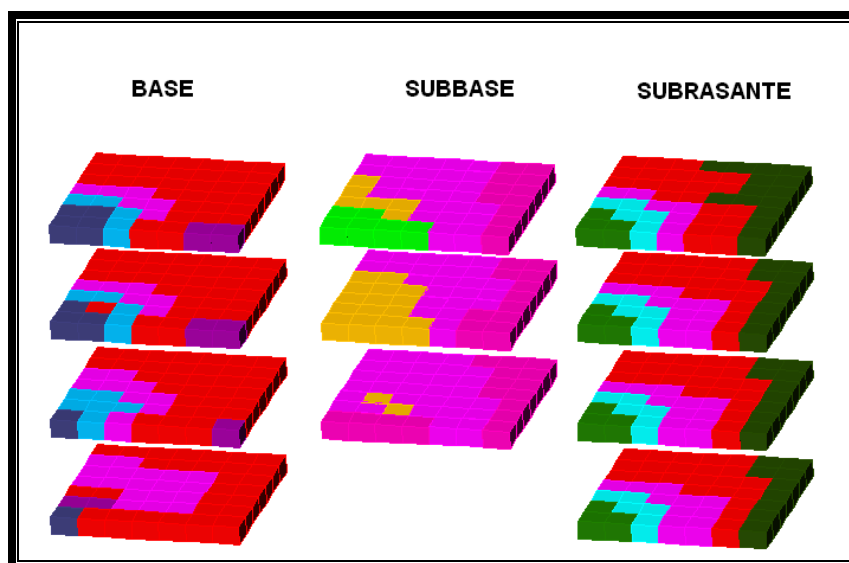


FIGURA 55. Enmallado modelo compuesto de varios módulos por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

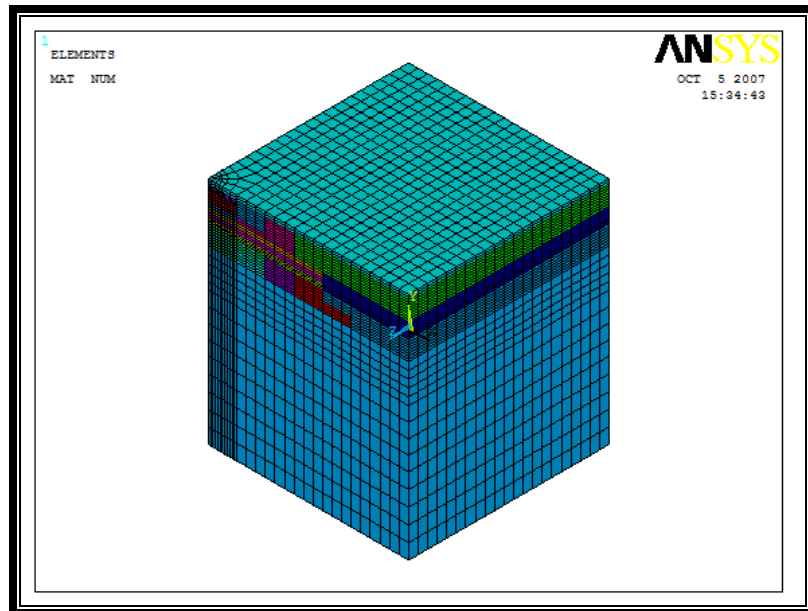
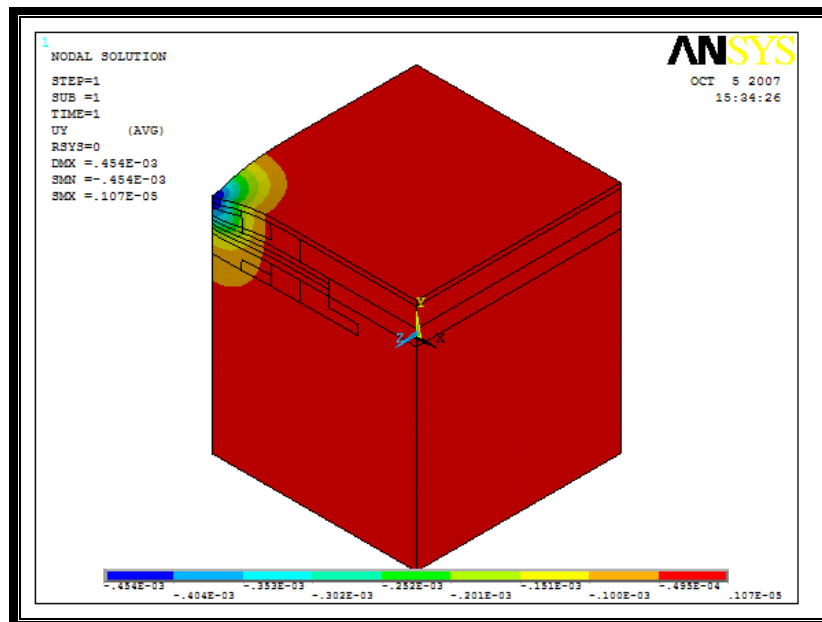


FIGURA 56. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS modelo compuesto de varios módulos por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.



- Diseño modelo con unico modulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

Este modelo esta caracterizado de la siguiente manera:

Tabla 22. Caracterización modelo con único módulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

CAPA	ESPESOR (cm.)	MODULO (MPa)
Carpeta asfáltica	5	1500
Base	20	586.44
Subbase	16	308.25
Subrasante	200	150.22

FIGURA 57. Modelo con único módulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

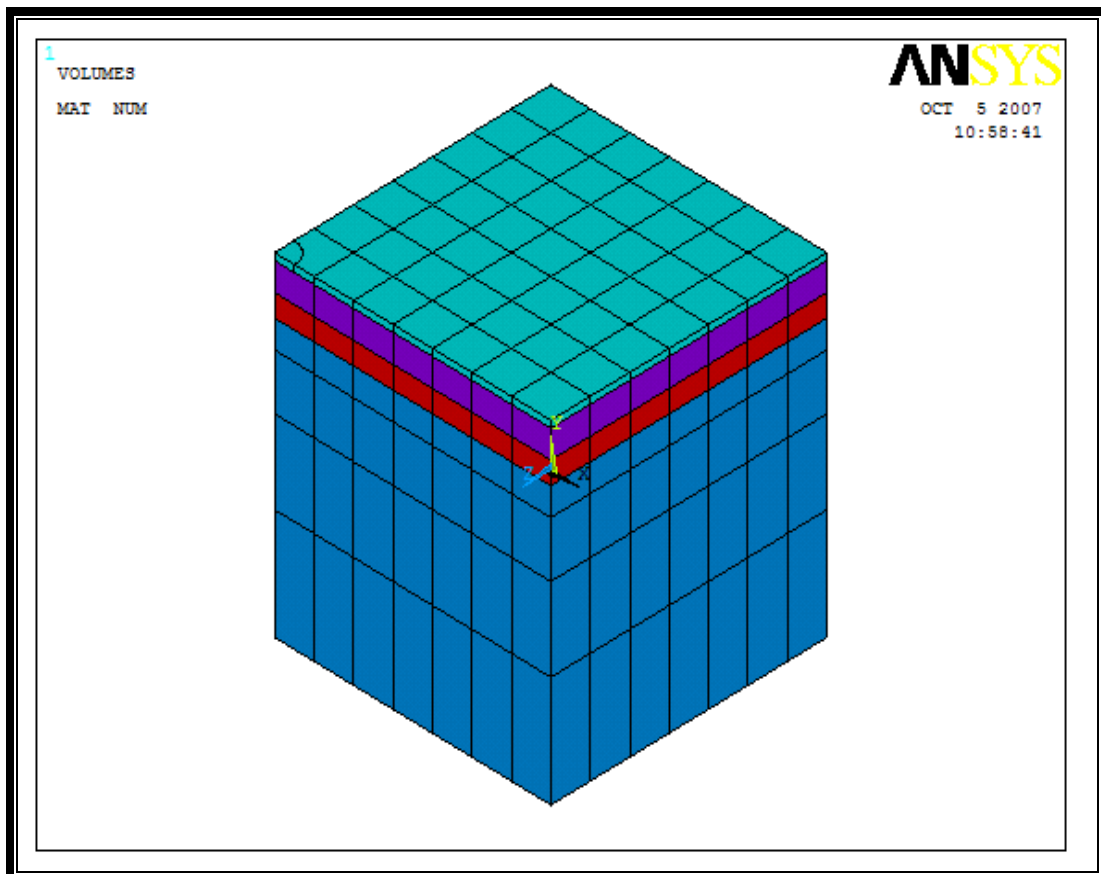


FIGURA 58. Enmallado modelo con único módulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

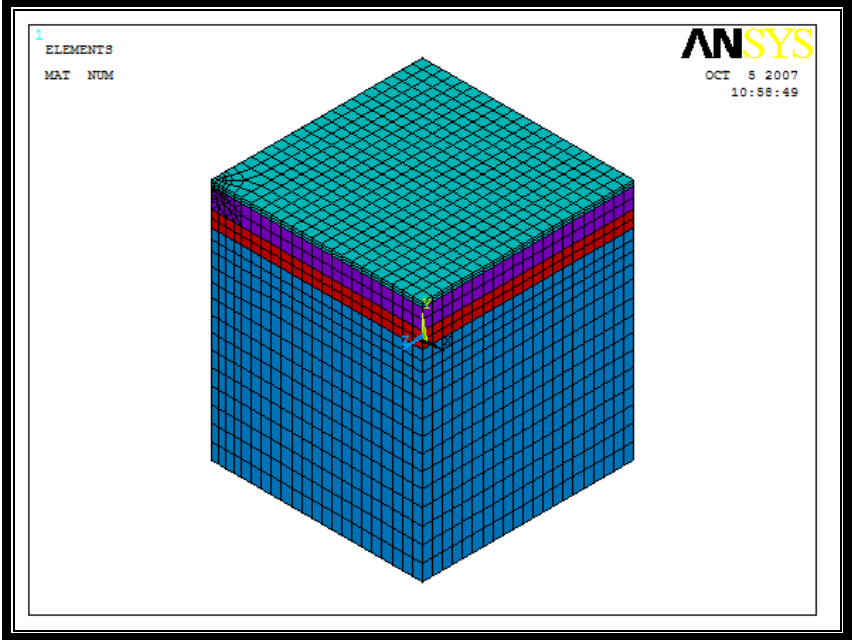
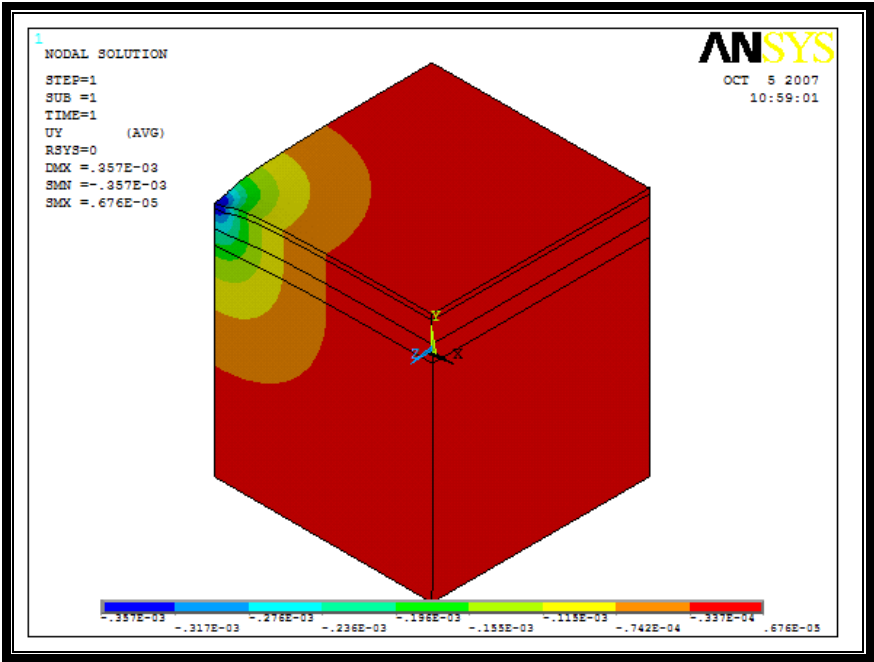


FIGURA 59. Distribución de las deformaciones arrojadas por el programa ANSYS modelo con único módulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

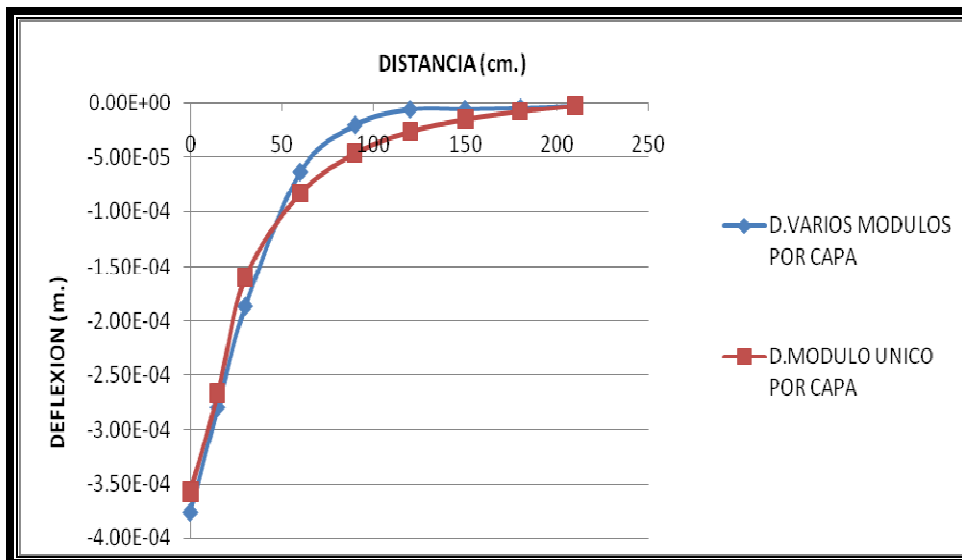


- Comparación entre modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa.

Tabla 23. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa y un modelo con único módulo por capa, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

DISTANCIA (cm.)	DEFLEXION (m.)	
	Modelo compuesto de varios módulos por capa	Modelo con único módulo por capa
0	-3.75E-04	-3.57E-04
15	-2.79E-04	-2.67E-04
30	-1.87E-04	-1.60E-04
60	-6.33E-05	-8.33E-05
90	-2.09E-05	-4.62E-05
120	-6.18E-06	-2.65E-05
150	-5.71E-06	-1.54E-05
180	-4.68E-06	-8.04E-06
210	-2.59E-06	-2.36E-06

FIGURA 60. Comparación modelo compuesto de varios módulos por capa y modelo con único módulo por capa, con subrasante de limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.



- Comparación entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

Tabla 24. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, un modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

DISTANCIA (cm.)	DEFLEXION (m.)		
	Modelo compuesto de varios módulos por capa	Modelo con único módulo por capa	D.EVERSTRESS
0	-3.75E-04	-3.57E-04	-3.47E-04
15	-2.79E-04	-2.67E-04	-2.57E-04
30	-1.87E-04	-1.60E-04	-1.49E-04
60	-6.33E-05	-8.33E-05	-7.23E-05
90	-2.09E-05	-4.62E-05	-3.53E-05
120	-6.18E-06	-2.65E-05	-1.59E-05
150	-5.71E-06	-1.54E-05	-5.57E-06
180	-4.68E-06	-8.04E-06	-2.73E-07
210	-2.59E-06	-2.36E-06	2.38E-06

FIGURA 61. Comparación de deflexiones entre el modelo compuesto de varios módulos por capa, modelo con único módulo por capa y EVERSTRESS, subrasante Limo y espesor de carpeta asfáltica 5 cm.

