

**IAG358-01-2013**

**MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA ESTRUCTURA DE UN  
PAVIMENTO FLEXIBLE VÍA EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO, FEM  
MODELAGEM DE ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL DE UM PAVIMENTO  
FLEXÍVEL ATRAVÉS DE MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITO, FEM**

Ing. Ernesto César Yanes López  
Tecnológico de Monterrey.  
Monterrey, México  
[e.yanes@itesm.mx](mailto:e.yanes@itesm.mx)

Dr. Carlos Humberto Fonseca Rodríguez  
Tecnológico de Monterrey  
Monterrey, México  
[carlos.fonseca@itesm.mx](mailto:carlos.fonseca@itesm.mx)

**Resumen:**

El uso de programas computacionales para el análisis de estructuras de pavimento nos da libertad de tener una imagen clara del comportamiento de las diferentes capas de la estructura de un pavimento. Se hace un estudio comparativo de diferentes métodos de análisis empezando desde la teoría básica hasta un modelo tridimensional por medio del método de elemento finito. Las ventajas que nos permite el uso de estos programas es que se pueden crear modelos tridimensionales donde podemos modificar libremente con las características de la sección transversal tales como el módulo de elasticidad de una estructura de pavimento o la geometría de la misma. Pero donde entra la parte más significativa es en la capacidad de que podamos simular diferentes casos de carga en los modelos desde crear un arreglo de ejes dual hasta un camión con 9 ejes para analizar. En este estudio se pretende simular el comportamiento de las carpetas asfálticas cuando varía su espesor partiendo de un radio “a”, que genera la huella de la llanta, al que contemplamos como un punto intermedio de partida para generar diferentes modelos con un espesor de magnitud mayor y menor que el radio “a”. En los resultados del estudio se identificó que la tendencia que se marcan los distintos métodos de análisis es parecida.

**Resumo:**

A utilização de programas de computador para analisar estruturas de pavimento dá liberdade de ter uma visão clara do comportamento das diferentes camadas da estrutura de um pavimento. Trata-se de um estudo comparativo de diferentes métodos de análise a partir da teoria básica de um modelo tridimensional poderoso através do método dos elementos finitos. As vantagens que ele permite a utilização destes programas é que eles podem criar modelos tridimensionais que podem alterar livremente as características da secção transversal, tais como o módulo de elasticidade de uma estrutura de pavimento ou mesmo de geometria. Mas de onde vem o mais importante é a capacidade que pode simular vários carregamento em modelos desde a criação de

um arranjo duplo eixo para um eixo de caminhão 9 para análise. Este estudo tem como objetivo para simular o comportamento de camadas de asfalto, quando a sua espessura varia de acordo com um raio "a", o que gera a pegada do pneu, o qual vemos como intermediário a partir de um ponto de partida para gerar modelos diferentes com uma espessura de magnitude maior e menor do que o raio "a". Os resultados do estudo identificou a tendência que marcou os diferentes métodos de análise é similar.

## INTRODUCCIÓN

El análisis de estructuras de pavimento utilizando el método de elemento finito nos da libertad de realizar el análisis para diferentes arreglos de capas de pavimento, esto es variando su geometría y sus propiedades físicas. Un punto muy especial y atractivo, es que tenemos la libertad de representar desde el efecto de una llanta hasta el efecto de una configuración de 9 ejes de un tráiler de doble semi remolque o la configuración que se desee.

En este artículo se pretende comparar modelos de pavimento flexible utilizando tres métodos de análisis distintos donde el espesor de la carpeta asfáltica varía de 0.5a hasta 1.5a aumentando en intervalos de 0.5a, siendo "a" el radio del área de la huella de contacto, hasta llegar al límite superior.

Esperamos que con este tipo de análisis aumente el uso de las tecnologías de la información para facilitar los cálculos de las diferentes vertientes que existen en la Ing. Civil.

## Metodología

El análisis de los modelos se realizó en tres etapas:

- Modelo Teórico
- Modelo Bidimensional CEDEM
- Modelo Tridimensional Multiphysics

### *Modelos*

#### *Modelo Teórico*

Para evaluar de manera completa y tener un punto de comparación teórico se hace el análisis con las ecuaciones del libro Pavement Analysis and Design (Yang, 2003) que nos permite obtener los esfuerzos y deformaciones debajo de una placa circular donde se simula la carga de una llanta en un radio "a" que se obtiene de la relación entre la presión de inflado y la carga. En las ecuaciones el subíndice de  $z$  representa al eje vertical o gravitacional, y el subíndice  $r$  representa al eje horizontal o tangencial.

$$\sigma_z = q \left[ 1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)q}{E} \left[ 1 - 2\nu + \frac{2\nu z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[ 1 + 2\nu - \frac{2(1+\nu)z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{(1+\nu)q}{2E} \left[ 1 - 2\nu + \frac{2(1-\nu)z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (4)$$

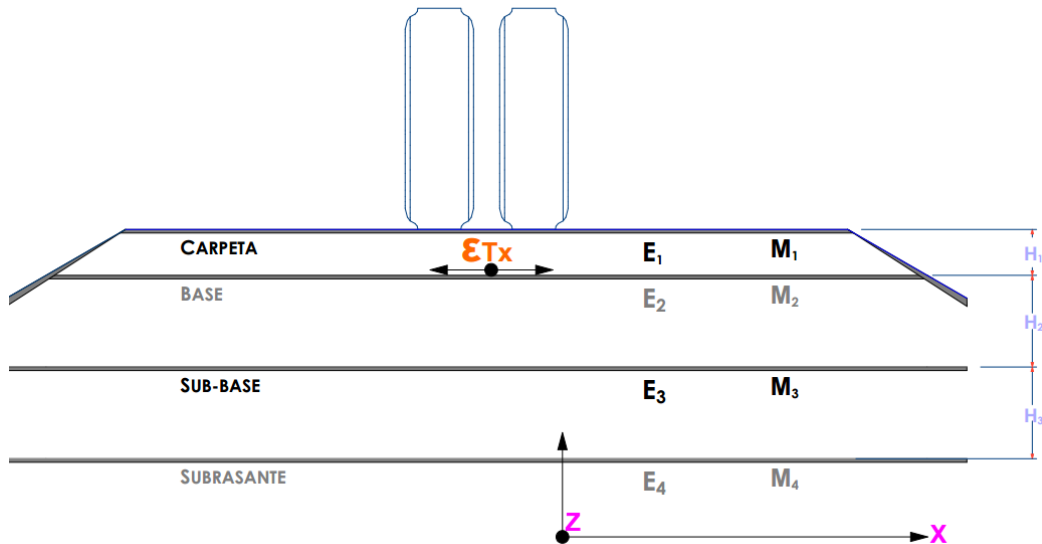
Partiendo de las ecuaciones anteriores obtenemos la deformación tangencial en la última fibra inferior de la carpeta asfáltica que es la que utilizaremos para comparar cada uno de los modelos en sus diferentes modos de análisis.

#### Modelo Bidimensional CEDEM

Para que el análisis tenga distintos puntos de comparación además de la teoría se decidió evaluar los modelos de forma bidimensional utilizando el programa CEDEM hecho por el Dr. Reyes y el Ing. Delgado. Este programa se basa en un análisis elástico multicapa que permite el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones partiendo de las características físicas y geométricas de las diferentes capas de los modelos que se vayan a estudiar.

La estructura de los modelos que calculamos se basa en el siguiente diagrama, donde las características físicas y geométricas se describen en la tabla 1 donde se sigue la misma nomenclatura ( $E_i$ : *Modulo de Elasticidad* ( $\text{Kg/cm}^2$ ),  $M_i$ : *Coefficiente de Poisson* y  $H_i$ : *Espesor* ( $\text{mm}$ )) que se utiliza en la Figura 1 para describir las diferentes capas que la componen.

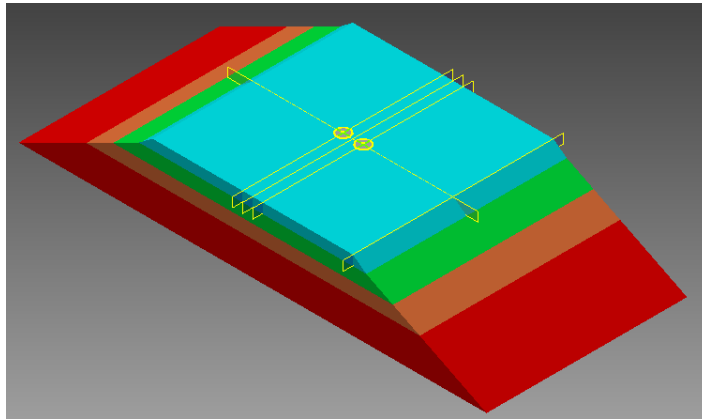
**Figura 1. Estructura de Modelo Bidimensional**



### Modelo Tridimensional Multiphysics.

Con el modelo teórico y bidimensional hecho podemos comenzar a desarrollar el modelo tridimensional de la estructura de pavimentos en el programa Inventor donde se comenzó a diseñar cada una de las capas para que posteriormente se puedan ensamblar en el mismo programa y formar la estructura completa de pavimento. Ya que contamos con la estructura ensamblada, del programa Inventor trasladamos el modelo al programa Multiphysics para configurarlo con las características físicas que se describen en la tabla 1 y obtener las deformaciones que compararemos con los otros modelos.

**Figura 2. Modelo Tridimensional**



### Definición de Modelos

Para organizar la geometría que se utilizó en tres modelos empezamos por delimitar la primera capa que se hará en base a el radio “a” que se definió utilizando una presión 100 psi de donde por medio de ecuaciones de diseño de asfaltos obtenemos una “a” igual a 100mm, donde en el primer modelo se tiene una carpeta asfáltica de 50mm, en el segundo 100mm y en el tercero de 150mm. En las siguientes capas como la Base y Subrasante se definen con un espesor de 200mm cada una obteniendo una estructura por encima de la Subrasante de 450mm a 550mm.

Las características físicas del modelo se describen en la Tabla 1 a continuación:









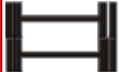





**Tabla 1. Secciones Transversales Utilizadas. Nomenclatura: T: Tipo(A: Asfáltica, H: Hidráulica, C: Cementada),  $E_i$ : Modulo de Elasticidad ( $\text{Kg/cm}^2$ ),  $M_i$ : Coeficiente de Poisson y  $H_i$ : Espesor (mm)**

Sección	Carpeta				Base				Sub-Base				Subrasante			
	T	$E_1$	$\mu_1$	$H_1$	T	$E_2$	$\mu_2$	$H_2$	T	$E_3$	$\mu_3$	$H_3$	T	$E_4$	$\mu_4$	$H_4$
1	A	4e4	0.3	50	A	2.5e4	0.3	200	-	0.45e4	0.35	200	-	0.16e4	0.40	-
2	A	4e4	0.3	100	A	2.5e4	0.3	200	-	0.45e4	0.35	200	-	0.16e4	0.40	-
3	A	4e4	0.3	150	A	2.5e4	0.3	200	-	0.45e4	0.35	200	-	0.16e4	0.40	-

### Configuración de Carga

La carga que se está tomando se define en base a la Norma 012 de pesos y dimensiones de la SCT de México, donde utilizamos la carga de un eje tándem de 17 toneladas sugerida en la Tabla A de esta norma que se muestra a continuación en la Figura 3.

**Figura 3. Tabla de la Norma 012 de Pesos y Dimensiones**

CONFIGURACION DE EJES			TIPO DE CAMINO			
			ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
		SENCILLO DOS LLANTAS	6,50	6,00	5,50	5,00
		SENCILLO CUATRO LLANTAS	10,00	9,50	8,00	7,00
		MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	11,00	10,50	9,00	8,00
		MOTRIZ DOBLE O TANDEM SEIS LLANTAS	15,00	13,00	11,50	11,00
		DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	17,00	15,00	13,50	12,00
		MOTRIZ DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	18,00	17,00	14,50	13,50
		TRIPLE O TRIDEM DOCE LLANTAS	23,50	22,50	20,00	NA

La configuración que se analizó en los diferentes modelos se establece en base a la carga antes mencionada de 17 toneladas dividida entre las 8 llantas del eje tándem recibe 2.125 toneladas por llanta. La carga es transmitida en por medio del área de contacto en forma circular que tiene un radio “a” de 100mm como se mencionó anteriormente.

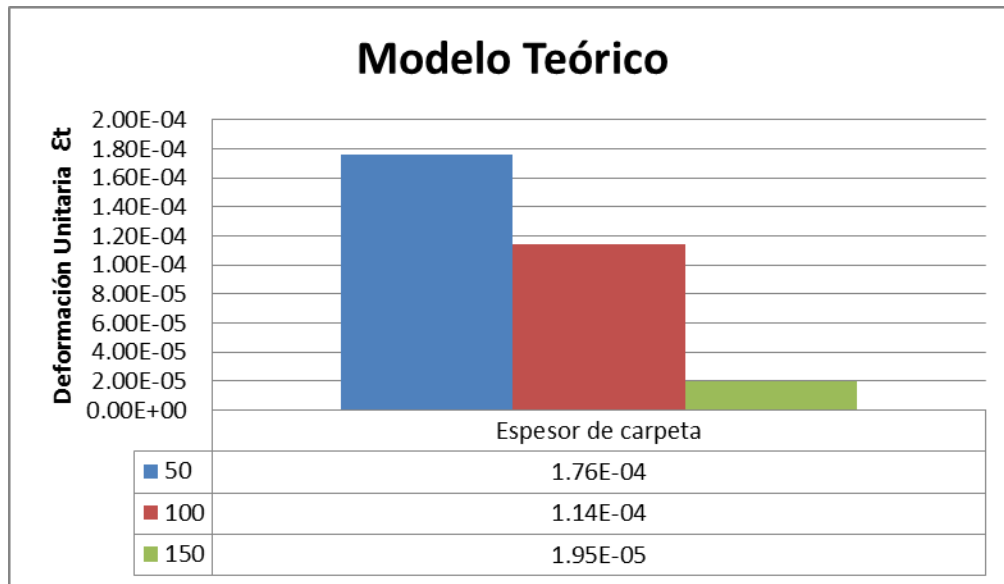
## Análisis de Resultados

### Resultados de Modelos

#### Resultados Modelo Teórico

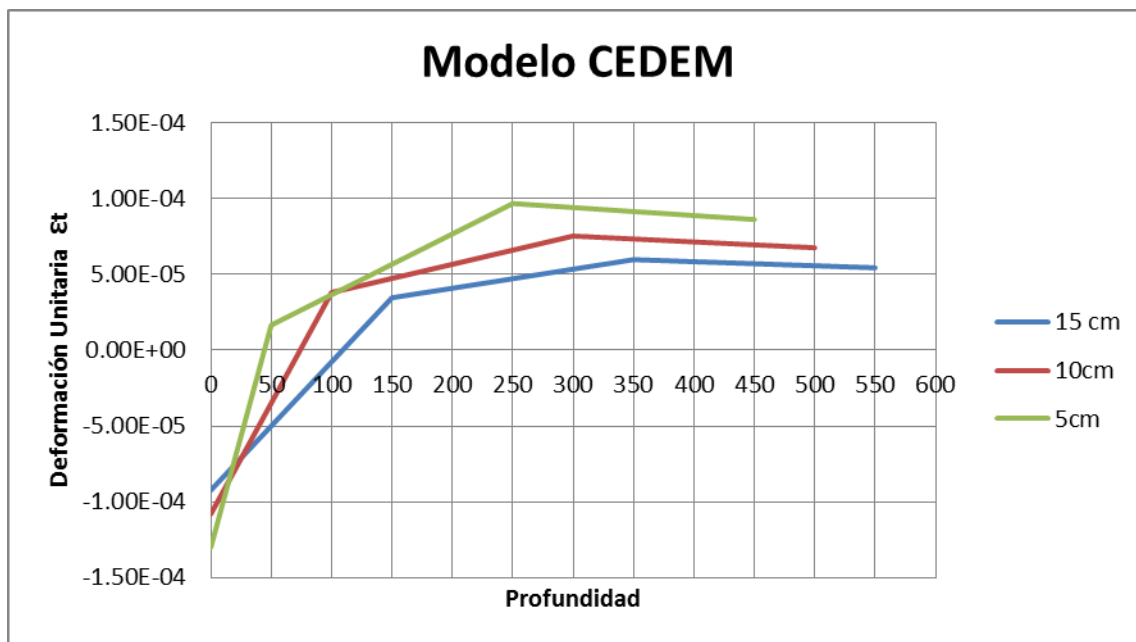
A partir de las ecuaciones de la parte 2.1.1 se obtienen las siguientes deformaciones

**Figura 4. Gráfica Deformaciones Unitarias en el Modelo Teórico**



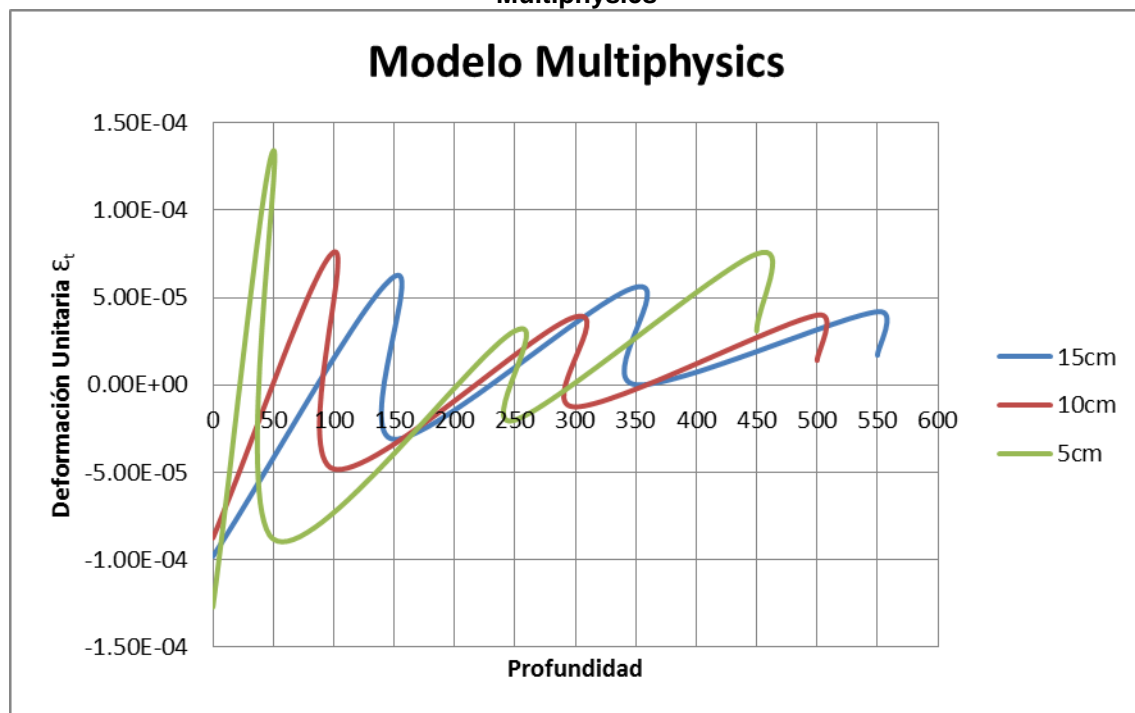
#### Resultados Modelo Bidimensional CEDEM

**Figura 5. Gráfica Deformaciones Unitarias en el Modelo Bidimensional CEDEM**



Resultados Modelo Tridimensional Multiphysics

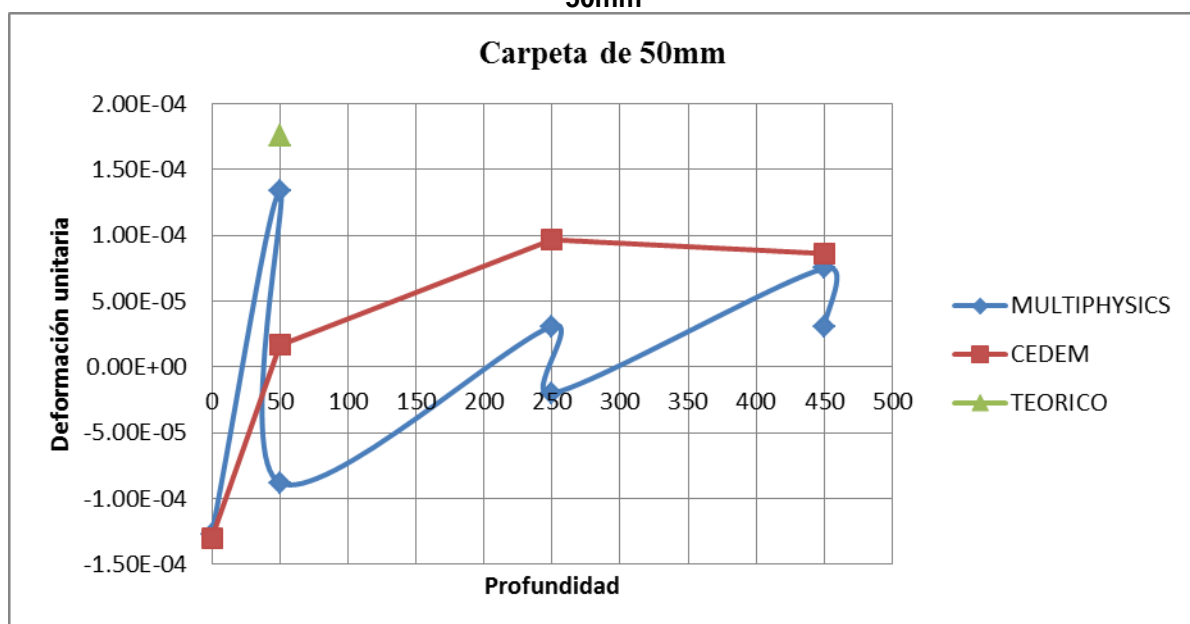
Figura 6. Gráfica Deformaciones Unitarias en el Modelo Tridimensional Multiphysics



Resultados Por Espesor de Carpeta

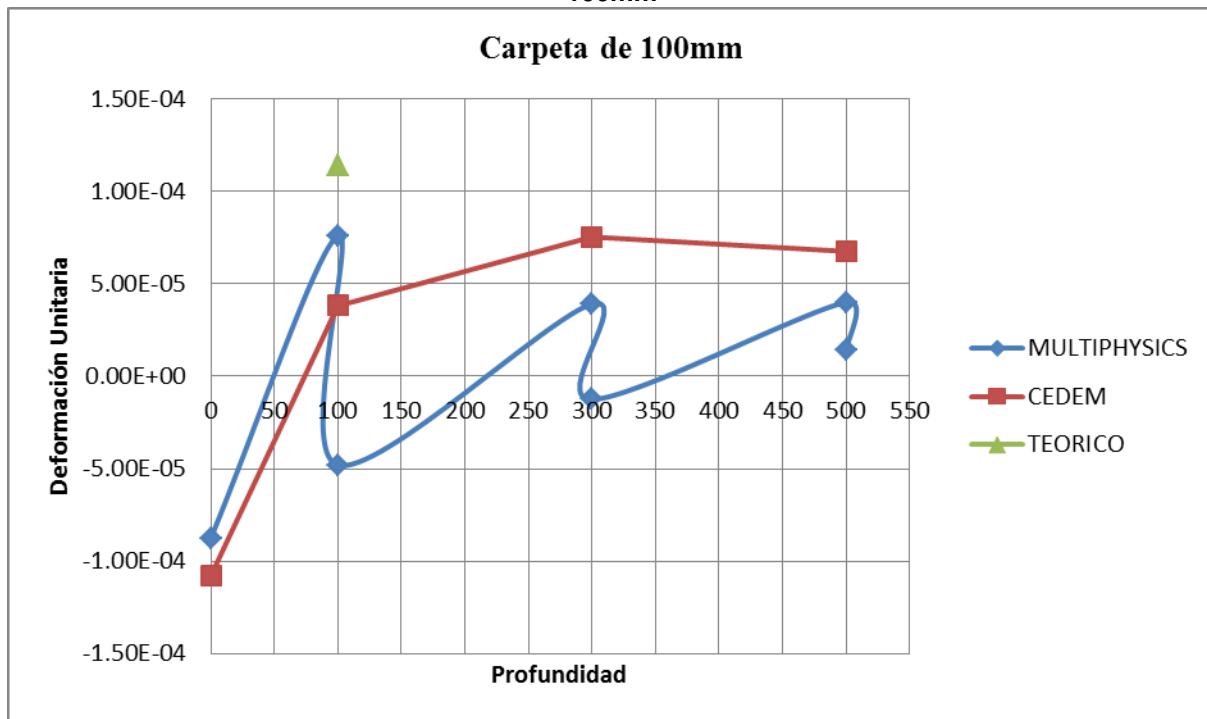
Carpeta de 50 mm

Figura 7. Gráfica Deformaciones Unitarias en Carpeta de 50mm



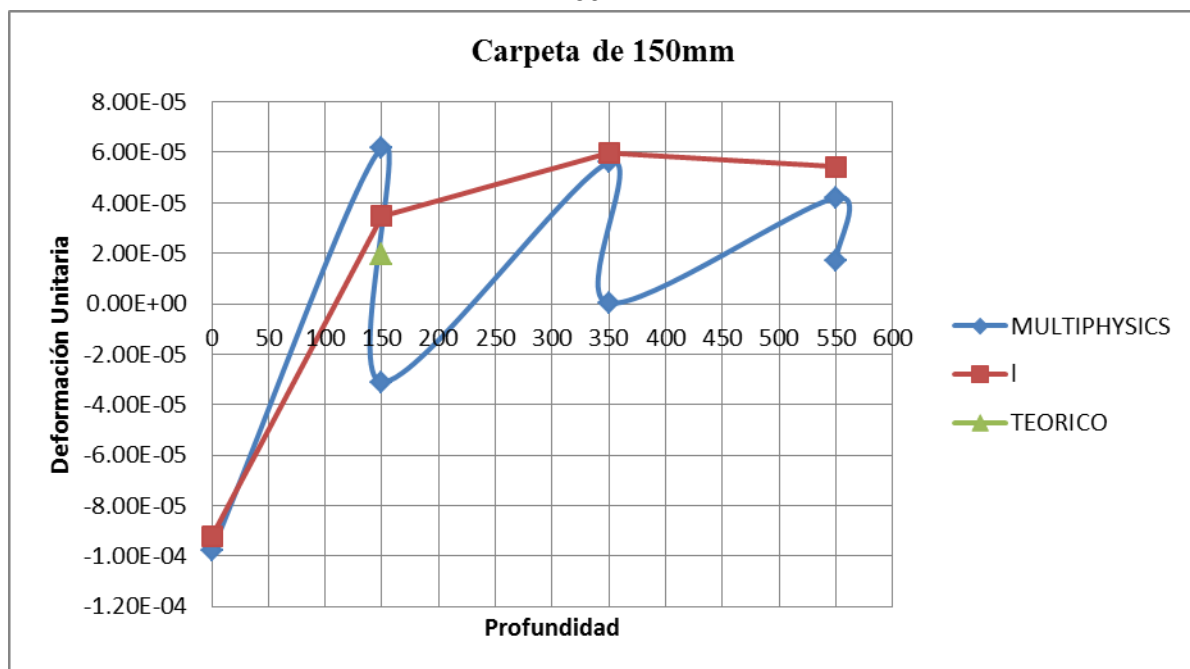
Carpeta de 100 mm

Figura 8. Gráfica Deformaciones Unitarias en Carpeta de 100mm



Carpeta de 150 mm

Figura 9. Gráfica Deformaciones Unitarias en Carpeta de 150mm





### *Interpretación de Resultados.*

Se comenzará comparando los resultados por tipo de modelo esto es los resultados del modelo teórico, bidimensional y tridimensional.

En la Figura 4 se comparan las deformaciones unitarias obtenidas por medio del modelo teórico de la última fibra inferior de la carpeta asfáltica para los 3 casos. Podemos apreciar que la carpeta que sufre más deformación al ser aplicada la carga es la de 50mm de espesor, siguiendo la carpeta de 100mm baja la deformación 35% y la que menos sufre es la carpeta de 150mm teniendo 89% menos deformación que la carpeta de 50mm.

En el modelo bidimensional de CEDEM podemos observar con ayuda de la Figura 5 que la deformación en la carpeta de 50mm es menor que la del modelo de 150mm, que es lo que reflejó el modelo teórico, quedando los resultados de la carpeta de 100mm con la deformación más alta.

Pasando a la Figura 6 se repite el comportamiento del modelo teórico empezando con la deformación más alta la carpeta de 50mm, siguiendo la carpeta de 100mm y finalizando la carpeta de 150mm. Podemos observar el comportamiento de las deformaciones en el límite de capa y capa donde se muestra que la tendencia en cada capa es de compresión en donde comienza cada capa y conforme se aleja hacia al límite con la siguiente capa vamos obteniendo tensión.

Para comparar las diferentes geometrías de pavimentos que se analizaron pasamos a comparar de la figura 7 a la 9 que son gráficas que muestran los resultados de los tres modelos dependiendo de la carpeta asfáltica.

En la Figura 7 que muestra la gráfica de la carpeta de 50mm podemos observar que el modelo tridimensional y el modelo teórico arrojan resultados no muy lejanos, comparándolo con lo que arrojó el modelo bidimensional. Después de la primera capa la tendencia va hacia el mismo orden de deformación en la Subrasante.

En la carpeta de 100mm podemos observar con la Figura 8 que las deformaciones con los tres modelos tienen la misma tendencia en la carpeta asfáltica, y en las demás capas con los modelos bidimensional y tridimensional.

Y en la Figura 9 que muestra los resultados de la carpeta de 150mm observamos que las deformaciones no son muy diferentes y de la misma manera la tendencia sigue con los modelos bidimensional y tridimensional cuando avanza la profundidad.

### **CONCLUSIONES.**

Utilizando diferentes métodos de análisis para obtener las deformaciones que sufren tres estructuras de pavimentos con diferente espesor de carpeta asfáltica podemos observar que la tendencia es la siguiente: Entre más delgada es la carpeta asfáltica esta sufre más deformaciones unitarias.

Los métodos de análisis que se utilizaron muestran resultados que varían considerablemente pero que muestran la misma tendencia de comportamiento cuando se aplica una carga. La ventaja en

algunos modelos es la rapidez con la que se hace el cálculo ya, que entre más complejo es el método de análisis el tiempo que se le invierte también aumenta.

La ventaja de utilizar el método de elemento finito es que obtenemos una fotografía del comportamiento que se presenta dentro de la estructura que se está analizando, lo cual es muy ilustrativo para entender el comportamiento de los materiales y comprender el área de influencia de la carga en las distintas capas que componen a una sección transversal.

## **Referencias.**

Fonseca, Carlos H. (2011). *Proyecto Estructural de Pavimentos Asfálticos*, Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, México D.F.

Huang, Yang H. (2003). *Pavement Analysis and Design*, Second Edition, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA., p. 45.-46.

Papagiannakis, A. T., and Masad, E. A., (2008), *Pavement Design and Materials*, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

Reyes, F., Delgado Jairo. (2003). *CEDEM*. Programa Computacional.

Yoder, E. J. and Witczak, M. W., (1975), *Principles of Pavement Design*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.