

# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
COLEGIO DE INGENIERÍA CIVIL**

**“Retrocálculo de Módulos Elásticos Aplicado a  
Pavimentos Flexibles”**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**INGENIERO CIVIL**

Presenta:

**Sebastián Luis Cortés**

Asesor:

**M.I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez**

Co-asesor:

**M.I. Carlos Bustos Mota**

Puebla, Pue.

Septiembre 2019

## AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a mi asesor el M.I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez por brindarme su amistad, apoyo, paciencia y dedicación en la realización de esta tesis y por permitirme desarrollar mis conocimientos y habilidades en el área de las vías terrestres gracias a sus cursos y capacitaciones impartidas.

A mi co-asesor el M.I. Carlos Bustos Mota por el apoyo incondicional brindado en el proceso y realización de esta tesis.

A Rosita Martínez por darme la oportunidad de desarrollar esta tesis en la empresa Ergon Asfaltos México y de esta manera permitirme poner en práctica mis conocimientos y desarrollar nuevas habilidades durante mi estancia.

Al M.I. José de Jesús Espinosa por su amistad y por compartir sus conocimientos sobre “Las Vías Terribles”.

Un agradecimiento al Dr. Luis Guillermo Loría Salazar y a su equipo de trabajo del Laboratorio Nacional de Modelos Matemáticos (LANAMME) de la Universidad de San José Costa Rica, por permitir el uso de la herramienta de cálculo PITRA-BACK

A la Facultad de Ingeniería.

¡Gracias!

**A mi padre.**

Por los valores transmitidos siendo determinantes a lo largo de mi vida.

**A mis hermanos.**

Por brindarme su apoyo y estar al pendiente de mí en toda la carrera, por llenarme de consejos y palabras de aliento para seguir firme en este camino.

**A la familia Romero Cortés.**

Especialmente a mi tía Olivia por recibirme en su casa, por darme consejos, estar siempre al pendiente de mí y hacer más amena mi estancia lejos de casa.

**A mis angelitos.**

Mi madre Violeta, mi tía Esperanza y mi abuelita Leonila, que aunque ahora ya no estén conmigo, nunca me faltaron sus sabios consejos de superación y son mi principal motivo para seguir adelante.



Oficio D-SA 0982/2019

**C. SEBASTIAN LUIS CORTÉS**  
**PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA**  
**CIVIL**  
**Presente.**

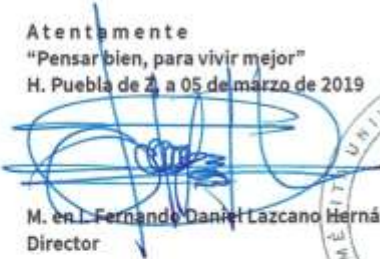
En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**"RETROCÁLCULO DE MÓDULOS ELÁSTICOS APLICADO A PAVIMENTOS FLEXIBLES"**

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como asesor al Mtro. CARLOS ADOLFO CORIA GUTIÉRREZ.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente  
"Pensar bien, para vivir mejor"  
H. Puebla de Z. a 05 de marzo de 2019

  
M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández  
Director



M'FDLH/M'JAJT/BARV  
C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo

Facultad  
de Ingeniería

Bvd. Vallesquillo y Av. San Claudio  
s/n. edif. ING - 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández  
Director de la Facultad de Ingeniería  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Presente.

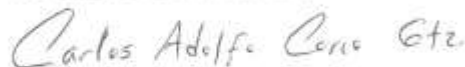
El que suscribe: Mtro. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez, Asesor del tema de tesis:

"RETROCÁLCULO DE MÓDULOS ELÁSTICOS APLICADO A PAVIMENTOS FLEXIBLES".

Presentada por el C. Sebastián Luis Cortés, pasante del Colegio de Ingeniería Civil, y en atención al oficio No. D-SA 0982/2019 con fecha de emisión 05 de marzo de 2019, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

Atentamente  
"Pensar bien, para vivir mejor"  
H. Puebla de Z. a 29 de abril de 2019



Mtro. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez  
Asesor

M'JLCP/BARV  
C.c.p. Archivo

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
<b>1. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>5</b>
1.1. Definición de pavimento flexible.....	5
1.2. Evaluación o auscultación de pavimentos.....	6
1.2.1. Evaluación funcional o superficial. ....	7
1.2.2. Evaluación estructural.....	8
1.3. Métodos no destructivos en la evaluación de pavimentos.....	10
1.4. Equipos de medición.....	11
1.4.1. Equipos de bajo rendimiento.....	12
1.4.2. Equipos de alto rendimiento .....	13
1.4.3. Deflectómetro de impacto (FWD/HWD) .....	14
1.5. Deflexión en pavimentos.....	18
1.5.1. Definición de deflexión .....	18
1.5.2. Cuenca de deflexiones.....	20
1.5.3. Deflexión máxima.....	21
1.6. Factores que afectan la magnitud de las deflexiones .....	21
1.6.1. La estructura del pavimento.....	22
1.6.2. Carga aplicada en el pavimento. ....	23
1.6.3. Clima.....	24
1.6.4. Temporada de medición.....	24
1.7. Determinación de las deflexiones de los pavimentos.....	25
1.7.1. Intervalo de la medición. ....	26
1.7.2. Valor representativo del segmento de medición.....	26
1.7.3. Determinación de la condición estructural. ....	26
1.8. Puntos notorios de las cuencas de deflexión .....	27
1.9. Normalización y corrección de las deflexiones. ....	28
1.9.1. Deflexión normalizada. ....	28
1.9.2. Normalización por carga. ....	29
1.9.3. Normalización por temperatura.....	29

1.9.4.	Métodos de normalización por temperatura .....	31
1.10.	Módulo de superficie.....	38
1.10.1.	Definición. ....	38
1.10.2.	Distribución de presión. ....	41
1.10.3.	Gráficas de módulo de superficie.....	42
2.	RETROCÁLCULO DE PAVIMENTOS .....	45
2.1.	Filosofía del retrocálculo.....	45
2.2.	Recomendaciones de uso. ....	47
2.3.	Modelación de pavimentos para retrocálculo. ....	49
2.3.1.	Numero de capas. ....	49
2.3.2.	Espesor de las capas. ....	51
2.3.3.	Rangos y módulos iniciales. ....	54
2.4.	Retrocálculo manual mediante iteraciones.....	55
2.4.1.	Funcionamiento del software WinJULEA .....	55
2.4.2.	Ejemplo práctico.....	59
2.5.	Programas de retrocálculo .....	72
2.5.1.	PITRA-BACK 1.0 .....	74
2.5.2.	Funcionamiento del programa.....	75
2.6.	Módulo Resiliente.....	78
2.7.	Módulo dinámico .....	80
2.8.	Tramos Homogéneos.....	81
2.9.	Vida remanente .....	82
3.	APLICACIONES PRÁCTICAS .....	84
3.1.	Proyecto 1 .....	85
3.1.1.	Proceso de retrocálculo. ....	86
3.1.2.	Cálculo de vida remanente. ....	88
3.1.3.	Análisis de resultados. ....	89
3.2.	Proyecto 2 .....	90
3.2.1.	Proceso de retrocálculo .....	91
3.2.2.	Cálculo de vida remanente. ....	93
3.2.3.	Análisis de resultados. ....	94

<b>3.3. Proyecto 3.</b> .....	95
<b>3.3.1. Proceso de retrocálculo</b> .....	96
<b>3.3.2. Cálculo de vida remanente</b> .....	98
<b>3.3.3. Análisis de resultados.</b> .....	99
<b>3.4. Proyecto 4.</b> .....	100
<b>3.4.1. Proceso de retrocálculo</b> .....	101
<b>3.4.2. Cálculo de vida remanente.</b> .....	103
<b>3.4.3. Análisis de resultados.</b> .....	104
<b>3.5. Proyecto 5.</b> .....	105
<b>3.5.1. Proceso de retrocálculo.</b> .....	106
<b>3.5.2. Cálculo de vida remanente.</b> .....	108
<b>3.5.3. Análisis de resultados.</b> .....	109
<b>3.6. Proyecto 6.</b> .....	110
<b>3.6.1. Proceso de retrocálculo.</b> .....	111
<b>3.6.2. Cálculo de vida remanente</b> .....	113
<b>3.6.3. Análisis de resultados</b> .....	114
<b>CONCLUSIONES</b> .....	115
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	116

## RESUMEN

El análisis de las propiedades mecánicas de los pavimentos viales existentes es crucial para la estimación de la condición del pavimento y la selección de estrategia de rehabilitación y/o reconstrucción más factible. Por lo tanto, los ingenieros intentan utilizar métodos eficientes y confiables para determinar la condición estructural.

Los métodos de prueba no destructiva proporcionan de manera rápida y eficiente información valiosa sobre las propiedades mecánicas de una estructura de pavimento, pueden caracterizar el comportamiento de tensión-deformación de las capas de pavimento a niveles de deformación relativamente bajos.

El retrocálculo es una evaluación mecánica de las cuencas de deflexión de la superficie generada por los NDT, este método toma una deflexión de superficie medida e intenta hacerla coincidir (dentro de un error tolerable) con una deflexión de superficie calculada a partir de una estructura de pavimento idéntica utilizando rigideces de capa supuestas (módulos). Los módulos de capa supuestos en el modelo calculado se ajustan hasta que producen una deflexión que se semeje mucho a la medida. Se asume entonces que la combinación supuesta de rigidez de las capas está cerca del módulo in situ real para las diversas capas de pavimento.

El contenido de esta tesis, fue considerado en el “Curso Taller de Retrocálculo en pavimentos asfálticos” que llevo a cabo el Departamento de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería de la BUAP en junio del 2018.

**Palabras clave:** retrocálculo, método no destructivo, deflectómetro de impacto, deflexión máxima, vida remanente.

## ABSTRACT

Structural analysis of pavement systems comprises valuable information for the estimation of the pavement condition and the selection of feasible rehabilitation and/or reconstruction strategy. Therefore, engineers intent to utilize efficient and reliable methods for the determination of the structural condition.

Non-destructive test provide quickly and efficiently valuable information about the mechanical properties of a pavement structure, also can characterize stress-strain behavior of pavement layers at relatively low strain levels.

Back calculation is a mechanistic evaluation of pavement surface deflection basins generated by non-destructive test, this method takes a measured surface deflection and attempts to match it (to within some tolerable error) with a calculated surface deflection generated from an identical pavement structure using assumed layer stiffness (moduli). The assumed layer moduli in the calculated model are adjusted until they produce a surface deflection that closely matches the measured one. The combination of assumed layer stiffness that results in this match is then assumed to be near the actual in situ moduli for the various pavement layers.

The content of this thesis was considered in the course “Backcalculation on asphalt pavements” by Training, Faculty of Engineering BUAP in June 2018.

**Keywords:** Backcalculation, non-destructive test, Falling Weight Deflectometer, remaining life.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad en México y el resto del mundo, la infraestructura carretera es el principal modo de transporte de personas y mercancías. Se ha observado con el paso del tiempo, que los caminos juegan un papel muy importante para el desarrollo de las ciudades.

Con el continuo desarrollo y consolidación de la red de carreteras en el país, ha sido necesario promover la aplicación de sistemas que permitan administrar y gestionar la infraestructura como un bien público y social. Estos sistemas constituyen instrumentos de apoyo y optimización de toma de decisiones para garantizar la conservación de la infraestructura de carreteras, proporcionando condiciones satisfactorias de estabilidad, funcionalidad y seguridad al transporte terrestre, con una transferencia razonable de costos a los usuarios.

Las cifras de la Subsecretaría de Infraestructura publicadas en el anuario estadístico anuncian que para el año 2016 México contaba con una red total compuesta por 393, 473 kilómetros de carretera. (Fuente SCT)

Sin embargo, no es suficiente solo con construir una extensa red carretera, ya que después de ponerse en operación requiere ser evaluada periódicamente para conocer el estado en que se encuentra con el objetivo de poder definir las acciones requeridas para mantener un adecuado funcionamiento. Dentro de las características que se evalúan el comportamiento estructural del pavimento es considerado un factor muy importante para conocer la capacidad de carga y cuantificar el daño al momento de realizar la evaluación.

La evaluación de los pavimentos en servicio constituye el principal insumo de cualquier sistema con el que se pretende administrar la infraestructura vial, pues permite determinar la condición de las carreteras en determinados periodos, bajo las condiciones reales de operación, en función de ello se puede establecer la vida remanente de la infraestructura, las alternativas de rehabilitación, costos, prioridades en incluso el impacto y beneficio obtenido con su aplicación.

La intuición humana ha servido como base para la toma de decisiones, pero hoy en día se hace necesario acudir a técnicas y herramientas que puedan ayudar al proceso, dada la rapidez que se requiere en las decisiones, el costo de los errores que se puedan cometer, la gran cantidad de factores a tener en cuenta y la diversidad de alternativas de solución que existen. De ahí el reto, constante de la ingeniería de vías terrestres para mejorar los procesos a través de metodologías cada vez más eficientes y confiables.

En la actualidad una técnica muy común y ampliamente reconocida a nivel mundial es la utilizada en las pruebas no destructivas. Dentro de ellas el deflectómetro de impacto juega un papel muy importante ya que es el equipo utilizado con mayor frecuencia para obtener la repuesta estructural del pavimento, es decir, con él se obtienen las deflexiones en la superficie del pavimento como repuesta ante una aplicación de una carga.

Los datos de deflexiones obtenidos a través de un deflectómetro de impacto son una pieza clave, ya que a través de ellos podemos obtener los módulos elásticos de las capas de un pavimento por medio de un proceso de retrocálculo.

El proceso de retrocálculo tiene como objetivo principal obtener los módulos elásticos in situ de las diferentes capas de pavimento. Este proceso, se inicia proponiendo los valores de los módulos elásticos con los cuales se calculan las deflexiones y posteriormente se comparan estas deflexiones calculadas con las deflexiones medidas, los valores de módulo asumidos se ajustan de forma iterativa. Este proceso se repite hasta que los valores calculados y observados coinciden en un cierto rango definido.

## JUSTIFICACIÓN

Las pruebas no destructivas (non-destructive test, NTD) han sido un gran avance en la auscultación de pavimentos pues presentan importantes ventajas de tiempo, costo y eficiencia ante los métodos destructivos que, como su nombre lo indica, afectan la estructura de la carretera.

Hoy en día, los avances tecnológicos han permitido la creación de instrumentos de medición de alto rendimiento que hacen más eficiente este proceso, el deflectómetro de impacto o FWD (por sus siglas en inglés) es sin duda el mecanismo más utilizado en la actualidad para realizar las tareas de auscultación en carreteras, mide de manera confiable y precisa las deflexiones, cuenta con sensores o geófonos con aproximación de micras que le permiten realizar medidas exactas de la deflexión, además de que cuenta con herramientas extras como el GPS, medidor de distancia, video cámara y sensores que le permiten medir la temperatura del aire y el pavimento a la hora de ir realizando las pruebas, lo que permite posteriormente hacer las correcciones por temperatura; por todo esto para muchos expertos en la materia es el mejor equipo para realizar la evaluación de deflexiones en pavimentos.

Sin embargo, para conocer de mejor manera el estado estructural en que se encuentra un pavimento es necesario utilizar una herramienta de retrocálculo, que transforma los datos de deflexión y espesores para calcular los módulos elásticos de cada una de las capas existentes en el pavimento estudiado mediante ciclos iterativos. De esta manera toman gran importancia el uso de softwares de retrocálculo que hacen aún más fácil esta tarea, pues en cuestión de segundos podemos conocer de manera muy aproximada el valor de modulo elástico representativo de cada una de las capas que constituyen al pavimento evaluado. Sin embargo, estas herramientas deben ser utilizadas por expertos, ya que su mal uso puede arrojar resultados erróneos no representativos.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL:**

Mostrar y dar a conocer el método de retrocálculo o cálculo inverso aplicado a pavimentos flexibles con 6 proyectos prácticos como ejemplo, explicando ampliamente cómo funciona la metodología, desde la obtención y corrección de deflexiones, hasta la obtención de los módulos elásticos representativos de cada una de las capas que componen al pavimento con la ayuda de un software de retrocálculo y finalmente obtener la vida remanente de la estructura

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- Exponer la metodología del retrocálculo en pavimentos flexibles.
- Mostrar las ventajas de utilizar un software de cálculo inverso para obtener los módulos elásticos de una estructura de pavimento.
- Calcular módulos elásticos a través de iteraciones con ayuda del software WinJULEA y Excel.
- Calcular los módulos elásticos a partir de las deflexiones y espesores con ayuda del software de retrocálculo PITRABACK.
- Comparar los módulos obtenidos del retrocálculo con el estado real del pavimento.
- Calcular la vida remanente de las estructuras.

## 1. ESTADO DEL ARTE

### 1.1. Definición de pavimento flexible

Son estructuras conformadas por capas de diversos materiales asfálticos y granulares con una resistencia a la deformación y esfuerzos normalmente decreciente con la profundidad, derivada de las acciones repetidas de las cargas de tránsito.

El pavimento está caracterizado por las propiedades, espesores y disposición de los materiales que forman un conjunto de capas superpuestas, así como por la calidad de la construcción, en la que tienen gran importancia las especificaciones, la supervisión de la obra y el control de calidad. Ver Figura 1.

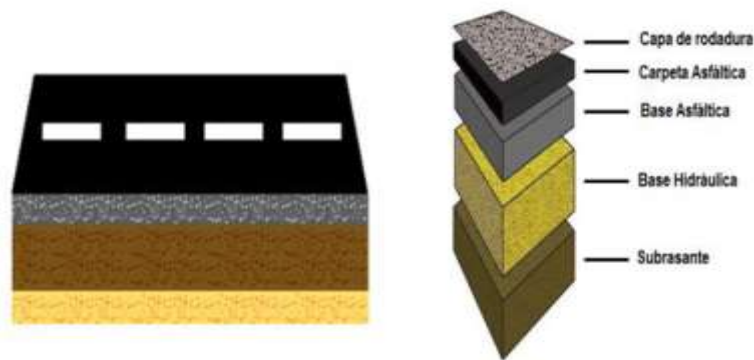


Figura 1.- Estructura de un pavimento flexible (BUAP, 2018)

La función que deben desempeñar los pavimentos, consiste fundamentalmente en hacer posible el tránsito de los vehículos con seguridad, comodidad, eficiencia y economía, en el plazo establecido en el proyecto, para lo cual, los pavimentos deben satisfacer las siguientes cualidades:

- a) Regularidad superficial longitudinal y transversal.
- b) Resistencia adecuada al derrapamiento en todo el tiempo.
- c) Rápida eliminación del agua superficial.

- d) Capacidad para soportar las cargas.
- e) Bajo nivel de ruido.
- f) Bajo nivel de desgaste de las llantas.
- g) Apariencia agradable.

### 1.2. Evaluación o auscultación de pavimentos

La evaluación estructural y funcional tiene por objeto el de revisar o auscultar la estructura del pavimento una vez que este ha sido abierto a la circulación. Con ello se puede determinar si dicha estructura de pavimento se encuentra en buenas u óptimas condiciones de servicio y si es necesario llevar a cabo trabajos de conservación rutinaria, rehabilitación o reconstrucción. Ver Figura 2.

Se considera una falla de tipo funcional cuando solo afecta la capa de rodadura de la carretera, la cual tiene repercusión directa en las expectativas de satisfacción, confort y seguridad de los usuarios.

Por otra parte, se considera como falla estructural cuando el deterioro afecta total o parcialmente la estructura del pavimento y es necesario analizar la forma en que el pavimento puede ser rehabilitado o reconstruido.

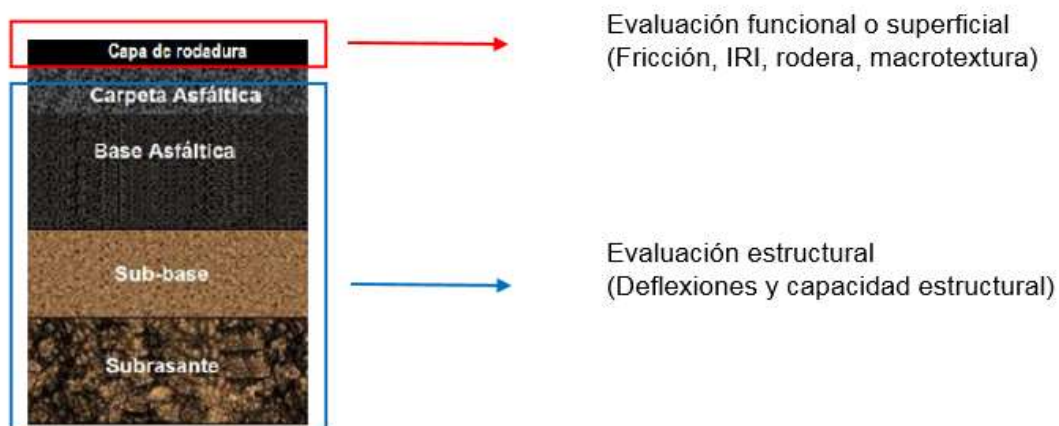


Figura 2.- Evaluación funcional y estructural de pavimentos. (BUAP, 2018)

### 1.2.1. Evaluación funcional o superficial.

Comprende fallas de superficie, como los defectos de la superficie de rodamiento debidos a fallas de la capa superior del pavimento, por ejemplo, la regularidad superficial, la adherencia neumático-superficie, permeabilidad, el ruido por el paso del tráfico y las características reflectantes y no guardan relación con la estructura de la calzada. La corrección de estas fallas se efectúa solo con regularizar la superficie y conferirle la necesaria impermeabilidad y rugosidad. Ello se logra con capas asfálticas delgadas de rodadura y tratamientos superficiales (CASAA, SMA, slurry seal, etc.) que no aportan desde el punto de vista estructural en forma directa. Ver Figura 3.



Figura 3.- Colocación de Slurry Seal (Fuente)

La Figura 4 muestra ejemplos de fallas de tipo funcional son: la deformación y desplazamiento lateral de la capa asfáltica, el desprendimiento de partículas, el agrietamiento de la capa de rodadura, el deslizamiento o “arriñonamiento” de la capa superficial, el descacaramiento de la capa superficial, los baches superficiales, la exudación o “llorado” del asfalto, etc. (SCT, 2014)



Figura 4.- Exudación de capas asfálticas. (Fuente)

Los insumos para la evaluación funcional o superficial son:

- ✓ Indicadores de desempeño (Fricción, IRI, Roderas, Macrotextura)
- ✓ Verificación condiciones de entorno (drenaje)
- ✓ Inventario de deterioros

### 1.2.2. Evaluación estructural.

La auscultación estructural de carreteras es una técnica que proporciona un conocimiento detallado del estado de los pavimentos, lo que permite efectuar el monitoreo de su comportamiento a través del tiempo y programar el mantenimiento de un modo racional y más económico (Solminihaç, 2005). De modo que se pueden obtener los siguientes resultados:

- Evaluar capacidad de soporte.
- Parámetros de resistencia de las diversas capas.
  - Módulo elástico de las capas o curva de tensión deformación.
  - Propiedades de fatiga.
  - Propiedades de deformación.
  - Tensiones residuales.
- Evaluar la condición de la estructura del pavimento.
  - Realizar predicciones realistas de la vida remanente de los pavimentos.

- Diseño de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción.
- Monitorear cambios de las propiedades de las capas con el tiempo.
- Evaluar transferencia de carga entre las losas.
- Pérdida de soporte en las esquinas de la losa.

La función estructural depende de la propia capacidad resistente (materiales y espesores), así como del estado de envejecimiento del pavimento, por lo que la auscultación estructural debe incluir mediciones de deflexión y una inspección visual (Solminihaç, 2005).

Si la capacidad mencionada es excedida más allá del valor que determinan las deformaciones recuperables por elasticidad instantánea y retardada, se desarrollan deformaciones permanentes en cada aplicación de las cargas, las que se acumulan modificando los perfiles de la calzada hasta valores que resultan intolerables para la comodidad, seguridad y rapidez del tránsito y aún pueden provocar el colapso de la estructura. Ver Figura 5.



Figura 5.- Formación de bache en la superficie (BUAP, 2018)

Si la capacidad mencionada no es excedida pero las deformaciones recuperables son elevadas, los materiales y en particular las capas asfálticas sufren el fenómeno denominado como fatiga cuando el número de aplicaciones de las cargas es elevado, que se traduce en reducción de sus características mecánicas. En este caso la deformación horizontal por tracción en la parte inferior de las capas asfálticas al flexionar la estructura, puede exceder el límite crítico y se llega a la iniciación del proceso de fisuramiento. Ver Figura 6.



Figura 6.- Agrietamiento por fatiga (BUAP, 2018)

Los insumos para la evaluación estructural son:

- ✓ Geometría y ubicación de la carretera. (Localización de bancos de materiales)
- ✓ TDPA representativo y años de proyecto
- ✓ Configuración del tránsito.
- ✓ Clima representativo de la zona
- ✓ Estratigrafía (GPR y sondeos)
- ✓ Calidad de los materiales
- ✓ Inspección visual.

### **1.3. Métodos no destructivos en la evaluación de pavimentos.**

Anteriormente la medición del estado del pavimento se realizaba mediante técnicas destructivas, lo que eventualmente alteraba las condiciones de la vía, además de ser más tardado pues el avance era lento y costoso. Sin embargo, con el avance de la tecnología se implementaron instrumentos de última generación que permiten desarrollar ensayos de alto rendimiento, conocidos como pruebas no destructivas (Non-Destructive Test, NTD)

Los métodos de evaluación no destructivos se han venido implementando debido a que presentan ventajas importantes ante otros métodos convencionales, entre las

que se pueden mencionar: rapidez en su ejecución, confiabilidad en los datos, economía, no requieren extracción de muestras para ensayos de laboratorio, las cargas que se utilizan simulan la acción de un vehículo en movimiento, entre otras.

Se emplean para determinar las propiedades de los materiales sin causar daño a la estructura del pavimento. Una de las pruebas utilizadas es aquella donde se miden las deflexiones superficiales para pavimentos nuevos y en operación, estas pruebas se utilizan para obtener:

- a) Módulos de elasticidad de cada capa de pavimento.
- b) Rigidez de todo el sistema.
- c) Eficiencia de la transferencia de carga y detección de oquedades bajo pavimentos rígidos.
- d) Módulo de reacción de la subrasante.
- e) Capacidad estructural del pavimento.
- f) Análisis y diseño estructural del pavimento.
- g) Vida remanente.

Por tal motivo, agencias de investigación como la American Association of state Highway and Transportation Officials (AASHTO) y Washington State Department of Transportation (WSDOT), han establecido modelos matemáticos para correlacionar dichas tecnologías a través de parámetros o indicadores de estado del pavimento. Estos métodos proporcionan soluciones de uso directo que permiten establecer un adecuado mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción del pavimento.

### **1.4. Equipos de medición.**

Existen diferentes equipos para la determinación de las deflexiones en el pavimento, los cuales se clasifican en función de la posición de medición, el tipo y número de sensores y la forma de aplicación de la carga, según la norma N-CSV-CAR-1-03-10-17.

Los equipos se clasifican según su rendimiento del proceso de medición en:

### 1.4.1. Equipos de bajo rendimiento.

Se trata de la primera generación de equipos, los cuales miden la deflexión en un punto y bajo una carga fija o en movimiento muy lento. Para su uso generalmente se necesita de un vehículo lastrado para lograr la sollicitación de la prueba.

En estos equipos, las mediciones se hacen en forma estática o estacionaria, produciendo un valor puntual de la deflexión. Dentro de esta categoría únicamente se considera el equipo conocido como Viga Benkelman.

La viga Benkelman fue desarrollada por el Ing. AC Benkelman en la década de 1950. El ensayo consiste en la aplicación de una carga a través de las ruedas de un eje simple de ruedas gemelas (generalmente cargado 8.2 ton). La deflexión se mide utilizando una viga pivotante con la punta de medición situada entre las ruedas gemelas del eje, en la rodada del objeto de estudio. El vehículo de carga se desplaza totalmente alejándose de la viga y el movimiento resultante de la viga se registra en el pivote. Ver Figura 7.



Figura 7.- Viga Benkelman (BUAP, 2018)

En ensaye de deflexión del pavimento utilizando la viga Benkelman es un proceso lento, laborioso y no es práctico para ensayar longitudes largas de carretera, ni para la realización de ensayos con pequeños intervalos entre ellos. En consecuencia, el

uso de la Viga Benkelman para el seguimiento del estado de un firme a nivel de red es impracticable. Ver Figura 8.



Figura 8.- Ensayo de deflexión utilizando la viga Benkelman (BUAP, 2018)

Las instrucciones de su uso se detallan en el manual M-MMP-4-07-021, *Determinación de las Deflexiones con Equipo de Medición Estática*.

### **1.4.2. Equipos de alto rendimiento**

Reciben esta denominación porque permiten realizar las mediciones con un mayor rendimiento que los equipos de medición estática.

En lo que se refiere a la medición de las deflexiones, se consideran dos grupos de equipos de alto rendimiento: los equipos de medición dinámica y los equipos de impacto.

#### **1.4.2.1. Equipos de medición dinámica o vibratoria.**

En los equipos de medición dinámica las cargas son generadas por elementos vibratorios que imponen una fuerza sinusoidal sobre un peso estático. La magnitud de la carga dinámica entre los puntos más altos es menor que dos veces la carga estática, por lo tanto, estos equipos siempre aplican una carga de compresión de magnitud variable sobre el pavimento.

La frecuencia y magnitud de la carga pueden ser controladas por el operador. La deflexión se mide a través de acelerómetros o sensores de velocidad (geófonos). Estos sensores se colocan normalmente debajo de la carga y a distancia preestablecidas del centro de aplicación. Deben contar con al menos 5 sensores con una resolución de 2 micrómetros para medir satisfactoriamente. El procedimiento de medición y modo de uso de estos equipos se describe en el manual M-MMP-4-07-022, *Determinación de las Deflexiones con Equipo de Medición Dinámica*.

### **1.4.2.2. Equipos de impacto.**

Esta clase de equipos envían un pulso de carga sobre el pavimento mediante una masa que cae desde diferentes alturas sobre un sistema de absorción de impacto hecho de hule altamente resistente. Se pueden generar diferentes cargas de impacto variando el peso y la altura de caída. La fuerza resultante se transmite al pavimento a través de un plato circular y la fuerza no cambia entre repeticiones de golpes en más 3 por ciento.

La deflexión se mide a través de acelerómetros o sensores de velocidad. Estos sensores se colocan normalmente debajo de la carga y a distancias preestablecidas del centro de aplicación. Existen al menos 7 sensores para medir satisfactoriamente la cuenca de deflexiones con una resolución de 2 micrómetros.

El procedimiento de medición y el modo de uso de estos equipos se describe en el manual M-MMP-4-07-020-17, *Determinación de las Deflexiones con Equipo de Impacto*.

### **1.4.3. Deflectómetro de impacto (FWD/HWD)**

El deflectómetro de impacto, también conocido como FWD (Falling Weight Deflectometer) o HWD (Heavy Weight Deflectometer), fué desarrollado en Dinamarca a finales de 1960. Permite realizar por medio de técnicas no destructivas la evaluación estructural de pavimentos, una práctica que se ha difundido con gran

celeridad debido a la velocidad y versatilidad con la que se recopila información, así como los menores costos asociados; comparados con los procedimientos tradicionales que incluyen perforaciones y extracción de muestras. Ver Figura 9.



Figura 9.- Falling Weigh Deflectometer, FWD (BUAP,2018)

El deflectómetro de impacto es el equipo técnicamente más avanzado que existe en la actualidad para simular y medir la respuesta del pavimento, presentando características importantes a saber.

La primera de ellas es el sistema de aplicación de carga, la cual se genera a través de un pulso producido por dejar caer una determinada masa a una altura determinada sobre la superficie del pavimento, simulando en forma bastante aproximada el efecto de un vehículo circulando sobre él a 50 o 80 km/hr. Dicho impacto provoca una deflexión en la superficie la cual se mide con sensores ubicados en distintos puntos respecto al eje de aplicación de carga. Ver Figura 10.

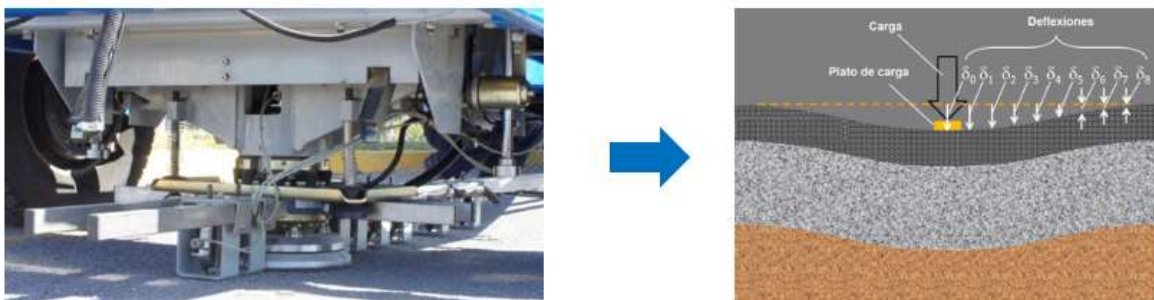


Figura 10.- Aplicación de carga, FWD (BUAP, 2018)

La segunda característica es que el FWD no solo mide la deflexión del pavimento bajo el área de aplicación, sino que lo hace en una serie de 6 a 9 puntos localizados a distancias que varían entre 20 y 180 cm. Ver Figura 11.

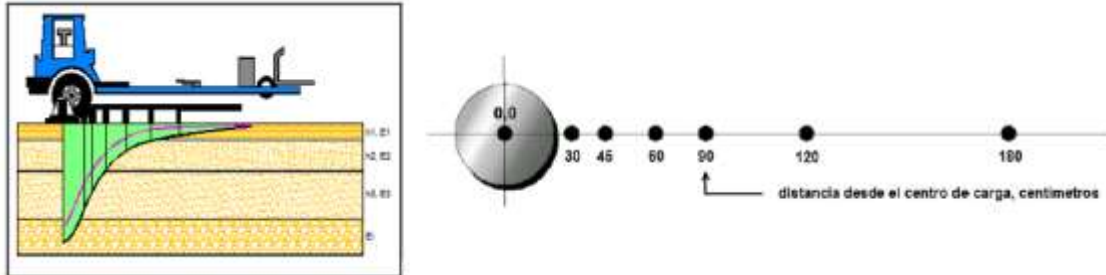


Figura 11.- Puntos de medición de la deflexión (BUAP, 2018)

Los dispositivos encargados de captar la deformación superficial del pavimento son denominados geófonos y están localizados en la parte interior del FWD, separados entre sí por un espaciamiento definido. Ver Figura 12.



Figura 12.- Geófonos o sensores de deformación (BUAP, 2018)

Como complemento a los dispositivos de medición de carga y deflexiones, el deflectómetro cuenta con un par de sensores de temperatura, los cuales captan la temperatura del ambiente y la superficial del pavimento al momento de la ejecución de la prueba. Conocer la temperatura del pavimento al momento del ensayo es muy importante, debido a que el asfalto a bajas temperaturas posee un comportamiento resistente y frágil, opuesto al que se presenta en altas temperaturas, donde se

comporta de forma débil y dúctil; razón por la cual, la rigidez del pavimento debe ser corregida por efectos de temperatura.

El deflectómetro genera una carga dinámica de tipo impulso con las siguientes características:

- 1 De 20 a 30 microsegundos de duración
- 2 Aproxima el efecto de una rueda viajando a 50-80 km/h.
- 3 Cualquier nivel máximo de carga entre:
  - FWD= 1500- 27000 lb (7-120 kN) y
  - HWD= 6500 – 72000 lb (30-320 kN)

Adicionalmente a la configuración del sistema FWD, todos los equipos incluyen:

- GPS (latitud, longitud y elevación)
- Instrumento de Medición De Distancia (DMI)
- Sensores de temperatura del aire y la superficie del pavimento
- Video cámara
- Certificado de calibración.

Los ensayos con FWD/HWD se realizan mientras el equipo está parado, la alta precisión de los sensores, geófonos utilizados y la aplicación repetida de la carga, sobre el mismo punto de ensayo, hace posible la medición precisa de la carga aplicada y la deflexión producida. Algunos profesionales consideran que estos equipos son los sistemas más precisos de medida de deflexión. Ver Figura 13.



Figura 13.- Ensayo de deflexión con FWD (BUAP, 2018)

## 1.5. Deflexión en pavimentos.

### 1.5.1. Definición de deflexión

Las sollicitaciones de carga inducen a la estructura de pavimento a un desplazamiento en sentido vertical en magnitudes muy pequeñas, generalmente en el orden de centésimas o milésimas de milímetro. Este desplazamiento vertical es conocido con el nombre de deflexión y es el parámetro más importante en la evaluación estructural de pavimentos flexibles.

Según la normativa de la SCT, la deflexión es la medida de la deformación elástica o de recuperación vertical que experimenta un pavimento al paso de carga. Es función tanto del tipo y estado del pavimento como el método y equipo de medición, así como de la temperatura y humedad presentes en el pavimento. Ver Figura 14.

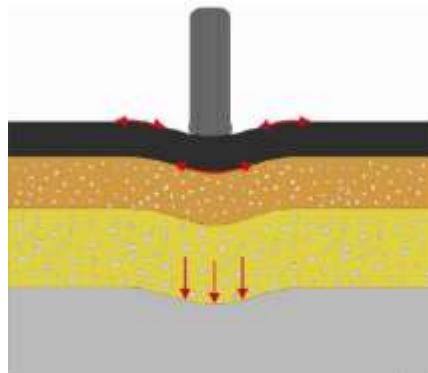


Figura 14.- Deflexión en pavimentos (BUAP, 2018)

La deflexión del pavimento se utiliza normalmente como indicador de la resistencia global de la estructura. Las técnicas de medición de la deflexión se utilizan generalmente en preferencia a los métodos no destructivos por ser menos costosos, menor necesidad de cierre de carriles y por no generar daños en el pavimento. Además, permiten realizar un mayor número de ensayos que los que podrían realizarse utilizando métodos destructivos como calas o pozos a cielo abierto (PCA).

La aplicación de una carga en la superficie disminuye al aumentar la distancia a la carga aplicada. La forma resultante se denomina cuenca de deflexión. Por lo

general, la notación utilizada para referirse a la deflexión máxima superficial en un punto es la letra “D” con un subíndice que indica la distancia de este punto de máxima deflexión. Por lo tanto,  $D_0$  indica la deflexión máxima registrada y  $D_{300}$  la deflexión en 300 mm (30 cm) desde el punto en el que se registró  $D_0$ . Ver Figura 15.

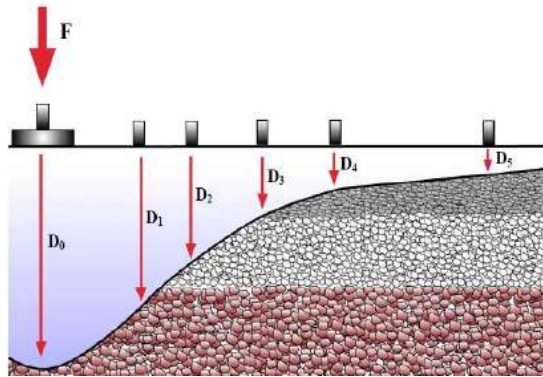


Figura 15.- Deflexiones medidas con el FWD (BUAP, 2018)

Con una dirección hacia un análisis y diseño mecanicista de los pavimentos el cual se basa en los principios fundamentales de la física, el uso de la información de deflexión ha empezado a ser más sofisticado. En la actualidad, las mediciones de deflexiones tienen diversos usos (Orozco, 2005):

- Identificación de las secciones de los pavimentos que son estructuralmente uniformes.
- Identificación de las zonas débiles y/o deterioradas.
- Cálculo de la capacidad estructural.
- Diseño de recarpeteos o de rehabilitación.
- Restricciones de carga (estacionales y permanentes).
- Procedimientos para permitir sobrecarga.
- Aplicación en la gestión de pavimentos.
- Evaluación de anomalías.

Entre las deflexiones más utilizadas se encuentran: la deflexión máxima o valor máximo de desplazamiento vertical bajo la aplicación de la carga y el área del cuenco de deflexiones

**1.5.2. Cuenca de deflexiones**

Es la deformación elástica de la superficie de un pavimento medida a distancias variables con respecto al punto de aplicación de la carga.

Las mediciones en los distintos sensores determinan la forma de la cuenca de deflexiones que puede usarse para estimar propiedades de los materiales de una estructura de pavimento. También sirve para la identificación de secciones que son estructuralmente uniformes, así como aquellas que son débiles y/o deterioradas. Ver Figura 16.

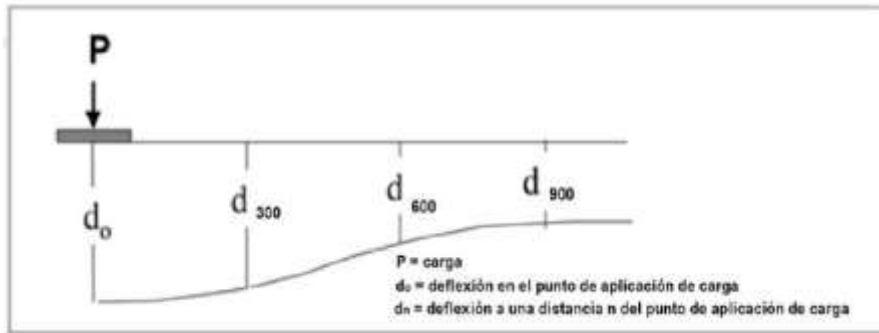


Figura 16.- Cuenca de deflexiones (Fuente SCT)

Su estimación de cálculo fue desarrollada por el ing. Mario Hoffman en el año de 1981 y fue adoptada para fines de análisis y diseño por la guía AASHTO. Su formulación está definida por la siguiente expresión. Ver ecuación (1)

$$\text{Área} = 150 * \left( 1 + 2 \left( \frac{d_{30}}{d_0} \right) + 2 \left( \frac{d_{60}}{d_0} \right) + \left( \frac{d_{90}}{d_0} \right) \right) \quad (1)$$

Donde:

*A = Área normalizada, en pulgadas o en milímetros.*

*D<sub>0</sub> = Deflexión bajo la carga, en micras.*

*D<sub>30</sub> = Deflexión a 300 mm de distancia de la carga aplicada, en micras.*

*D<sub>60</sub> = Deflexión a 600 mm de distancia de la carga aplicada, en micras.*

*D<sub>90</sub> = Deflexión a 900 mm de distancia de la carga aplicada, en micras.*

El valor del área nos permite diferenciar el comportamiento de dos estructuras de pavimento que pueden llegar a tener entre si el mismo valor de deflexión máxima ( $d_0$ ).

Como resultado del análisis de una serie de datos obtenidos del cuenco de deflexión y de la deflexión máxima, ha sido posible establecer una serie de criterios básicos para la adecuada interpretación del comportamiento estructural de un pavimento.

### 1.5.3. Deflexión máxima

La deflexión máxima se entiende como el valor máximo obtenido de la cuenca de deflexiones y corresponde a la medición tomada justo en el sensor uno ( $D_0$ ), es decir, bajo el centro del plato de carga y es un parámetro importante para la evaluación estructural del pavimento. Ver Figura 17.

Si un cuenco de deflexión posee un alto valor de deformación bajo el centro de aplicación de carga (deflexión máxima) es posible que indique una baja capacidad de soporte en alguna de las capas de la estructura y/o subrasante.

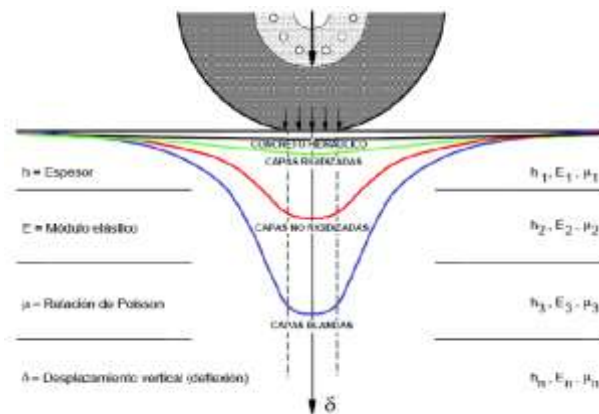


Figura 17.- Deflexión máxima (BUAP, 2018)

### 1.6. Factores que afectan la magnitud de las deflexiones

Existen varios factores que afectan la magnitud de las deflexiones medidas en los pavimentos, mismas que pueden dificultar la interpretación posterior.

Los principales 4 factores que afectan las deflexiones del pavimento son:

- Estructura del pavimento.
- Carga aplicada en el pavimento (magnitud de la carga y el tipo de carga).
- El clima.
- La temporada de medición.

### 1.6.1. La estructura del pavimento.

La deflexión de un pavimento representa una respuesta general de todo el sistema de capas asfálticas, base hidráulica, sub-base y subrasante. Por lo tanto, los parámetros de la capa superficial (espesor y rigidez) y de las capas de cimentación afectan la magnitud de las deflexiones medidas. Ver Figura 18.

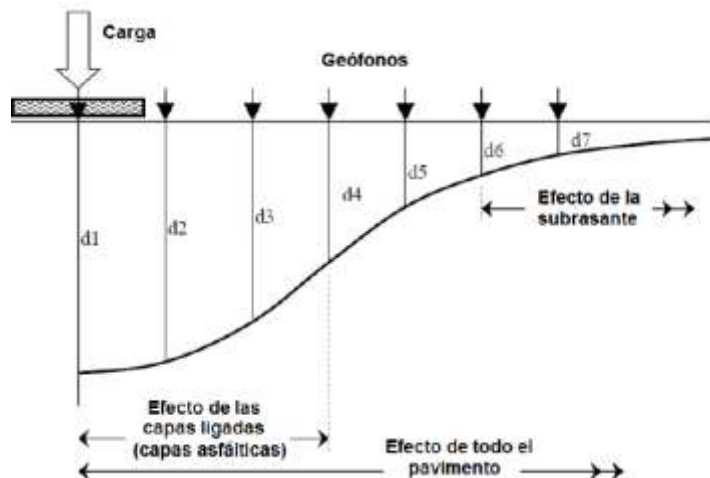


Figura 18.- Efecto de las deflexiones en el pavimento (BUAP, 2018)

En términos generales, los sistemas más débiles tienen mayores deflexiones bajo la misma carga y los sistemas más resistentes tienen menores deflexiones. Otros factores también relacionados con el pavimento son:

- Pruebas cerca de los bordes, grietas o áreas que contienen agrietamiento piel de cocodrilo, pueden producir deflexiones más altas que las pruebas en partes menos deterioradas.
- Las variaciones aleatorias en el espesor de la capa del pavimento pueden crear variabilidad en las deflexiones.
- Variación en la subrasante tales como capas de roca o altos niveles de aguas (N.A.F) pueden proporcionar una variabilidad significativa en deflexiones.

### 1.6.2. Carga aplicada en el pavimento.

Uno de los factores que más afecta las deflexiones del pavimento, es la magnitud de la carga aplicada. La mayoría de los equipos actuales (HWD) pueden imponer niveles de carga de tan solo 13 kN a más de 245 kN y es importante enfocar los niveles de carga apropiadas para cada aplicación.

El tipo de carga también puede afectar la deflexión del pavimento: una carga lenta y estática produce una respuesta diferente a la que produce una carga dinámica y rápida. En términos generales, cuanto más corto es el impulso de carga más pequeñas son las deflexiones, cuando el impulso es más grande las deflexiones son mayores.

Lo anterior significa que una alta frecuencia (alta velocidad) genera una cuenca de deflexión más pequeña y una baja frecuencia (baja velocidad) genera una cuenca de deflexión más grande. Ver Figura 19.

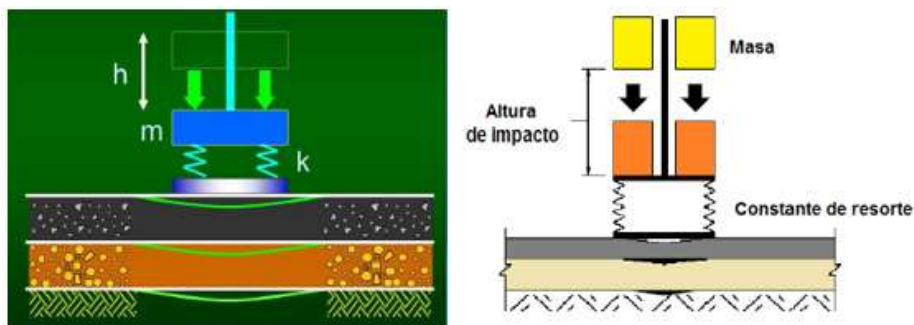


Figura 19.- Aplicación de carga en prueba de deflexión (BUAP, 2018)

### 1.6.3. Clima.

La temperatura es un factor muy importante que se debe considerar. En los pavimentos flexibles, las capas asfálticas (carpeta y bases asfálticas) son susceptibles a la temperatura. Cuando incrementa la temperatura, la rigidez de esas capas disminuye, por consiguiente, se ocasionan grandes deflexiones. Por tal motivo debe considerarse una corrección por temperatura, generalmente al patrón estándar de 20 grados Celsius. Ver Figura 20.



Figura 20.- Influencia de la temperatura en las capas asfálticas (BUAP, 2018)

### 1.6.4. Temporada de medición.

Las variaciones estacionales afectan las deflexiones en el pavimento. Las deflexiones son mayores en primavera (calor) y son más bajas en temporada de invierno (frio).

La humedad también afecta las mediciones de las deflexiones debido a su influencia en las capas inferiores del pavimento. Por lo que se recomienda realizar las medidas en época de estiaje. Ver Figura 21.

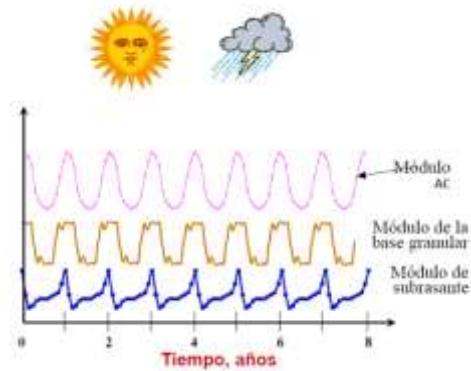


Figura 21.- Variación de la rigidez de los materiales con el tiempo (BUAP,2018)

## 1.7. Determinación de las deflexiones de los pavimentos

Se refiere al conjunto de trabajos de campo y gabinete necesarios para determinar el valor de las deflexiones obtenidas en un tramo. Según su propósito, la medición de deflexiones se utiliza para:

- **Evaluación:** las mediciones se llevan a cabo con el propósito de determinar las deflexiones existentes en tramos en operación. En estos trabajos se utilizan equipos de alto rendimiento.
- **Validación:** se refiere a las mediciones efectuadas con el fin de validar la operación y los resultados de equipos propuestos para la realización de estudios de evaluación. Ver Figura 22.



Figura 22.- Medición de deflexiones en carreteras

### **1.7.1. Intervalo de la medición.**

El intervalo de medición es la distancia que hay entre uno y otro punto de medición de la deflexión. Las mediciones se realizan a intervalos constantes de longitud.

Los valores del intervalo de medición deben ser como mínimo de 100 metros y máximo de 500 metros.

### **1.7.2. Valor representativo del segmento de medición.**

El segmento de medición es la porción de tramo carretero cuyas características estructurales se consideren homogéneas o uniformes según el tipo de pavimento, procedimiento constructivo, características de los materiales, etc. La segmentación del tramo se realiza por cada sentido de circulación y de ser necesario por carril.

El valor representativo del segmento de medición resulta del valor de la deflexión máxima normalizada en ese segmento.

Para la determinación de deflexiones se pueden medir uno o varios carriles de circulación del tramo que se requiera evaluar. En todos los trabajos de evaluación se deben realizar mediciones, como mínimo, en los siguientes carriles:

Carreteras de un carril por sentido: Uno de los dos carriles de circulación, preferentemente en el carril en sentido creciente del kilómetro.

Carreteras multicarril: El carril exterior (carril de baja velocidad) de cada uno de los sentidos.

En casos especiales: El carril de mayor incidencia de cargas altas o pendiente ascendiente, según la orografía de la zona.

### **1.7.3. Determinación de la condición estructural.**

La condición estructural de los segmentos carreteros se determina en función de la deflexión normalizada utilizando los rangos que se indican en la Tabla 1.

Tabla 1.- Rangos de valores representativos de deflexiones para la clasificación de los segmentos carreteros a 700 Kilopascales y 20 grados Celsius (Fuente N-CSV-CAR-1-03-010/17)

Rangos de valores representativos de deflexiones mm		
Condición estructural	Autopistas y Corredores Carreteros	Red Básica y Secundaria
Buena	0 a 0.4	0 a 0.50
Regular	-	> 0.50 y ≤ 0.80
Mala	>0.4	> 0.80

### 1.8. Puntos notorios de las cuencas de deflexión

Como se mencionó anteriormente, la utilización del FWD permite la simulación del efecto producido al pavimento por el tránsito vehicular. Los desplazamientos verticales producidos por el efecto del impacto y sus tiempos de ocurrencia, se registran por medio de sus 7 geófonos espaciados a distancias preestablecidas. Con esta información se evalúan los parámetros que rigen el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales constitutivos del pavimento.

Durante el impacto, la forma de la cuenca de deformación queda medida y registrada, posteriormente se usa en programas de cómputo para procesar los datos. Después de hacer las correcciones de las deflexiones tanto por carga como por temperatura, se grafican para evaluar el daño presente en los tramos evaluados. De esta forma se tiene una idea de las zonas específicas donde se necesita alguna intervención de tipo estructural.

De las gráficas de deflexión obtenidas se puede obtener un panorama general del estado en que se encuentra la estructura de una carretera e información relevante, por ejemplo, se pueden detectar zonas donde la deflexión medida sobrepasa el límite permisible por parte de la SCT (400 micras).

La Figura 23 muestra una gráfica de deflexiones de un tramo carretero, donde se puede observar que la mayoría de las deflexiones en la estructura sobrepasan el límite permisible (línea roja) según la normativa llegando a valores cercanos de las

1000 micras, lo que nos da un indicativo de que la carretera está sumamente dañada y necesita rehabilitación estructural.

En adición a lo anterior, la separación de las líneas graficadas de cada geófono nos da un indicativo de la resistencia de las capas del pavimento, por ejemplo:

Cuando las líneas están más cercanas unas a otras indican una estructura y subrasante más resistente. Ver Figura 23 (Del km 40+000 al km 55+000)

De forma contraria, cuando las líneas están separadas unas de otras, indican una estructura débil muy deformable que necesita intervención. Ver Figura 23 (Del km 0+000 al km 40+000).

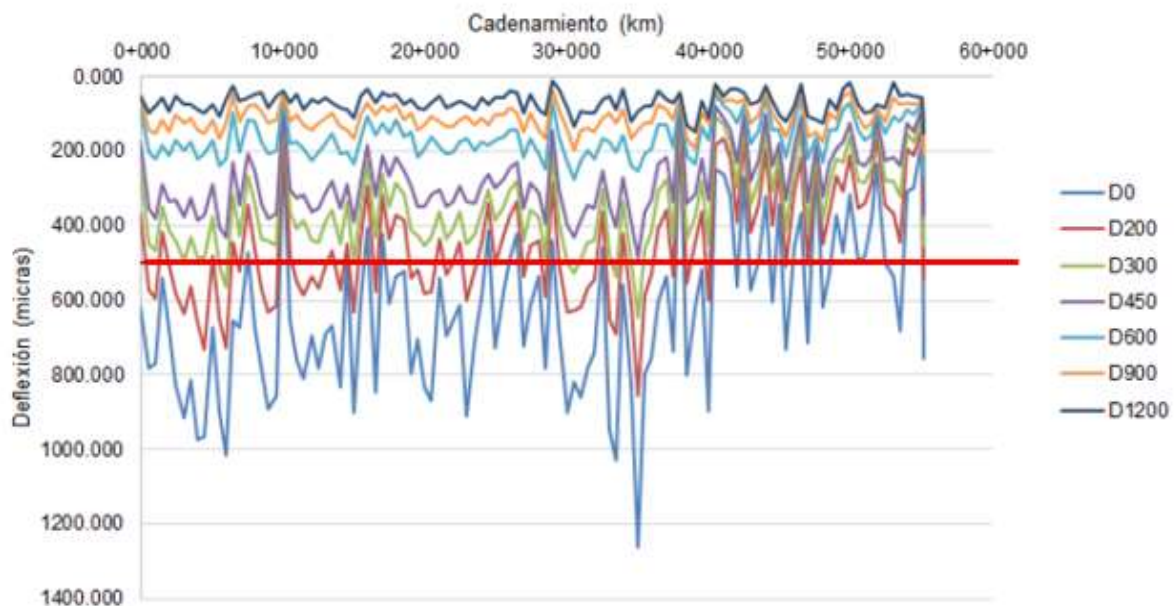


Figura 23.- Grafica de la cuenca de deflexiones

## 1.9. Normalización y corrección de las deflexiones.

### 1.9.1. Deflexión normalizada.

Es el valor resultante de la corrección del valor de la deflexión determinado en campo debido a la influencia de la temperatura y el esfuerzo.

Con base a la norma N-CSV-CAR-1-03-010/17 los valores base de normalización son veinte grados Celsius (20° C) para temperatura y setecientos 700 kilopascales (700 KPa) para el esfuerzo.

### 1.9.2. Normalización por carga.

Inicialmente los datos de deflexión obtenidos, se normalizan por carga teniendo en cuenta el valor de la carga con que fueron generados y considerando que la reacción al aplicar la carga no siempre es constante.

Esta corrección se realiza proporcionalmente. Ver ecuación (2).

$$d_i = d_{i0} \left( \frac{P_r}{P_o} \right) \quad (2)$$

Donde:

$d_i$  = Deflexión del sensor  $i$ , corregida a la carga  $P_r$

$d_{i0}$  = Deflexión del sensor  $i$ , medida en campo con la carga de aplicación  $P_o$

$P_r$  = Carga a la cual se normalizarán las mediciones (700 MPa)

$P_o$  = Carga en kN aplicada en las mediciones de campo

### 1.9.3. Normalización por temperatura.

Los resultados de deflexión del pavimento son dependientes de variaciones ambientales. Con el fin de obtener resultados significativos en la capa estructural de la capa asfáltica, los módulos retrocalculados deben ser ajustados para tener en cuenta efectos de temperatura y ambientales.

La temperatura como factor climático y ambiental es un agente externo de gran influencia en el análisis de deflexión, el cual afecta directamente la rigidez de la carpeta asfáltica, cuyas propiedades visco-elásticas son dependientes de esta variación.

El grado de influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad del asfalto y consecuentemente sobre las deflexiones depende entre otros factores del tipo de mezcla, de su edad, de su grado de deterioro, espesor, etc. En días extremadamente calurosos, los módulos de estas capas son muy bajos y puede existir un mayor nivel de error. Ver Figura 24.



*Figura 24.- Influencia de la temperatura en pavimentos flexibles.*

Vamos a suponer que se requieren medir las deflexiones en un tramo carretero que guarda las mismas condiciones físicas de los pavimentos a lo largo del mismo: mismos espesores y materiales de las capas del pavimento. El tramo se encuentra totalmente cerrado al tránsito vehicular.

Si se comienza a medir a las 8:00 am en un día soleado, la temperatura de la superficie del pavimento será relativamente baja. Sin embargo, a medida que transcurren las horas, la temperatura se incrementará y por lo tanto la superficie del pavimento será más caliente arrojando mayores deflexiones. Dado que las capas asfálticas son muy susceptibles a la temperatura, dicho incremento de la deflexión es normal.

Se recomienda no llevar a cabo las pruebas deflectométricas con temperaturas mayores a 32°C y llevar a cabo correcciones por temperatura.

#### 1.9.4. Métodos de normalización por temperatura

Se conocen diferentes métodos utilizados para ajustar o corregir las deflexiones obtenidas a diferentes temperaturas y ajustarlas a una común, llamada temperatura de referencia con el fin de poder realizar comparaciones entre diferentes tramos carreteros o entre zonas diferentes de un mismo tramo evaluado.

La temperatura ha adoptado diferentes valores dependiendo de la metodología de ajuste, siendo la temperatura de 20° C la más común. A continuación, se citan algunas de las metodologías más usadas y conocidas.

##### a) Método AASHTO.

La Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos 1993, publicada por la AASHTO, en capítulo 5 Método de Rehabilitación Sobre Carpetas, propone una corrección por temperatura, para propósitos de comparación del módulo efectivo a lo largo de la longitud del proyecto. Mediante los valores de deflexión bajo el plato de carga ( $d_0$ ) que son usados para determinar el módulo efectivo, deben ser ajustados a una temperatura de referencia. El ajuste de ( $d_0$ ) está basado en la relación de deflexiones siguiente. Ver ecuación (3).

$$T(t) = \frac{d_0(68)}{d_0(t)} \quad (3)$$

Donde:

$T(t)$  = factor de ajuste de temperatura

$d_0$  =  $d_0$  a 68° F (20° C)

$d_0(t)$  =  $d_0$  a temperatura de evaluación en  $t$ , ° F

Además, hace uso de dos graficas mediante las cuales se pueden obtener los factores de corrección de las deflexiones medidas a diferentes temperaturas en el pavimento. Los datos de entrada son la temperatura de la carpeta (° F) y el espesor (in). Ver Figura 25 y Figura 26.

La metodología únicamente considera relevante la deflexión debajo del plato de carga, por lo cual los demás sensores a diversas distancias no se corrigen por este efecto.

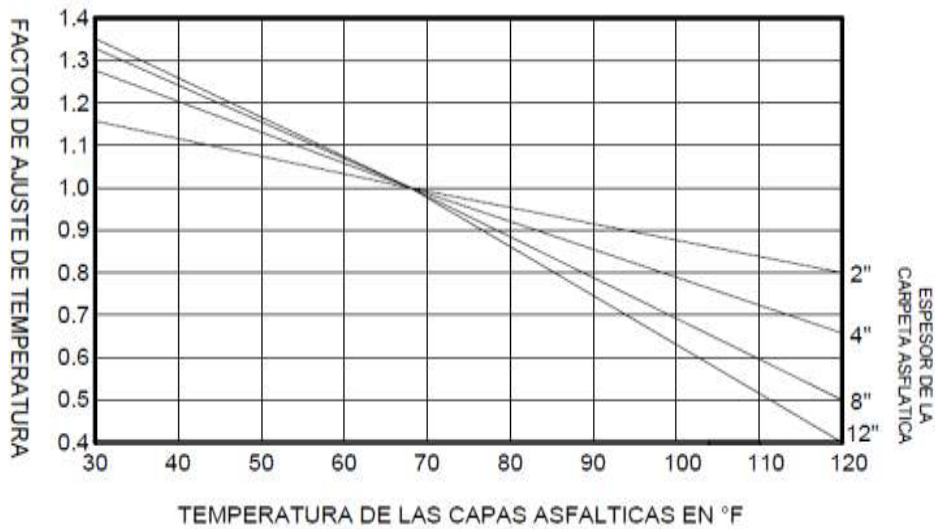


Figura 25.- Ajuste de temperatura para  $d_0$  en bases granulares (AASHTO 1993)

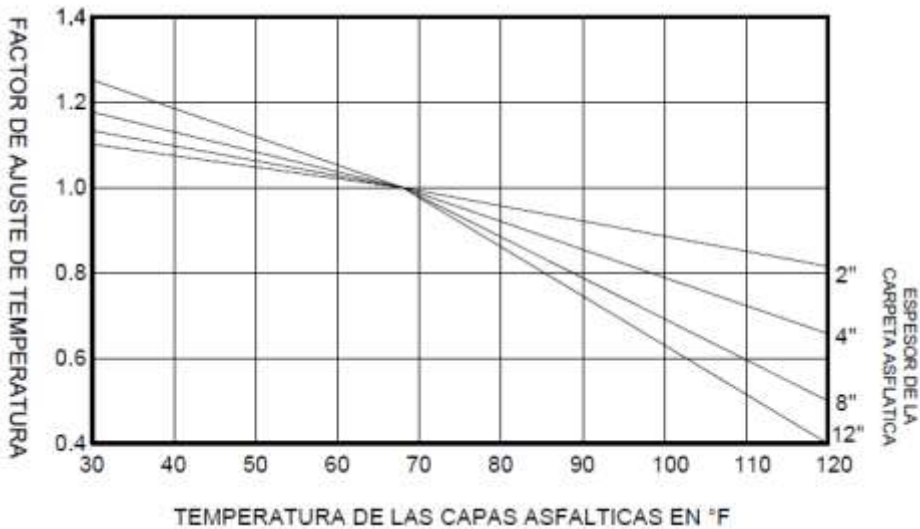


Figura 26.- Ajuste de temperatura para  $d_0$  en bases tratadas (AASHTO 1993)

**b) Método del instituto del asfalto 1983:**

El manual publicado en 1983 por el Instituto del Asfalto (citado por Garnica y Pérez, 2015), en su capítulo IV Procedimiento de Deflexión presenta una gráfica para la corrección por temperatura. En esta gráfica se toma como temperatura de referencia 70 ° F (21° C). Ver Figura 27.

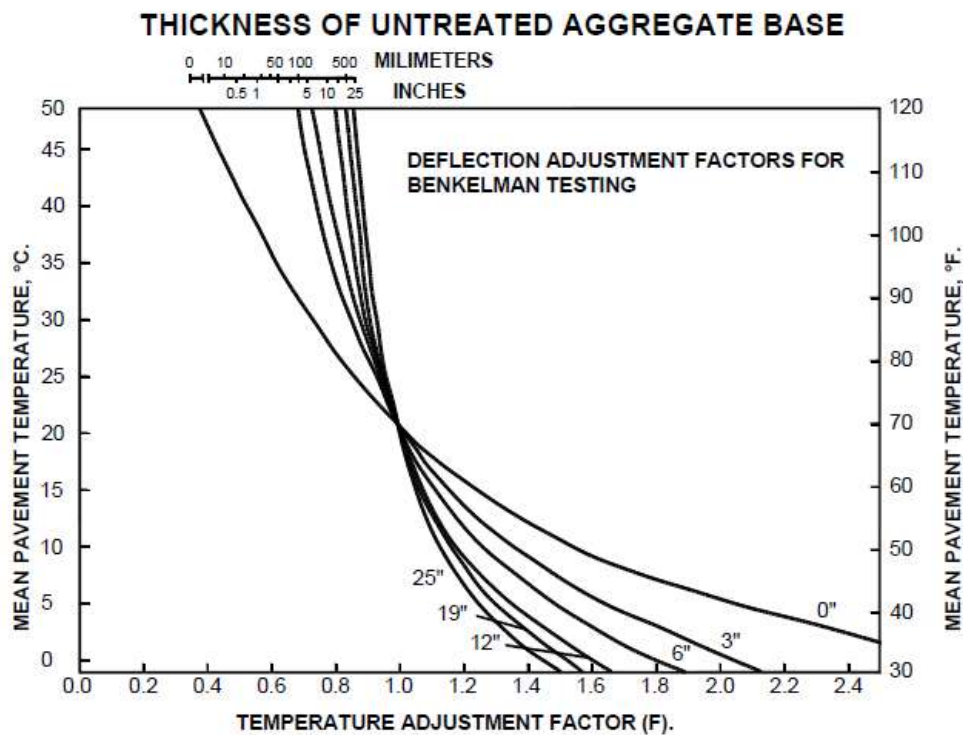


Figura 27.- Factor de ajuste de temperatura (Asphalt Institute)

El método no menciona el radio de influencia de la temperatura. Por lo cual se considera que la corrección es general para todos los sensores ubicados a diferentes distancias del plato de carga.

**c) Método del CEDEX**

En la norma 6.3 de la Instrucción de carretas de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento Español, recomienda aplicar un factor de corrección en las deflexiones, cuando la temperatura del pavimento es diferente a 20° C.

Las expresiones para hacer la corrección se presentan a continuación:

Expresión válida para superficie poco fisurada y espesor de capas asfálticas igual o mayor a 10 cm. Ver ecuación (4)

$$FT = \frac{200}{3T + 140} \quad (4)$$

Expresión válida para superficie muy fisurada y espesor igual o mayor a 10 cm. Ver ecuación (5)

$$FT = \frac{2T + 160}{3T + 140} \quad (5)$$

Expresión válida para pavimento totalmente fisurado (bloques claramente definidos) y espesor de las capas asfálticas menor de 10 cm. Ver ecuación (6)

$$FT = 1.0 \quad (6)$$

Esta metodología restringe su uso, considerando únicamente a pavimentos que presentan fisuras. En el caso de los pavimentos recientes o que no presentan fisuras visuales, la metodología no será válida.

### **d) Método MOPT de Costa Rica.**

En la vigésima Reunión del Asfalto en Buenos Aires (1977) se presentó la siguiente ecuación para convertir las deflexiones medidas a otras temperaturas a la temperatura referencia de 20° C. Ver ecuación (7).

$$FT = \frac{1}{1 + (8 \times 10^{-4} * h)(T - 20)} \quad (7)$$

Donde:

$h$  = espesor de las capas asfálticas en el sitio de la medida (cm)

$T$  = temperatura de las capas asfálticas en el momento de medición ( $^{\circ}\text{C}$ )

Para el desarrollo de la metodología se considera el espesor de las capas asfálticas y la temperatura al momento de hacer las mediciones de las deflexiones.

En el método no se considera un rango válido, por lo cual se considera que es aplicable a cualquier espesor y temperatura de pavimento dado.

### **e) Método de FHWA.**

El programa de monitoreo patrocinado por la Federal Highway Administration (FHWA) permitió la obtención de un conjunto de expresiones dirigidas al cálculo de los factores de ajuste por temperatura de las deflexiones medidas con FWD en 41 secciones de pavimentos asfálticos en Estados Unidos y Canadá. Los autores del procedimiento consideran que las características del asfalto incidían significativamente en el módulo de rigidez de las capas.

La corrección por temperatura se realiza de la siguiente manera: ver ecuación (8).

$$FT = 1.054^{(\text{Temperatura de evaluación} - 20^{\circ}\text{C})} \quad (8)$$

Esta metodología únicamente involucra la temperatura a la cual se realizó la medición y la temperatura de evaluación está en  $^{\circ}\text{C}$ . Esta metodología es simple, pero con resultados regulares.

### **f) Método de IMT**

La metodología propuesta por el Instituto Mexicano del Transporte y basada en las mediciones de pavimentos a diferentes temperaturas, realiza la corrección de las

cuencas de deflexión utilizando una ecuación de ajuste para cada sensor; dicha ecuación se obtiene de la relación de deflexiones  $D_n/D_{n20^\circ C}$  en donde  $D_n$  es la deflexión a cualquier temperatura en el sensor “n” y  $D_{n20^\circ C}$  es la deflexión a la temperatura de referencia, en este caso  $20^\circ C$ .

En la Figura 28 se puede observar la ecuación de ajuste para las diferentes temperaturas superficiales, registradas durante la evaluación de una misma estación del pavimento.

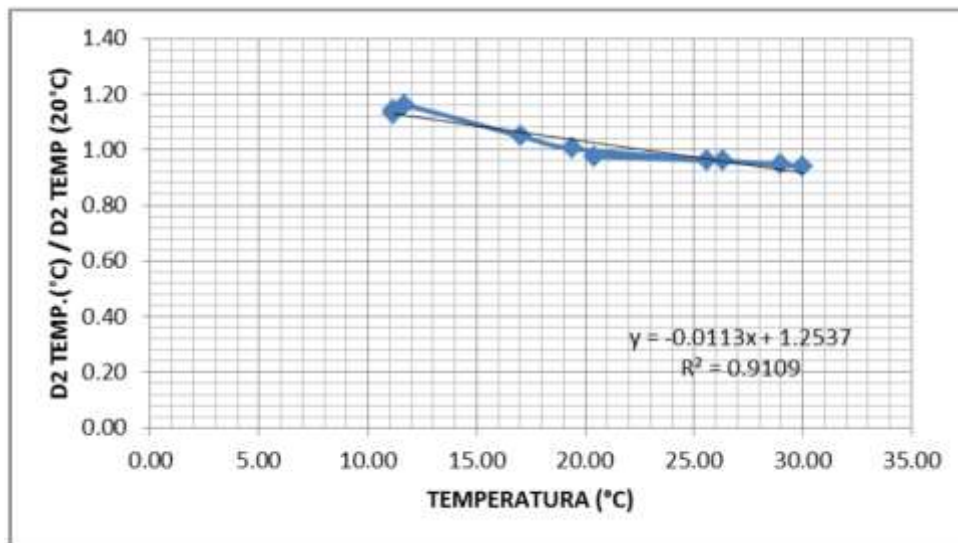


Figura 28.- Relación de deflexiones para diferentes temperaturas de evaluación (IMT)

### g) Método SCT

Esta metodología permite determinar cuál es el valor de la deflexión a una temperatura de  $20^\circ C$ , cuando fue determinada a una temperatura diferente.

Para pavimentos flexibles con bases hidráulicas, estabilizadas o tratadas con productos asfálticos y/o cal, el factor de corrección se determina con el gráfico mostrado en la Figura 29.

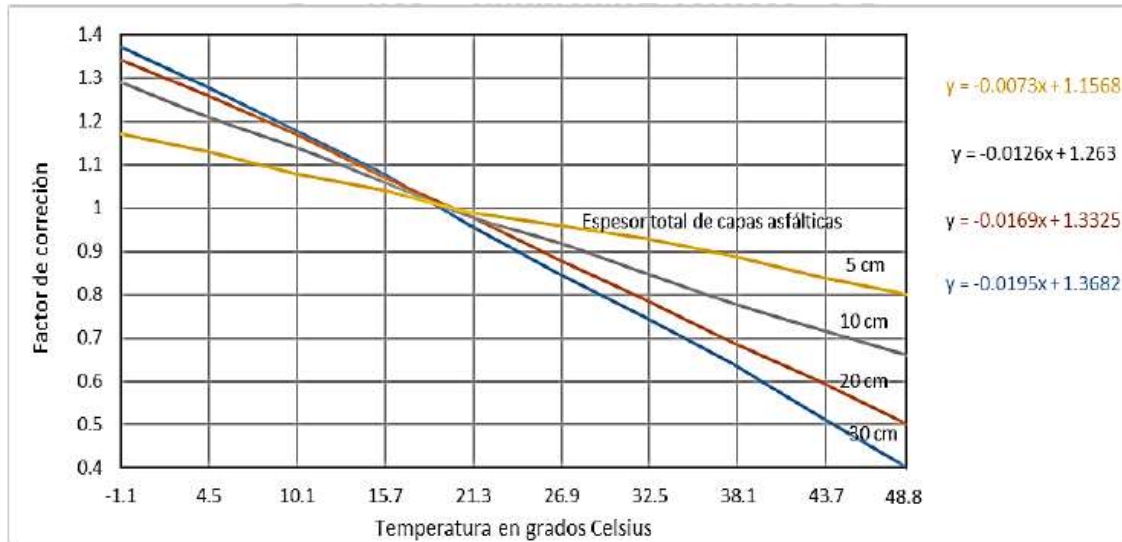


Figura 29.- Grafico para la determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos con bases hidráulicas o estabilizadas con asfalto y/o cal. (Fuente M-MMP-4-07-021/17)

Para pavimentos flexibles con bases modificadas, tratadas o estabilizadas con cemento, el factor de corrección se determina según el grafico mostrado en la Figura 30.

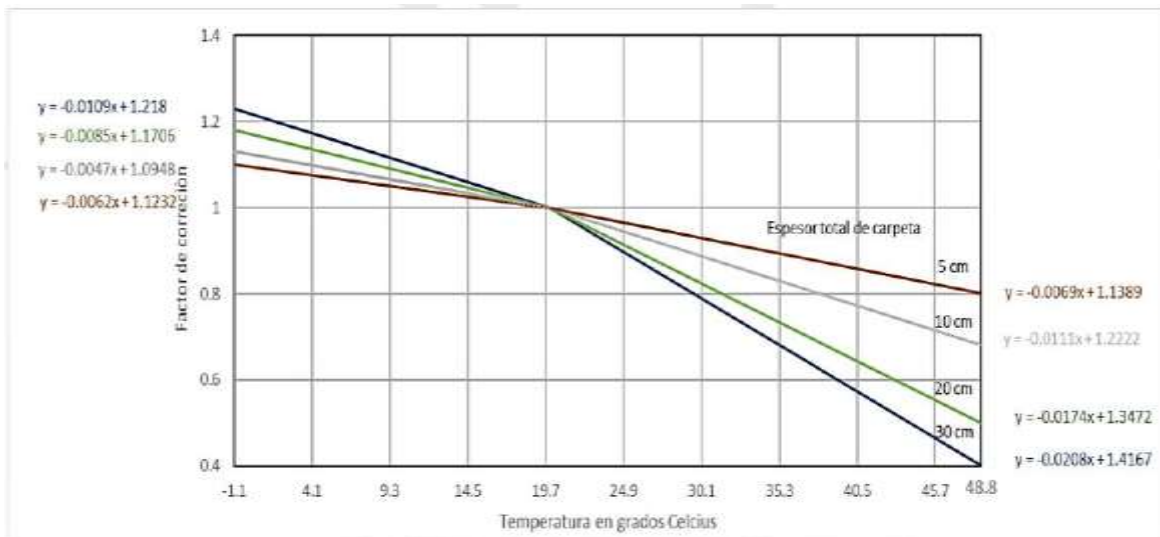


Figura 30.- Grafico para la determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos con bases estabilizadas con cemento. (Fuente M-MMP-4-07-021/17)

## 1.10. Módulo de superficie.

### 1.10.1. Definición.

Una de las técnicas más sencillas que se pueden emplear para obtener una indicación del comportamiento estructural de un pavimento a partir de los resultados de un ensayo de auscultación de la deflexión mediante un deflectómetro de impacto se basa en el estudio del conocido como módulo equivalente de superficie. El termino equivalente se debe a que se calcula suponiendo que la sección de pavimento (generalmente un sistema multicapa) se transforma en un semiespacio de Boussinesq.

Antes de exponer el concepto de modulo equivalente de superficie y sus aplicaciones, es necesario introducir al semiespacio de Boussinesq y las ecuaciones matemáticas que permiten obtener la deflexión en cualquier punto del mismo debido a la aplicación de una carga vertical puntual en su superficie y las que por integración, permiten obtener los mismos parámetros bajo la aplicación de una carga circular uniformemente distribuida.

J.V. Boussinesq obtuvo en 1885 la solución matemática a un problema clásico de la teoría de la elasticidad, determinando las ecuaciones cerradas que permitían obtener las tensiones, deformaciones y desplazamientos en un semiespacio homogéneo, isótropo, elástico y lineal.

1. Módulo de superficie al centro de la placa de carga, para carga distribuida. Ver ecuación (9).

$$E_o = \frac{2P(1 - \mu^2)}{\pi a d o} \quad (9)$$

2. Módulo de superficie a la distancia “r” del centro de la placa de carga, para carga puntual. Ver ecuación (10).

$$E_r = \frac{P(1 - \mu^2)}{\pi r d_r} \quad (10)$$

Donde:

$E_0$  y  $E_r$  = modulo de superficie (psi o MPa)

$P$  = carga aplicada (lbs o N)

$\mu$  = carga aplicada (generalmente 0.35)

$a$  = radio de la carga aplicada

$d_0$  = deflexion al centro de la carga aplicada (in o mm)

$d_0$  = distancia del centro de la carga aplicada (in o mm)

$d_r$  = deflexion a la distancia  $r$  del centro de la carga aplicada (in o mm)

A partir de la medida de la deflexión a diferentes distancias del centro de aplicación de la carga (como es el caso de la auscultación de la deflexión con un deflectómetro de impacto), mediante las ecuaciones anteriores pueden obtenerse los parámetros  $E_0$  y  $E_r$  a dichas distancias. Estos son los denominados módulos equivalentes de superficie y representan los valores del módulo que, para un semiespacio elástico y homogéneo de Boussinesq, darían como resultado una deflexión igual a la correspondiente medida sobre la estructura del pavimento a la distancia indicada; es decir representan el módulo de un semiespacio homogéneo equivalente, en términos de deflexión, al sistema multicapa que en realidad constituye el pavimento.

El modulo equivalente de superficie (a una determinada distancia  $r$ ) representa el modulo medio (medido en la superficie) del conjunto de capas del pavimento situadas por debajo de cierta profundidad que está relacionada con la propia distancia  $r$ .

En el caso de que la medida se realice efectivamente sobre un semiespacio homogéneo, elástico y lineal, los módulos  $E_r$  calculados a diferentes distancias  $r$  serían iguales. En la práctica, las medidas se realizan sobre una superficie de un pavimento constituido por varias capas de diferentes materiales, en general, de rigidez decreciente con la profundidad lo que hace que el modulo equivalente de superficie  $E_r$  decrezca (también generalmente) con la profundidad equivalente  $h_e$ , que como se ha dicho está relacionada con la distancia  $r$ .

A continuación, se muestra un gráfico de módulo de superficie para un pavimento modelizado como sistema de cuatro capas con las siguientes características mecánicas (se considera una relación de Poisson de 0,45 en todas las capas). Ver Figura 31.

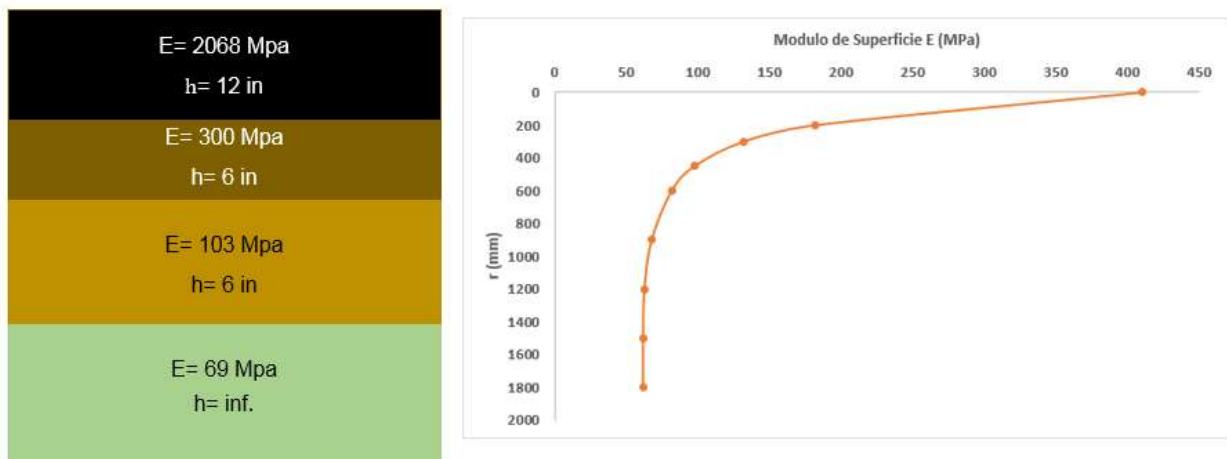


Figura 31.- Gráfico del módulo de superficie (Modificado)

Como puede verse en el gráfico, la deflexión obtenida en los sensores más alejados del punto de aplicación de la carga permite estimar con cierta precisión el módulo del terreno de cimentación. En este caso, el hecho de que el modulo equivalente no varíe con la profundidad, indica que la subrasante verifica las condiciones de homogeneidad y elasticidad lineal que se le han supuesto.

De acuerdo a lo indicado hasta ahora, el cálculo del módulo equivalente a partir de las deflexiones medidas a distintas distancias del punto de aplicación de carga es

de gran utilidad, ya que, además de dar una visión de la distribución de la rigidez de la estructura del pavimento respecto a la profundidad permite:

- a) Estimar el módulo de la subrasante, empleando para ello las deflexiones obtenidas en puntos alejados del de aplicación de la carga.
- b) Determinar si se verifican las hipótesis de homogeneidad y elasticidad lineal para la misma.
- c) Establecer la idoneidad de la disposición de sensores y si es necesario colocar alguno adicional o situarlos a diferentes distancias del punto de aplicación de la carga.
- d) La valoración de la capacidad estructural del conjunto constituido por el pavimento y la subrasante y la detección de zonas débiles en la estructura del pavimento o de capas rígidas situadas a cierta profundidad.
- e) Determinar si es necesario modificar la modelización del pavimento (introduciendo capas adicionales) a efectos de obtener resultados coherentes con los procesos de cálculo inverso, especialmente en los casos en que la subrasante no presenta un comportamiento lineal o cuando se detecta una capa débil al interior de la estructura.

El modulo equivalente de superficie es especialmente útil para proporcionar información sobre las capas inferiores del pavimento, dado que, como se ve en el grafico anterior, decrece rápidamente bajo las capas superiores y no hay mucha información disponible acerca de lo que pasa entre las profundidades equivalente de 0 y 300 mm (debido a que las ecuaciones empleadas en el cálculo no son suficientemente precisas en ese rango).

### **1.10.2. Distribución de presión.**

La deflexión de la subrasante generalmente contribuye del 60 al 80% de la deflexión máxima ( $D_0$ ) directamente debajo de la carga. La carga normalmente se distribuye

desde las capas superiores hasta la subrasante mediante la transferencia de carga de las capas a través de un cono de aproximadamente  $45^\circ$ .

Los módulos de superficie calculados a una distancia “r” son representativos del material comprimido en la zona de influencia por debajo de la profundidad “d”. A medida que aumenta la distancia horizontal, se alcanza un punto en el que solo la subrasante cae dentro de la zona de influencia y los módulos de superficie solo reflejan los módulos del material de la subrasante. Ver Figura 32.

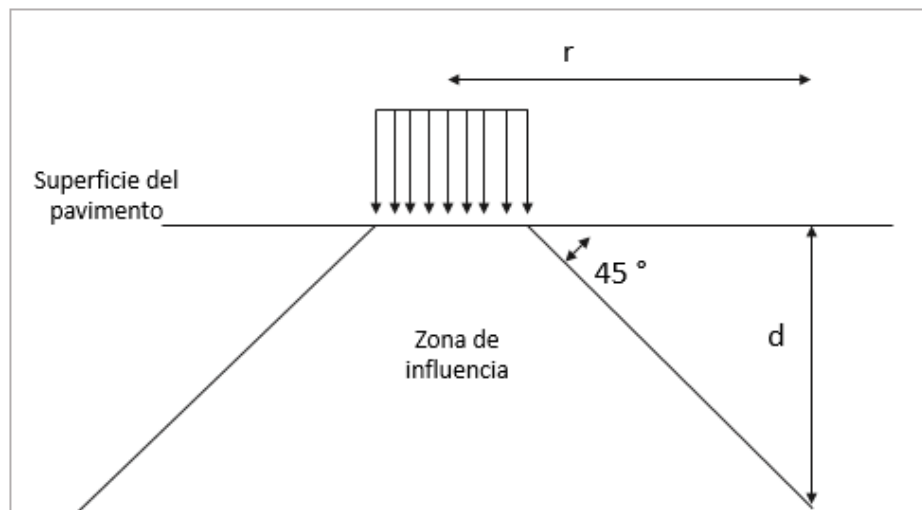


Figura 32.- Distribución de presión. (Modificado)

### 1.10.3. Gráficas de módulo de superficie

El gráfico del módulo de superficie da un panorama general acerca del comportamiento estructural del pavimento. Cuando el gráfico resulta en su forma idónea, se puede predecir un buen comportamiento, además de que los datos obtenidos son de buena calidad y sencillos de evaluar. Ver Figura 33.

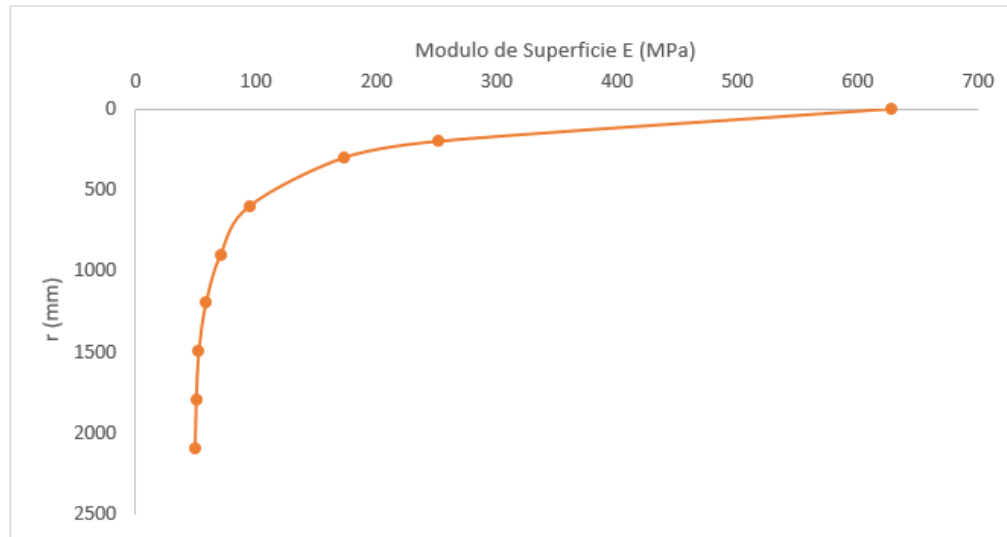


Figura 33.- Grafica de módulo de superficie "idónea". (Modificada)

Cuando existe una discontinuidad en la tendencia de la gráfica, es indicativo de la presencia de alguna grieta o junta en el pavimento. Ver Figura 34.

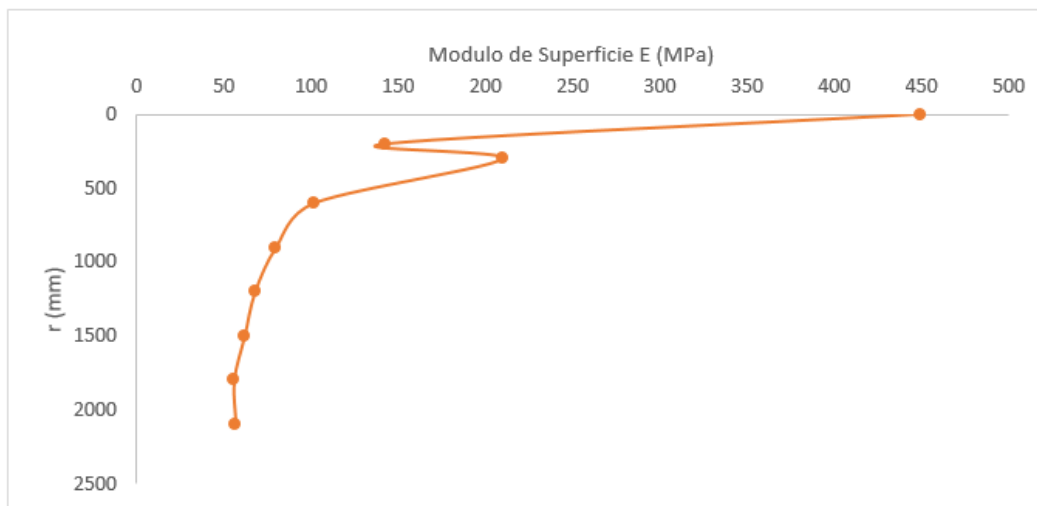


Figura 34.- Grafica de módulo de superficie "agrietamiento". (Modificada)

Cuando hay una creciente al final de la gráfica, es decir, cuando el módulo de superficie aumenta conforme aumenta la distancia, puede advertir la presencia de una subrasante no lineal compuesta de arcilla (Figura 35) y cuando el cambio es más pronunciado indica la presencia de roca o una capa rígida bajo la subrasante. Ver Figura 36.

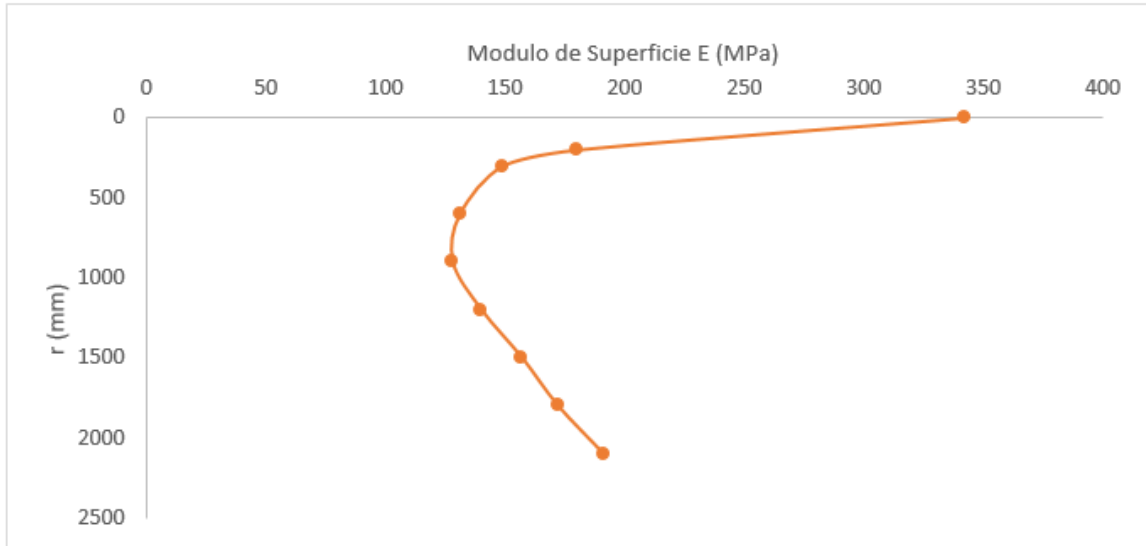


Figura 35.- Grafica de módulo de superficie "subrasante no lineal". (Modificada)

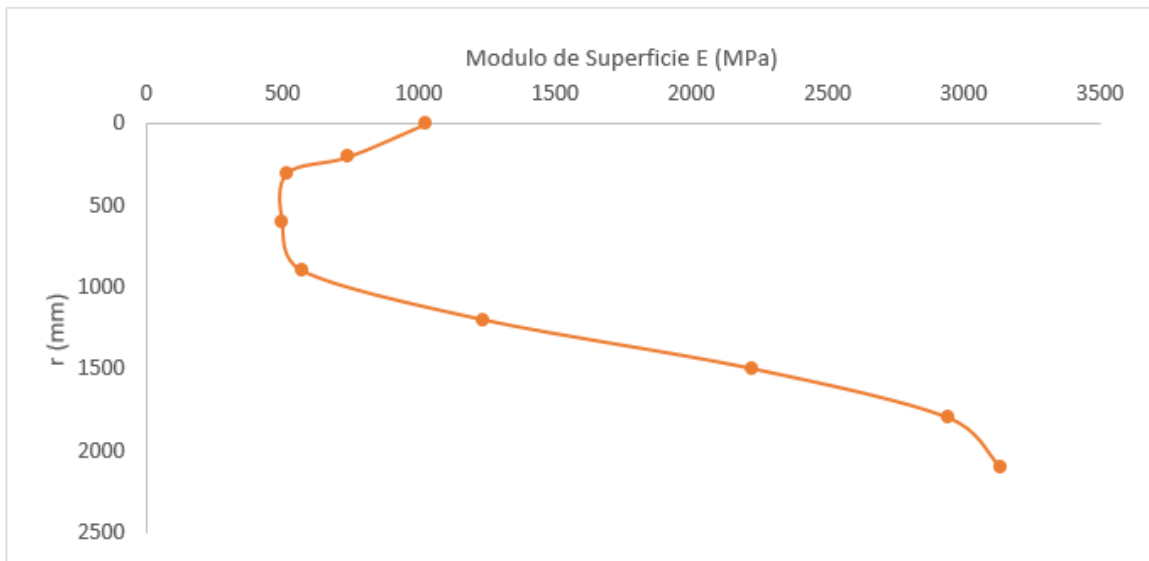


Figura 36.- Grafica de módulo de superficie "subrasante bajo roca o una capa rígida". (Modificada)

## 2. RETROCÁLCULO DE PAVIMENTOS

### 2.1. Filosofía del retrocálculo

Las diferentes herramientas computacionales empleadas para el diseño de pavimentos permiten calcular los esfuerzos, las deformaciones y las deflexiones de una estructura determinada si se conoce el valor de la carga aplicada, el espesor de las capas de pavimento y los parámetros estructurales de las mismas, como su módulo y la relación de Poisson. Por medio de estos procedimientos de cálculo, es posible obtener los valores de deflexión que se originaran en la superficie de la estructura a diferentes distancias de la carga, obteniendo de esta manera la curva de deformación del pavimento.

El procedimiento para determinar el módulo de elasticidad en los materiales de pavimentación, utilizando las deflexiones de superficie, que se deriva de su comportamiento elástico es conocido como retrocálculo o cálculo inverso. En simples palabras el retrocálculo es el proceso de convertir las deflexiones medidas en un pavimento a módulos elásticos de capas en el lugar.

La técnica de retrocálculo es una solución inversa del problema del cálculo de las deflexiones de superficie en una estructura de pavimento para la cual la carga, las propiedades elásticas de los materiales y el espesor de las capas se conocen. Ver Figura 37.

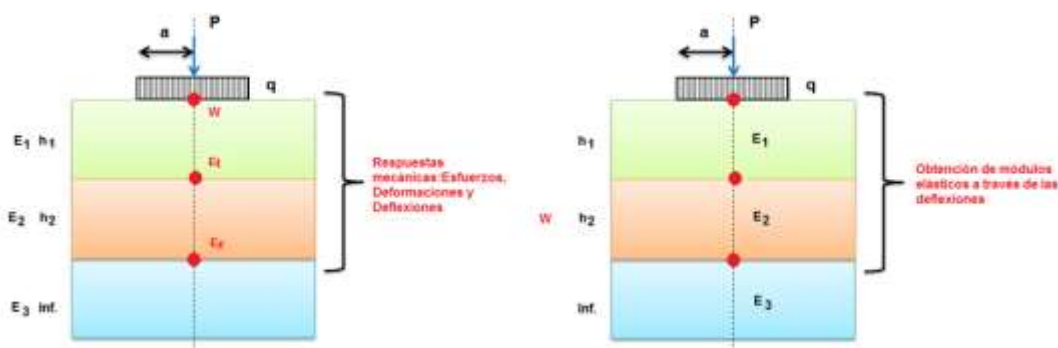


Figura 37.- Respuestas mecánicas obtenidas en el cálculo directo y en el cálculo inverso (Retrocálculo).

El cálculo inverso o retrocálculo consiste en partir de las respuestas del pavimento (para este caso especial el cuenco de deflexiones) que junto con los espesores de las capas del pavimento darán como resultado los módulos elásticos de las capas del pavimento mediante la secuencia de cálculo numérica de Odemark-Boussinesq para estructuras equivalentes, que incorpora soluciones para materiales con propiedades no lineales (comúnmente exhibidos en sub-rasantes compuestas de materiales cohesivos). Ver Figura 38.

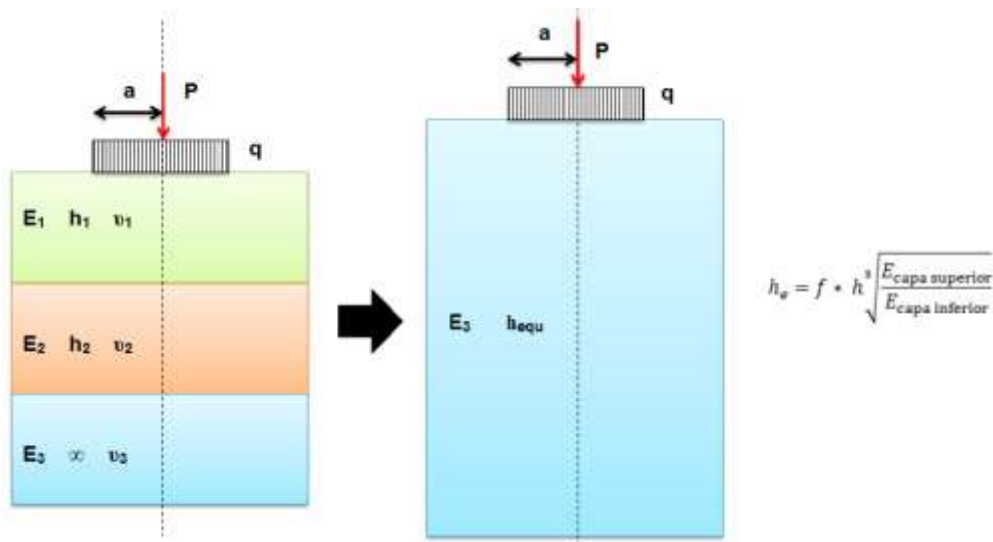


Figura 38.- Teoría de espesores equivalentes de Odemark utilizadas en el análisis de retrocálculo (IMT, 2015).

El retrocálculo involucra el cálculo de deflexiones teóricas asumiendo en primera instancia algunos valores predeterminados para los módulos de cada una de las capas.

Estos valores teóricos de deflexión medidos a través de equipos como el FWD, mediante un proceso iterativo se ajustan las curvas de deformación teóricas y medidas hasta que presenten un ajuste razonable; cuando esto ocurre, se considera que los módulos obtenidos son característicos de la respuesta del pavimento.

La adecuada convergencia o no de estos valores de deflexión puede ser determinada por medio del parámetro del error medio cuadrático o RMS (Root Mean Square). Se estima que al final de un correcto proceso de retrocálculo el valor medio cuadrático deberá ser igual o inferior a un 2%. Para ello se requiere determinar la

media cuadrática que relaciona las deflexiones mencionadas con anterioridad. Ver ecuación (11)

$$RMS (\%) = 100 \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \quad (11)$$

Donde:

*RMS (Root Mean Square) = Media cuadrática.*

*n<sub>d</sub> = Num. de mediciones sobre la cuenca de deflexiones a diferentes distancias.*

*d<sub>ci</sub> = Deflexión calculada.*

*d<sub>mi</sub> = Deflexión medida.*

## 2.2. Recomendaciones de uso.

Para llevar a cabo el análisis del retrocálculo, se requieren los espesores de las capas del pavimento de la carretera analizada. Estos espesores pueden obtenerse mediante pozos a cielo abierto o calas a distancias predeterminadas (a cada 50 o 500 m) dependiendo de la importancia del proyecto. Ver Figura 39.



Figura 39.- Espesores de capas de pavimento obtenidos de calas o sondeos (corte transversal).

Puede utilizarse con un equipo más sofisticado no destructivo como el Ground Penetrating Radar (GPR) el cual emite ondas electromagnéticas al interior del pavimento localizando cambios en las densidades de los materiales, con lo cual se pueden obtener los espesores de las capas del mismo. Ver Figura 40.

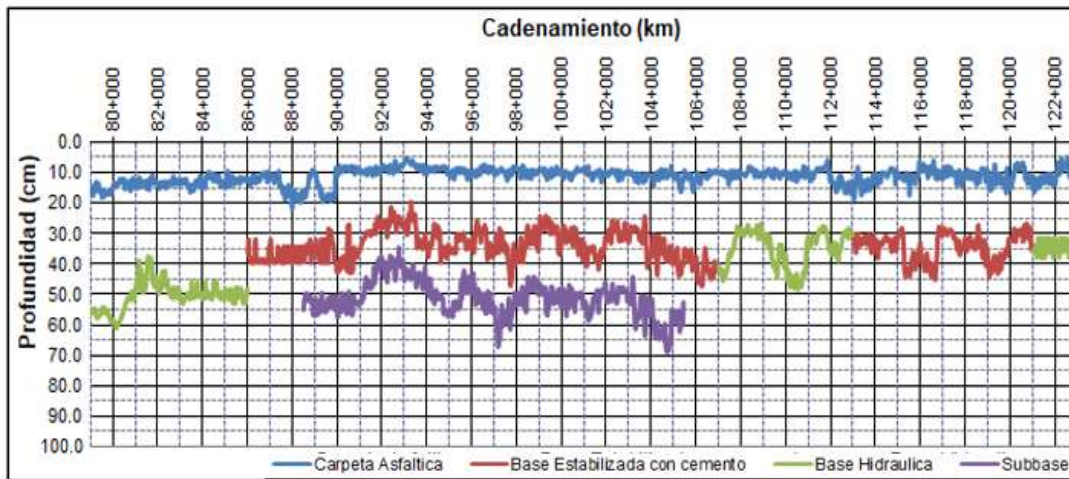


Figura 40.- Espesores y capas de pavimento determinadas con Georadar.

El retrocálculo se realiza de forma iterativa tal y como se describe a continuación:

- Se parte de una estimación inicial de los módulos elásticos de las capas.
- Con estos módulos se calculan las deflexiones mediante un programa de cálculo estructural.
- Se comparan las deflexiones calculadas con las medidas y si son suficientemente parecidas se aceptan como válidos esos módulos.
- En caso de que el ajuste no sea satisfactorio se reajustan los módulos y se vuelve a repetir el proceso.

La forma o proceso de reajuste de los módulos (inciso d) está basado en métodos matemáticos para la resolución de sistemas no lineales y es el núcleo del proceso de retrocálculo.

Existen diversas recomendaciones prácticas para llevar a cabo un retrocálculo de manera eficiente por parte de agencias de transporte en los Estados Unidos y proveedores de equipos FWD o HWD. Algunas de ellas se mencionan a continuación:

- Para secciones de pavimento con tres capas (estructura simulada o no) el valor de  $E_3$  suele ser muy preciso,  $E_1$  es razonablemente correcto y  $E_2$  puede ser cuestionable dependiendo de los espesores considerados en cada capa.
- Los módulos retrocalculados de la capa subrasante son mayores que los valores determinados en laboratorio (módulos resilientes).
- En algunos casos los módulos retrocalculados de la base hidráulica o sub-base granular resultan ser menores que los módulos de las subrasantes.
- La deformación vertical arriba de la capa subrasante obtenida con retrocálculo es dos veces mayor al valor teórico de la estructura (teoría elástica multicapa).
- Para las capas granulares y suelos, los módulos retrocalculados disminuyen conforme aumenta la humedad. No obstante, estos módulos aumentan en condiciones secas.
- Las soluciones raramente son únicas.
- Cuanto mayor es el número de capas, más combinaciones de módulos pueden coincidir con las deflexiones medidas.
- Se recomienda usar juicio y criterio ingenieril.

### **2.3. Modelación de pavimentos para retrocálculo.**

Se deben considerar diferentes factores a la hora de establecer un modelo para la sección de un pavimento en retrocálculo, a continuación, se describen los aspectos a considerar:

#### **2.3.1. Numero de capas.**

Se recomienda utilizar 3 o un máximo de 4 capas con módulos desconocidos en el proceso de retrocálculo. Cuando el número de capas aumenta, el error también incrementa y puede dar resultados irrazonables. Ver Figura 41.



Figura 41.- Capas asfálticas de un pavimento (extracción de núcleo).

Cuando en una estructura de pavimento se encuentra una capa rígida en medio de dos capas débiles, el proceso de retrocálculo puede producir módulos no realistas, en este caso puede ser necesaria una prueba de laboratorio para determinar los módulos de capa.

El método de retrocálculo introduce las soluciones de campo de esfuerzo de las teorías de Odemark-Boussinesq-Burmister en cuyos postulados originales se señala que todas y cada una de sus capas se extienden indefinidamente de manera horizontal, es decir, sin que exista discontinuidad alguna.

En pavimentos con alto nivel de deterioro como los que se tienen por fatiga no se cumple este postulado clave en la evaluación del cálculo inverso. Ver Figura 42.



Figura 42.- Discontinuidad longitudinal en pavimentos altamente agrietados (piel de cocodrilo).

### 2.3.2. Espesor de las capas.

#### a) Capas asfálticas en caliente

Los tratamientos superficiales, así como las capas de rodadura tipo SMA, Open Graded o CASAA no se consideran en el análisis dado que no tienen aporte de tipo estructural. Ver Figura 43.

Resulta difícil obtener módulos retrocalculados para capas asfálticas menores a 7.5 cm, este tipo de carpetas tiene un efecto mínimo en la deflexión superficial del pavimento, pueden tener valores de módulos elásticos irracionales y es muy susceptible a generar un error de análisis.

Se recomienda utilizar este tipo de capas con capas adyacentes como la base negra o base estabilizada con emulsión. Si no es el caso se recomienda fijar un módulo (recomendado) para permitir el correcto cálculo de las capas inferiores de base y subrasante.



Figura 43.- Capa de rodadura

Teóricamente es posible obtener módulos retrocalculados para cada capa asfáltica individual, pero generalmente no se recomienda debido a la complejidad de evaluar tres o cuatro capas asfálticas debido a que los programas de retrocálculo no permiten diferenciar la variación de módulos elásticos entre las capas o sobrecarpetas asfálticas. Ver Figura 44.



Figura 44.- Sobrecarpetas asfálticas (extracción de núcleo)

Por lo tanto, se recomienda combinar todas las capas en una sola (*Mapping Layers*) y asignar un valor semilla promedio que considere cierto nivel de deterioro en dichas capas. Ver Figura 45.

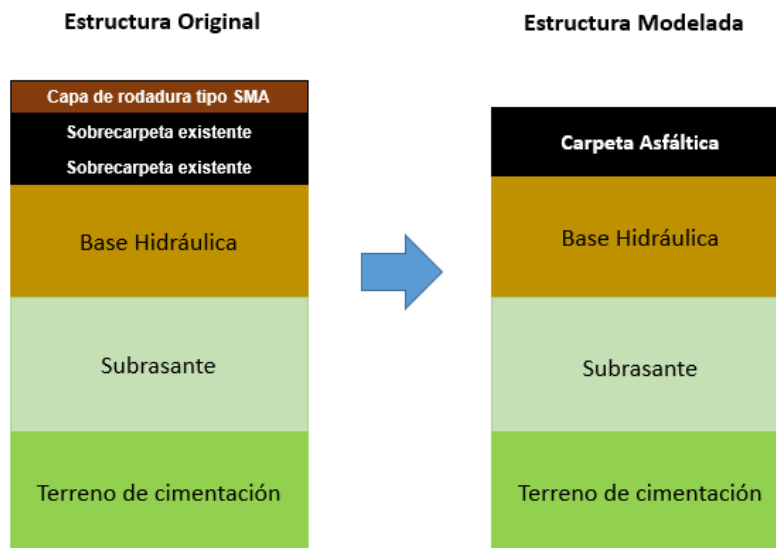


Figura 45.- Simplificación de capas asfálticas (Mapping Layers)

## b) Base/Subbase granular

La presencia de una capa delgada de base debajo de una capa gruesa de carpeta asfáltica o concreto hidráulico da como resultado un módulo de base muy bajo.

Esto puede ocurrir debido a los insignificantes efectos de una base delgada debajo de una capa gruesa muy rígida o debido a la sensibilidad al esfuerzo de los materiales granulares. En este caso es recomendable combinar la base con la subrasante y realizar el retrocálculo como un sistema de dos capas.

Cuando se tenga una sub-base hidráulica, se debe combinar con la base hidráulica en una sola capa (*Mapping Layers*) y se considera un módulo semilla promedio. Ver Figura 46.

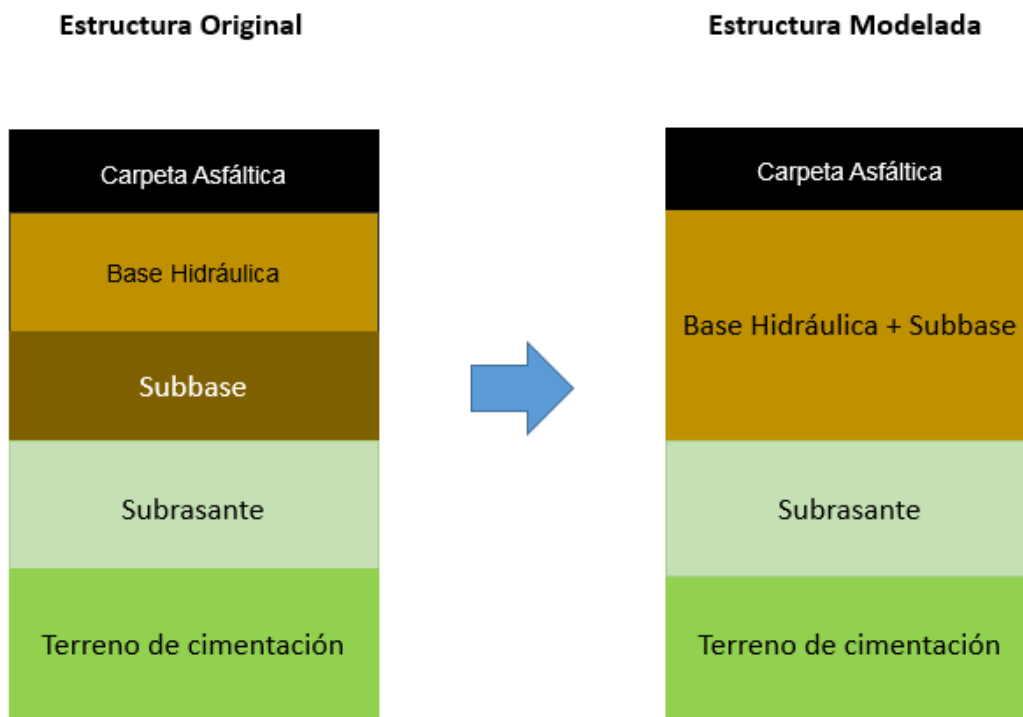


Figura 46.- Simplificación de capas granulares (Mapping Layers)

### c) Subrasante.

Cuando el módulo retrocalculado de la subrasante es demasiado alto, se debe investigar mediante calas en campo la presencia de roca, una capa rígida o un nivel freático alto.

**2.3.3. Rangos y módulos iniciales.**

La Federal Aviation Administration (FAA) recomienda ciertos valores de módulos retrocalculados (o módulos del lugar como también le denominan) para varios materiales de pavimentación. Esta recomendación del FAA la hace en función de haber medido y retrocalculado cientos de secciones de pavimento flexibles, semirígidos y rígidos en su laboratorio experimental “William J. Hughes Technical Center” y en su tren de pistas de aterrizaje para aviones por varios años en Atlantic City, NJ. Estos valores pueden verificarse en el programa de retrocálculo BAKFAA del mismo instituto americano. Ver Tabla 2.

*Tabla 2.- Módulos elásticos retrocalculados recomendados por la FAA (BAKFAA, 2011).*

Material	Valor mínimo		Valor típico		Valor máximo	
	MPa	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa	Kg/cm <sup>2</sup>
<b>Carpeta Asfáltica (asfalto convencional AC 20)</b>	500	5,099	3,500	35,690	14,000	142,760
<b>Concreto Hidráulico</b>	7,000	71,380	35,000	356,901	60,000	611,830
<b>Base estabilizada con cemento (alto contenido de cemento)</b>	7,000	71,380	14,000	142,760	20,000	203,943
<b>Base estabilizada con asfalto (base negra)</b>	700	7,138	3,500	35,690	10,000	101,972
<b>Base estabilizada con cemento (bajo contenido de cemento)</b>	1,400	14,276	5,000	50,986	14,000	142,760
<b>Base Hidráulica</b>	70	714	200	2,039	350	3,569
<b>Sub-base Hidráulica</b>	30	306	100	1,020	200	2,039
<b>Subrasante</b>	70	714	350	3,569	1,400	14,276
<b>Terreno natural o terracerías</b>	20	204	50	510	170	1,734

De manera paralela el FHWA recomienda valores máximos y mínimos para distintos materiales y condiciones particulares de las carpetas asfálticas. Ver Tabla 3.

*Tabla 3.- Módulos elásticos retrocalculados recomendados por FHWA (FHWA, 2006).*

Material	Valor mínimo		Valor máximo	
	MPa	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa	Kg/cm <sup>2</sup>
<b>Carpeta asfáltica/base tratada con asfalto</b>	700	7138	25,000	254,929
<b>Grava sin triturar</b>	50	510	750	7,648
<b>Grava triturada</b>	75	765	1,000	10,197

Material	Valor mínimo	Valor máximo	Material	Valor mínimo
Piedra triturada	100	1020	1,500	15,296
Arena	40	408	500	5,099
Mezclas de suelo (predomina suelo fino)	50	510	700	7,138
Mezclas de suelo (predomina suelo grueso)	60	612	800	8,158
Base Hidráulica	35	357	450	4,589
Mezcla asfáltica en caliente	700	7,138	25,000	254,929
Mezcla asfáltica rica en asfalto (arena-asfalto)	700	7,138	25,000	254,929
Base estabilizada con cemento	2,000	20,394	20,000	203,943
Base estabilizada con cemento (alto porcentaje de cemento)	4,500	45,887	45,000	458,872
Suelo-Cemento	1,000	10,197	7,000	71,380
Caliza	150	1,530	1,500	15,296
Carpeta asfáltica en buen estado (sin agrietamiento)	10,000	101,972	70,000	713,801

De igual manera se recomiendan valores para la relación de Poisson para diferentes capas de pavimento. Ver Tabla 4.

Tabla 4.- Recomendación de relaciones de Poisson para varios pavimentos y materiales (FHWA,2006)

Tipo de material	Relación de Poisson
Mezcla asfáltica en caliente	0.35
Concreto (cemento Portland)	0.15 - 0.20
Base o subbase estabilizada	0.25 – 0.35
Base o subbase no estabilizada	0.35
Subrasante cohesiva	0.45
Subrasante con baja cohesión	0.35 – 0.45
Suelo de cimentación	0.35

## 2.4. Retrocálculo manual mediante iteraciones

### 2.4.1. Funcionamiento del software WinJULEA

Para comprender el proceso de retrocálculo se llevará a cabo un análisis utilizando el programa elástico-multicapa WinJULEA del Dr. Jacob Uzan de la Universidad Técnica de Israel. Ver Figura 47.

Este apartado tiene la finalidad de evidenciar lo tardado y laborioso que puede llegar a ser un retrocálculo de manera manual a través de iteraciones, proponiendo valores de los módulos elásticos para capa con el fin de igualar las cuencas deflectométricas medidas con las deflexiones calculadas y por ende obtener un RMS bajo. De esta forma enfatizar las ventajas que ofrece el uso de programas de retrocálculo que hacen estas tareas en cuestión de segundos.

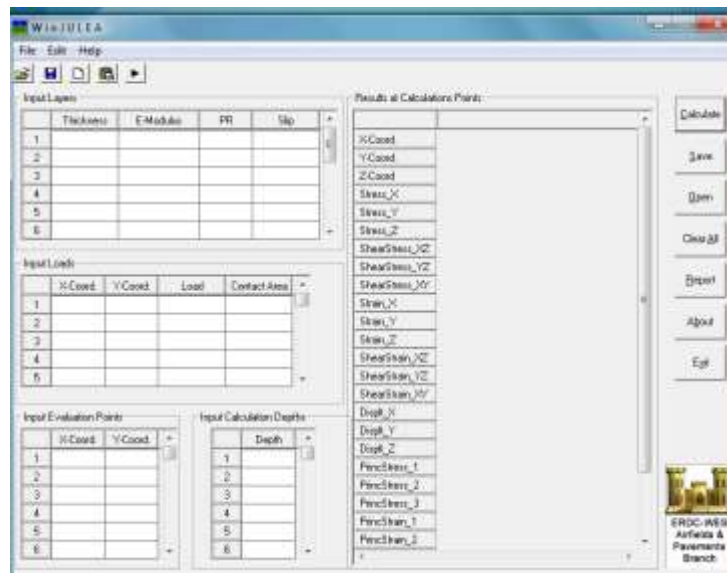


Figura 47.- Interfaz de inicio del programa WinJULEA.

A continuación, se describen los pasos a seguir en el programa para obtener las deflexiones:

- 1) Para la tabla "Input Layers" se ingresan los datos de entrada correspondientes a la estructura a evaluar. Ver Figura 48.

En la columna "thickness" se coloca el espesor de las capas que conforman al pavimento en pulgadas (para la capa de terreno de cimentación se considera un valor de cero).

En la columna "E-Modulus" se introducen los módulos elásticos teóricos, en psi.

En la columna "PR" (Poisson Ratio) se colocan la relación de Poisson para cada capa a evaluar.

En la columna “Slip” se colocan datos de rugosidad, para este caso se recomienda utilizar el valor de cero para todos los casos.

	Thickness	E-Modulus	PR	Slip
1				
2				
3				
4				
5				
6				

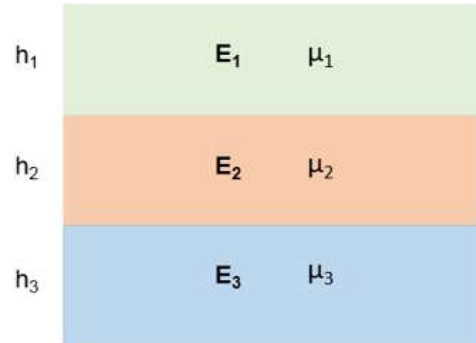


Figura 48.- Datos de entrada para las capas de pavimento

2) Para la tabla “Input Loads” se introducen los datos correspondientes a la carga y su punto de aplicación. Ver Figura 49.

Para “X y Y Coord” se colocan las coordenadas (x,y) de donde se encuentra la aplicación de la carga, para este caso se toma el punto de aplicación como punto de origen (0,0).

Para “Load” se introduce el valor de la carga “P” en libras.

Para “Contact Area” se coloca el área de contacto del plato de carga calculada a partir del dato de su radio (a) en pulgadas cuadradas.

	X-Coord.	Y-Coord.	Load	Contact Area
1				
2				
3				
4				
5				

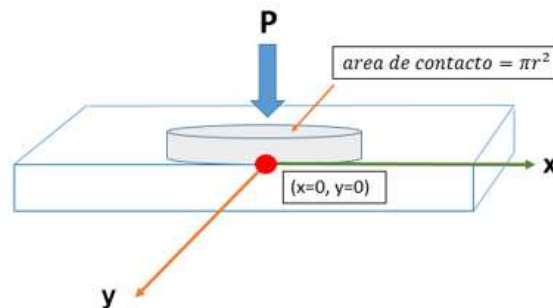


Figura 49.- Localización y magnitud de la carga aplicada.

- 3) Posteriormente se insertan los datos correspondientes a la localización de los puntos donde se requiere calcular la deflexión.

Para la tabla “Input Evaluation Point” se introducen las coordenadas (X, Y) de los puntos donde se va a realizar el cálculo, para este caso se deben ingresar los datos de “r” en pulgadas proporcionados como datos en “X”, que corresponden a las distancias donde se midieron las deflexiones (geófonos) y para la coordenada “Y” todos los puntos son 0 (bajo el plato de carga). Ver Figura 50.

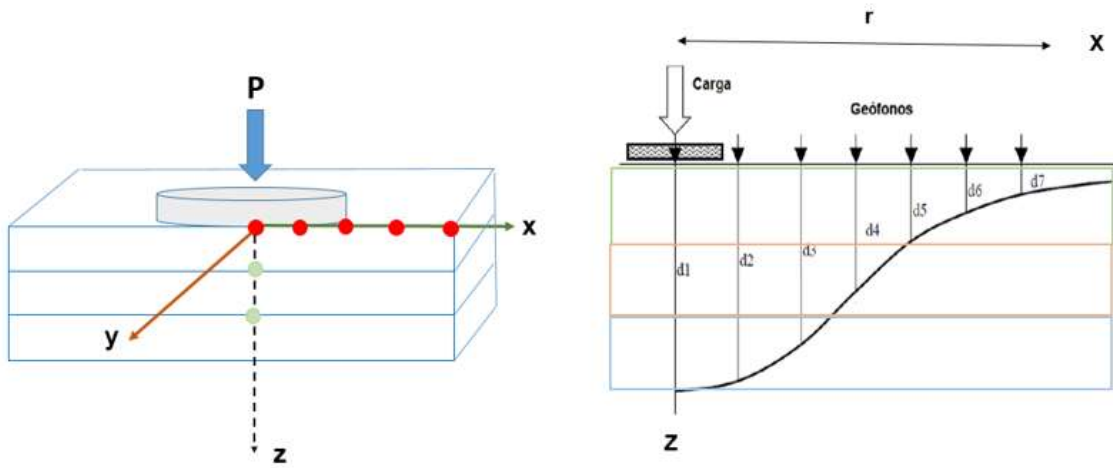


Figura 50.- Localización de los puntos a evaluar

- 4) Para la tabla “Input calculation Depth” se introduce la profundidad a la que se requiere el cálculo, para este caso la profundidad será igual a 0 debido a que ahí se encuentra la deflexión máxima medida. Ver Figura 51.

Input Evaluation Points	
	X-Coord. Y-Coord.
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Input Calculation Depths	
	Depth
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Figura 51.- Profundidad de análisis

5) Después, al seleccionar la opción “Calculate” se mostrarán los resultados del cálculo, los datos a considerar serán los valores en “Displt-Z”.

Estos valores corresponden a las deflexiones calculadas que posteriormente son ingresadas a Excel para hacer el cálculo de RMS y calcular los módulos elásticos representativos de cada capa de pavimento. Ver Figura 52.

Results at Calculations Points

	Point 7	Point 8	Point 9
Z-Coord	0.0000	0.0000	0.0000
Stress_X	4.1441	2.3549	1.4133
Stress_Y	-3.1861	-2.9288	-2.4237
Stress_Z	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_YZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_XY	0.0000	0.0000	0.0000
Strain_X	0.12231E-04	0.78604E-05	0.52595E-05
Strain_Y	-0.10783E-04	-0.87280E-05	-0.67869E-05
Strain_Z	-0.77977E-06	0.46719E-06	0.82244E-06
ShearStrain_YZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStrain_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStrain_XY	0.0000	0.0000	0.0000
Displt_X	0.0000	0.0000	0.0000
Displt_Y	-0.58723E-03	-0.47041E-03	-0.37796E-03
Displt_Z	0.62203E-02	0.50932E-02	0.42448E-02
PrincStress_1	4.1441	2.3549	1.4133
PrincStress_2	-0.49330E-06	-0.35558E-06	-0.25822E-06
PrincStress_3	-3.1861	-2.9288	-2.4237
PrincStrain_1	0.12231E-04	0.78604E-05	0.52595E-05
PrincStrain_2	-0.77977E-06	0.46719E-06	0.82244E-06
PrincStrain_3	-0.10783E-04	-0.87280E-05	-0.67869E-05
MaxShear	3.6651	2.6418	1.9185

Figura 52.- Tabla de resultados calculados

### 2.4.2. Ejemplo práctico.

A continuación, se muestra un ejemplo práctico para realizar el proceso de retrocálculo de forma “manual”, es decir, mediante iteraciones evaluando solo una cuenca deflectométrica sin ayuda de un software de retrocálculo de la siguiente manera:

- a) Con la ayuda del software WinJULEA se calcularán las deflexiones a partir de los datos conocidos de la estructura, como se mencionó anteriormente, se propondrán valores de los módulos elásticos tratando de igualar los valores reales in-situ.
- b) Posteriormente los datos obtenidos de las deflexiones se utilizarán en una hoja de cálculo donde se buscará igualar la cuenca de deflexiones medida (FWD) y la cuenca de deflexiones calculada (WinJULEA).
- c) Mediante ciclos iterativos se buscará obtener el valor de RMS más bajo posible; cuando esto suceda se considerarán los valores de módulos elásticos propuestos como representativos de la estructura.

Los datos deflectométricos correspondientes al ejemplo mencionado a realizar son los siguientes: (ver Tabla 5)

*Tabla 5.- Datos deflectométricos.*

<b>r (in)</b>	<b>Deflexión (mils)</b>
0	17.6
8	14.9
12	13.4
18	11.6
24	10.00
36	7.65
48	6.00
60	4.83
72	3.99

Como se explicó anteriormente el valor de “r” corresponde a las distancias de los puntos donde se tomó la medida de la deflexion, es decir, la distancia a la que se encuentran los geofonos con respecto al centro del plato de carga, por ende las deflexiones mostradas son las deflexiones medidas mediante el deflectómetro de impacto ya normalizadas y corregidas por temperatura.

Los datos correspondientes a la estructura a evaluar (numero de capas, espesor y relacion de poisson) y la carga aplicada (valor de la carga y radio del plato de carga, r) se muestran en la Figura 53.

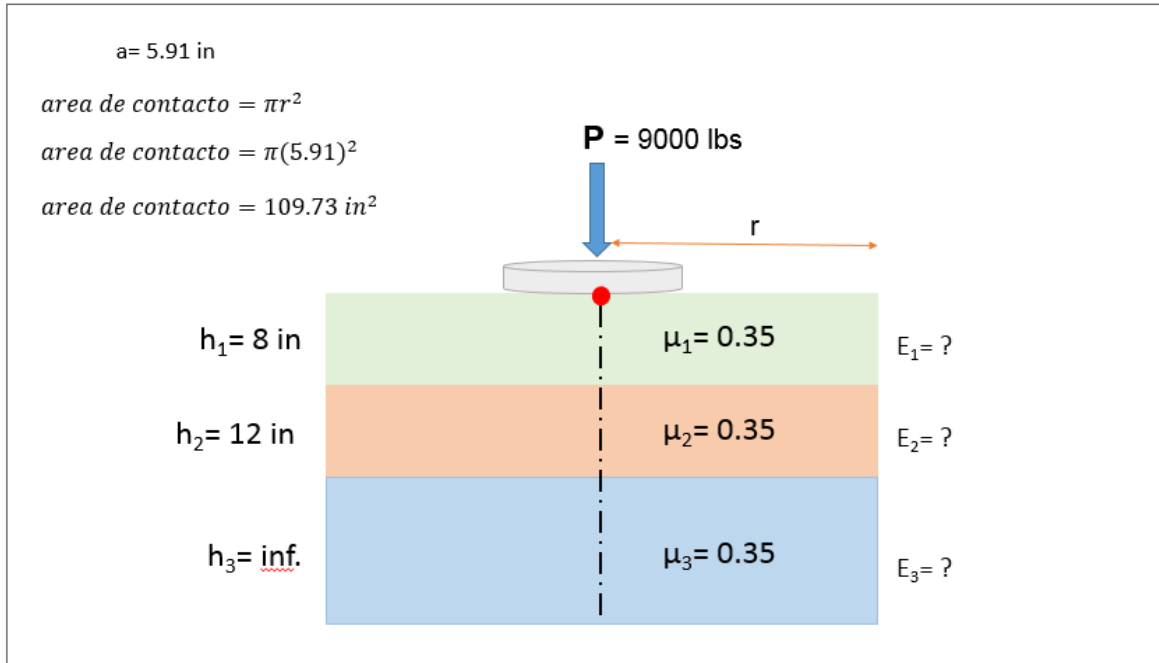


Figura 53.- Datos de la estructura

- **Primera iteración**

Para comenzar el cálculo se introducen los datos correspondientes a la estructura, la carga y los puntos a evaluar en el programa WinJULEA; para la primera iteración se proponen los siguientes módulos elásticos:  $E_1 = 600,000 \text{ psi}$ ,  $E_2 = 55,000 \text{ psi}$  y  $E_3 = 9,200 \text{ psi}$ . Ver Figura 54.

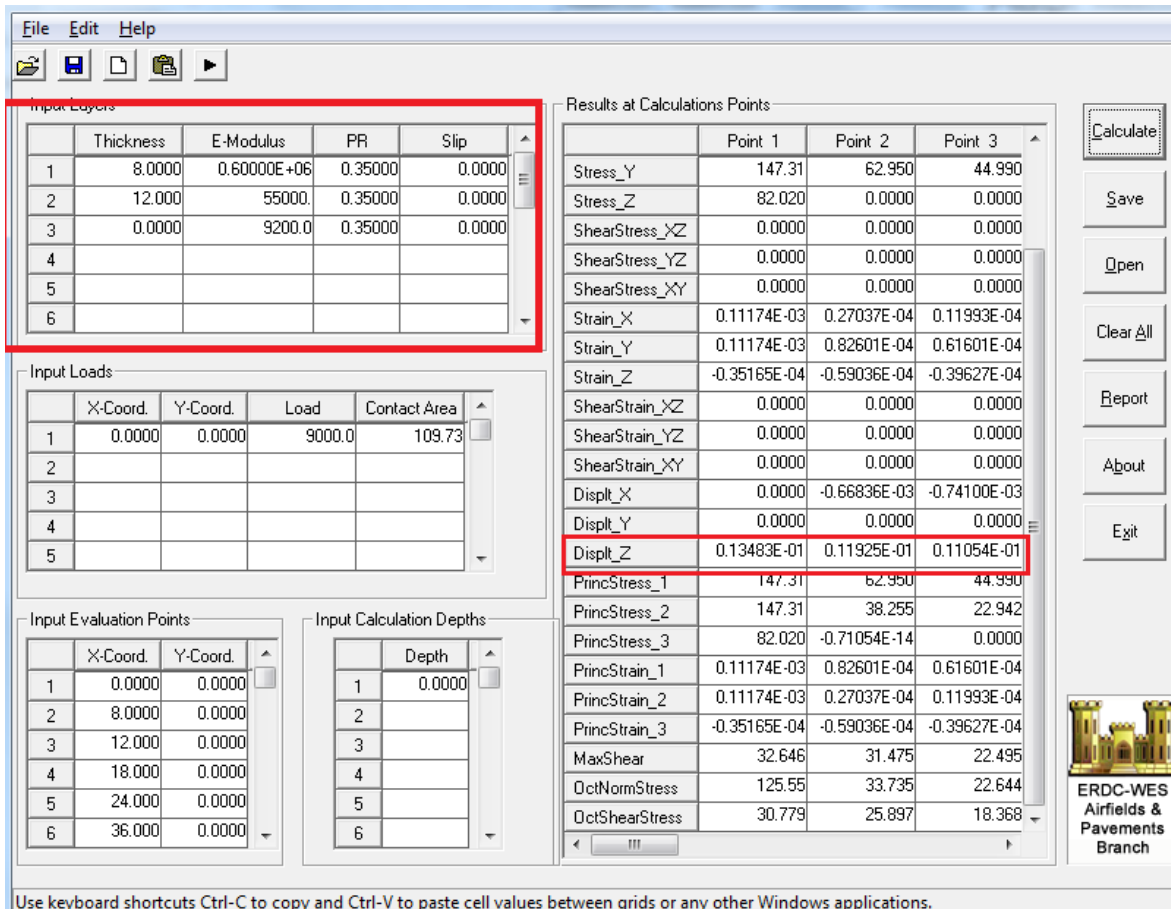


Figura 54.- Módulos elásticos propuestos y deflexiones calculadas (Primera iteración)

Como ya se indicó anteriormente los datos de “Displ-Z” (ver Figura 54) corresponden a las deflexiones calculadas para los módulos elásticos propuestos, y son los datos de interés para este ejercicio. Cabe aclarar que en este caso son 9 valores de deflexiones (Point 1, 2, 3, ...9) debido a que corresponden al número de puntos medidos o geófonos (X-Coord) y a la profundidad 0 (Depth) debido que ahí se encuentra la deflexión máxima.

Una vez obtenidas las deflexiones, se introducen los valores en la hoja de Excel para comparar las deflexiones medidas con las calculadas y obtener el RMS correspondiente. El valor del RMS de la primera iteración se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6.- Cálculo de RMS (Primera iteración)

PRIMERA ITERACIÓN			
r (in)	Deflexión medida (in)	Deflexión calculada (in)	RMS
	FWD	WinJULEA	
0	0.01760	0.01348	0.0547
8	0.01490	0.01193	0.0399
12	0.01340	0.01105	0.0307
18	0.01160	0.00988	0.0220
24	0.01000	0.00883	0.0136
36	0.00765	0.00711	0.0051
48	0.00600	0.00578	0.0014
60	0.00483	0.00476	0.0002
72	0.00399	0.00398	0.0000
		RMS=	<b>13.64%</b>

Para la primera iteración se tiene un RMS de 13.6 %, lo cual nos indica que los módulos elásticos propuestos aún están lejos de los valores reales. Como se puede observar la gráfica de deflexión calculada (línea roja) está por arriba de la gráfica de deflexión medida (línea azul), es decir, la deflexión calculada es menor por lo cual se puede concluir que los módulos elásticos propuestos resultaron mayores que los reales. Ver Figura 55.

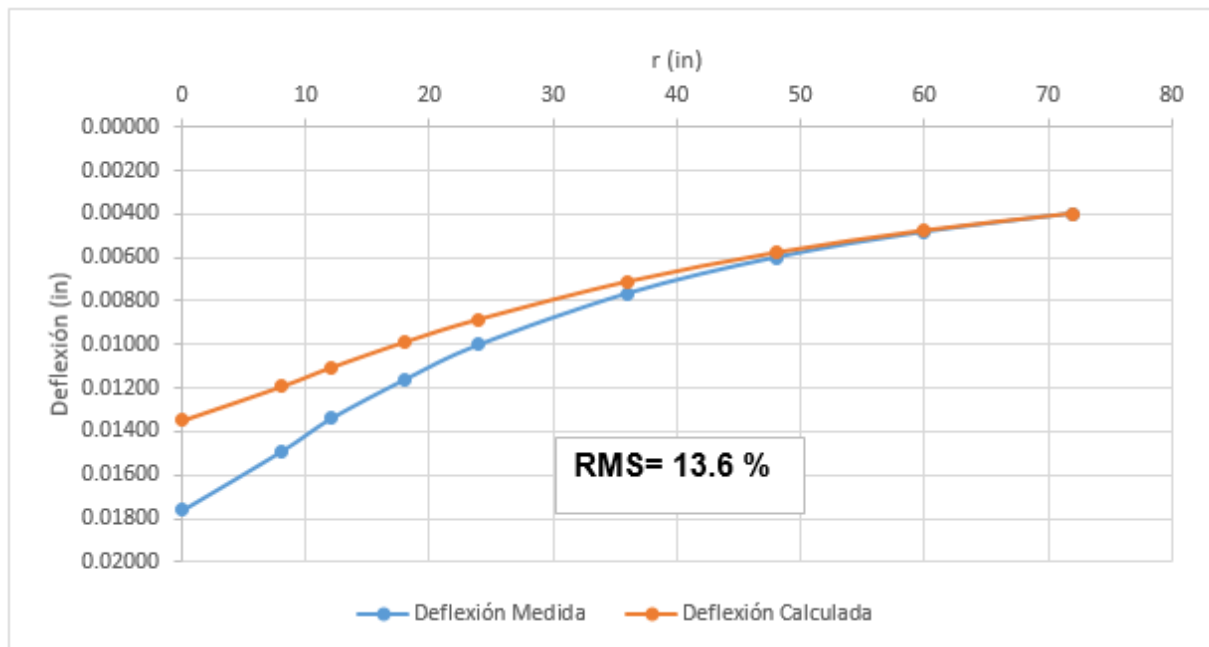


Figura 55.- Cuenca de deflexiones (Primera iteración)

- **Segunda iteración**

Con base en el análisis de la primera iteración se propone disminuir el valor de los módulos elásticos de la siguiente manera:  $E_1= 500,000$  psi,  $E_2= 50,000$  psi y  $E_3= 9,000$  psi.

Para el programa WinJULEA solo es necesario cambiar los valores del módulo elástico, los demás parámetros se mantienen igual. Ver Figura 56.

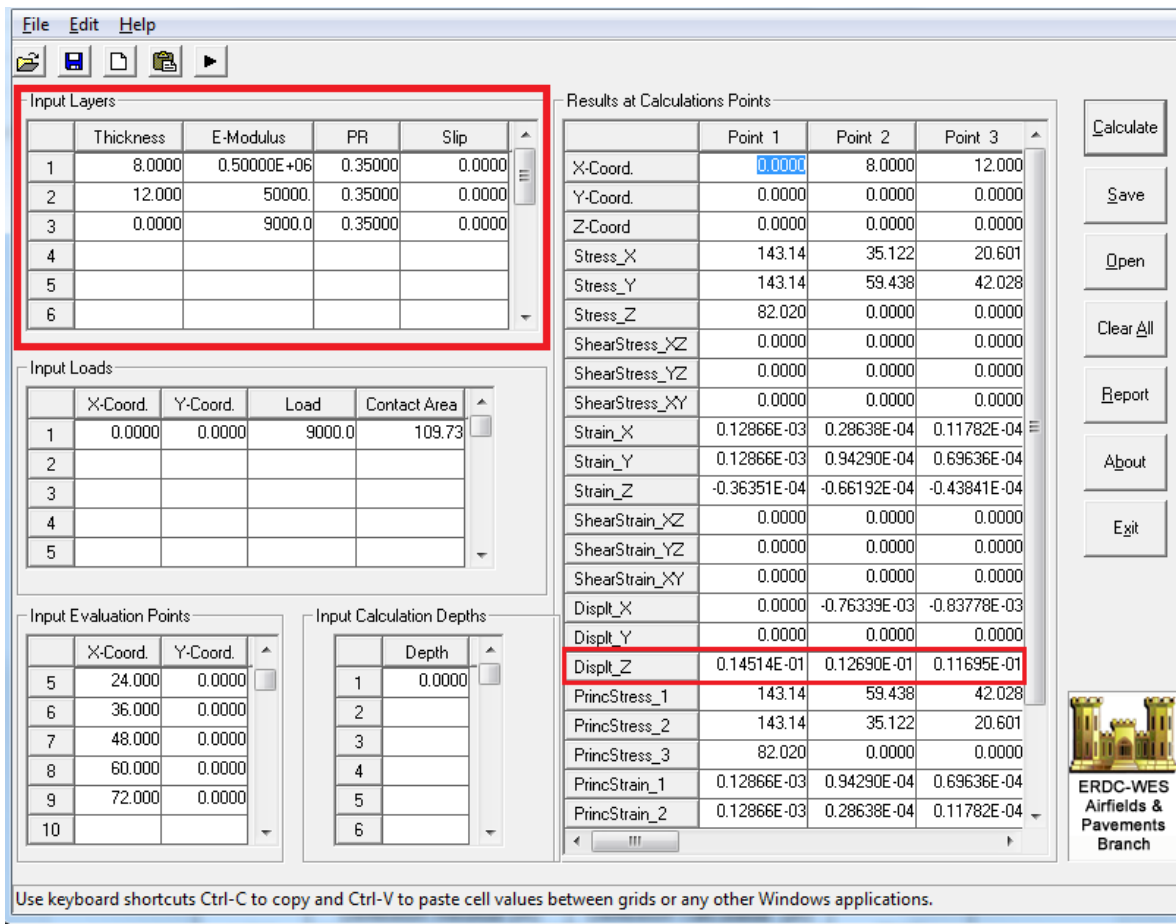


Figura 56.- Módulos elásticos propuestos y deflexiones calculadas (Segunda iteración)

Una vez ingresados los datos en el programa se obtienen las deflexiones correspondientes a los módulos elásticos propuestos y se procede a calcular el RMS con ayuda de una hoja de Excel. Ver Tabla 7.

Tabla 7.- Cálculo de RMS (Segunda iteración)

SEGUNDA ITERACIÓN			
r (in)	Deflexión medida (in)	Deflexión calculada (in)	RMS
	FWD	WinJULEA	
0	0.01760	0.01451	0.0307
8	0.01490	0.01269	0.0220
12	0.01340	0.01170	0.0162
18	0.01160	0.01038	0.0112
24	0.01000	0.00922	0.0061
36	0.00765	0.00735	0.0016
48	0.00600	0.00593	0.0001
60	0.00483	0.00487	0.0001
72	0.00399	0.00406	0.0003
RMS=			<b>9.9%</b>

Para la segunda iteración se tiene un RMS de 9.9 %, este valor es menor que el del primer caso, se puede observar como las dos graficas se van juntando más, sin embargo, este valor aun no es aceptable. Ver Figura 57.

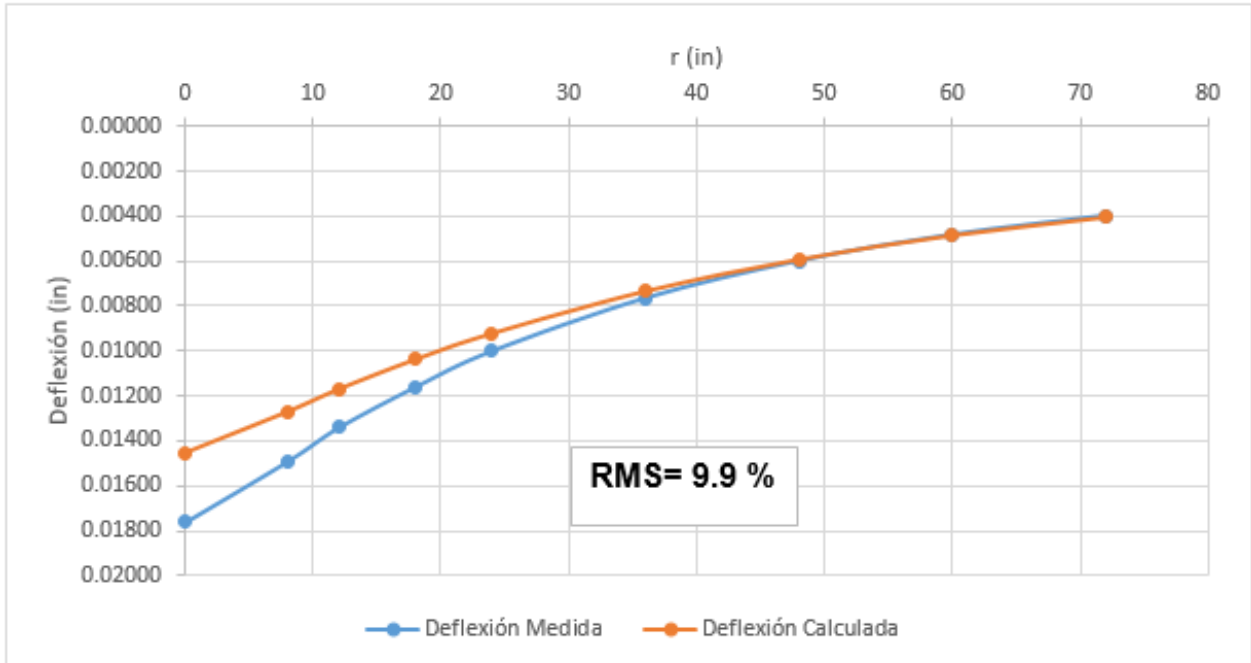


Figura 57.- Cuenca de deflexiones (segunda iteración)

• Tercera iteración

De acuerdo a los resultados obtenidos de la segunda iteración se puede deducir que los valores propuestos deben ser menores, principalmente en las primeras capas pues recordando la gráfica anterior (Figura 57) al principio de esta existe más separación. Por consiguiente, para la tercera iteración se propone disminuir los módulos elásticos a los siguientes valores:  $E_1= 450,000$  psi,  $E_2= 48,000$  psi y  $E_3= 8,700$  psi. Ver Figura 58.

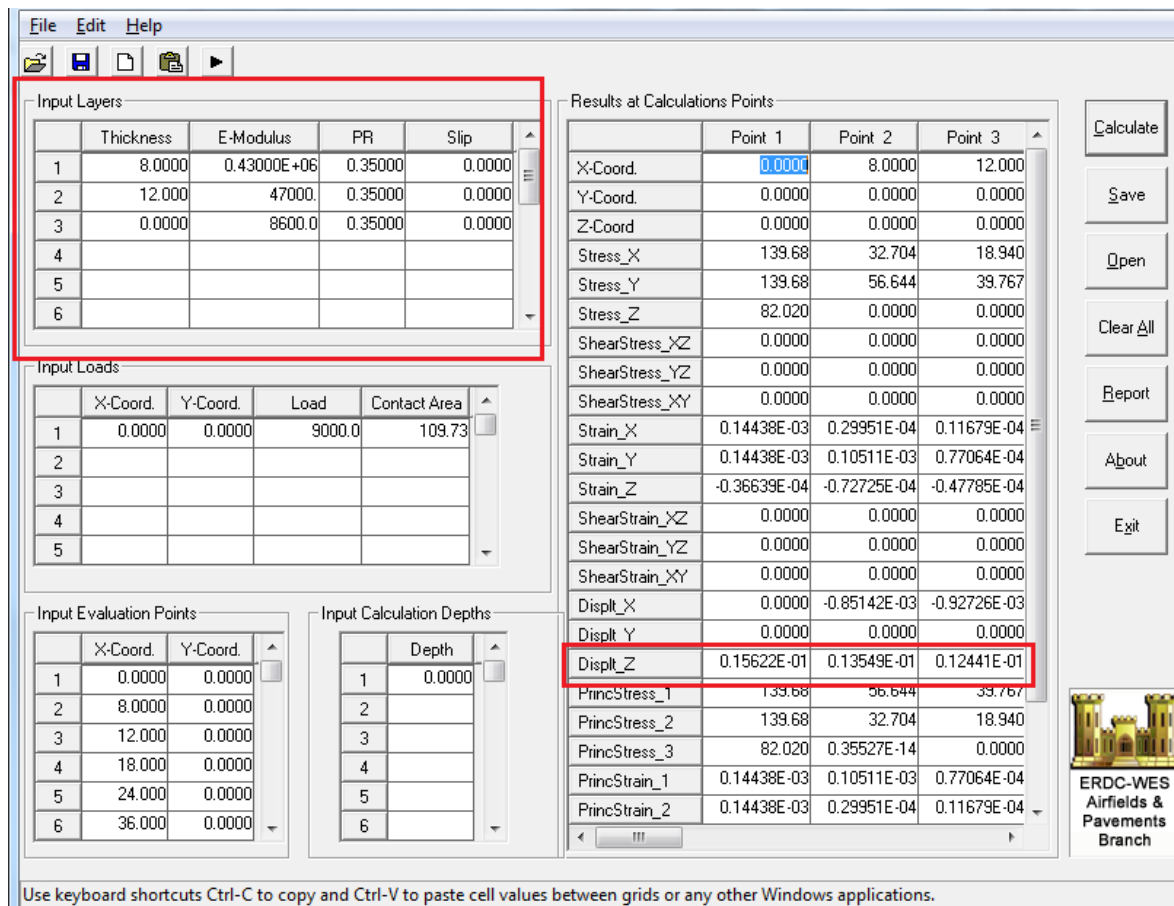


Figura 58.- Módulos elásticos propuestos y deflexiones calculadas (Tercera iteración)

Una vez obtenidas las deflexiones correspondientes a los módulos elásticos propuestos, se procede a calcular el RMS con ayuda de una hoja de Excel. El valor de RMS obtenido para la tercera iteración se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8.- Cálculo de RMS (Tercera iteración)

TERCERA ITERACIÓN			
r (in)	Deflexión (in)		RMS
	medida (in)	calculada (in)	
	FWD	WinJULEA	
0	0.01760	0.01562	0.01263
8	0.01490	0.01355	0.00822
12	0.01340	0.01244	0.00512
18	0.01160	0.01099	0.00276
24	0.01000	0.00974	0.00069
36	0.00765	0.00772	0.00009
48	0.00600	0.00622	0.00134
60	0.00483	0.00509	0.00296
72	0.00399	0.00424	0.00407
		RMS=	<b>6.49%</b>

Con los valores propuestos se logró disminuir el RMS a un 6.49%, sin embargo, aun no se considera un valor satisfactorio, por lo que será necesaria otra iteración. Ver Figura 59.

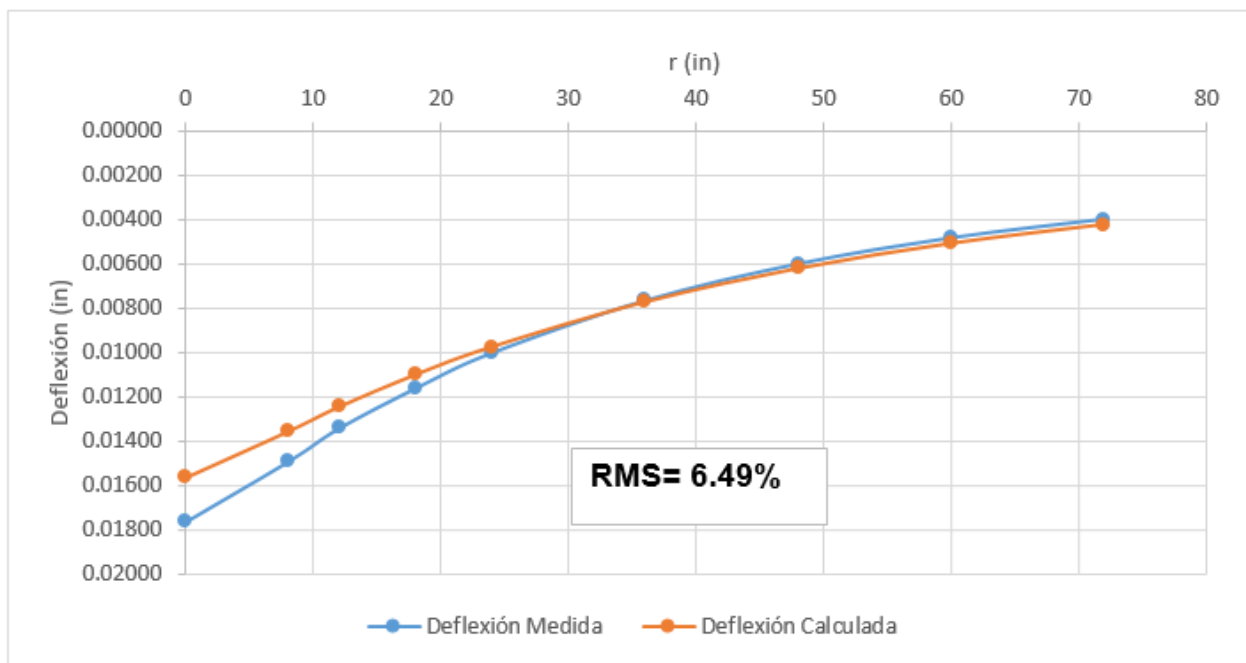


Figura 59.- Cuenca de deflexiones (Tercera iteración)

• Cuarta iteración

Con base en la tercera iteración la tendencia conlleva a disminuir los módulos elásticos propuestos; para la cuarta iteración se proponen los siguientes valores.  $E_1= 430,000$  psi,  $E_2= 47,000$  psi y  $E_3= 8,600$  psi. Ver Figura 60.

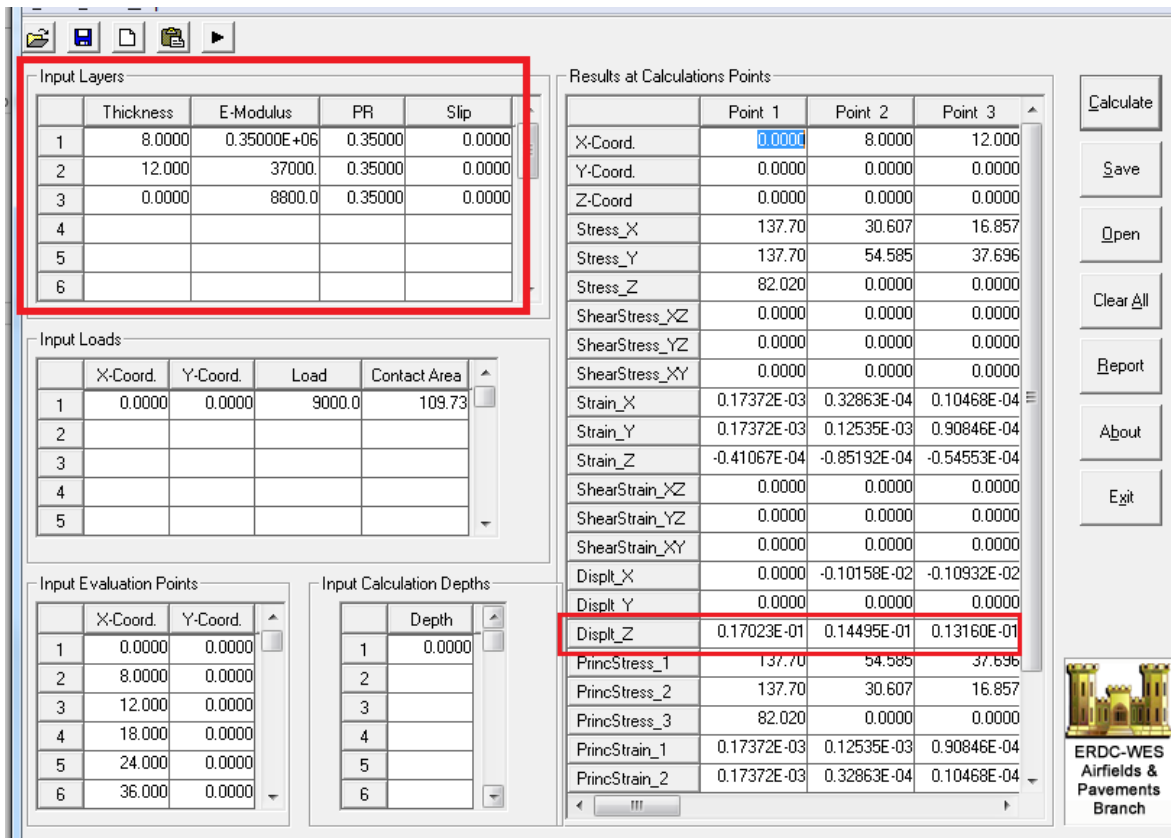


Figura 60.- Módulos elásticos propuestos y deflexiones calculadas (Cuarta iteración)

Una vez obtenidas las deflexiones correspondientes a los módulos elásticos propuestos, se procede a calcular el RMS con ayuda de una hoja de Excel.

La Tabla 9 muestra los valores de RMS obtenidos, para la cuarta iteración se logró disminuir nuevamente el valor de RMS a 2.22%, un valor medianamente aceptable, aunque para este ejemplo se buscara disminuir aún más el error para obtener valores más cercanos y representativos a los módulos elásticos que se encuentran in-situ.

Tabla 9.- Calculo de RMS (Cuarta iteración)

CUARTA ITERACIÓN			
r (in)	Deflexión medida (in)	Deflexión calculada (in)	RMS
	FWD	WinJULEA	
0	0.01760	0.01702	0.0011
8	0.01490	0.01450	0.0007
12	0.01340	0.01316	0.0003
18	0.01160	0.01144	0.0002
24	0.01000	0.00999	0.0000
36	0.00765	0.00773	0.0001
48	0.00600	0.00612	0.0004
60	0.00483	0.00496	0.0007
72	0.00399	0.00411	0.0009
RMS=			<b>2.22%</b>

Como se puede observar en la Figura 61 los primeros valores de las deflexiones calculadas (línea roja) están ligeramente por encima de los valores de las deflexiones medidas (línea azul) lo cual nos indica que para la siguiente iteración sea pertinente bajar el modulo elástico de las primeras capas, caso contrario a los últimos puntos donde la línea roja ya está por debajo de la línea azul, por lo que el valor del módulo propuesto de la última capa debe ser mayor.

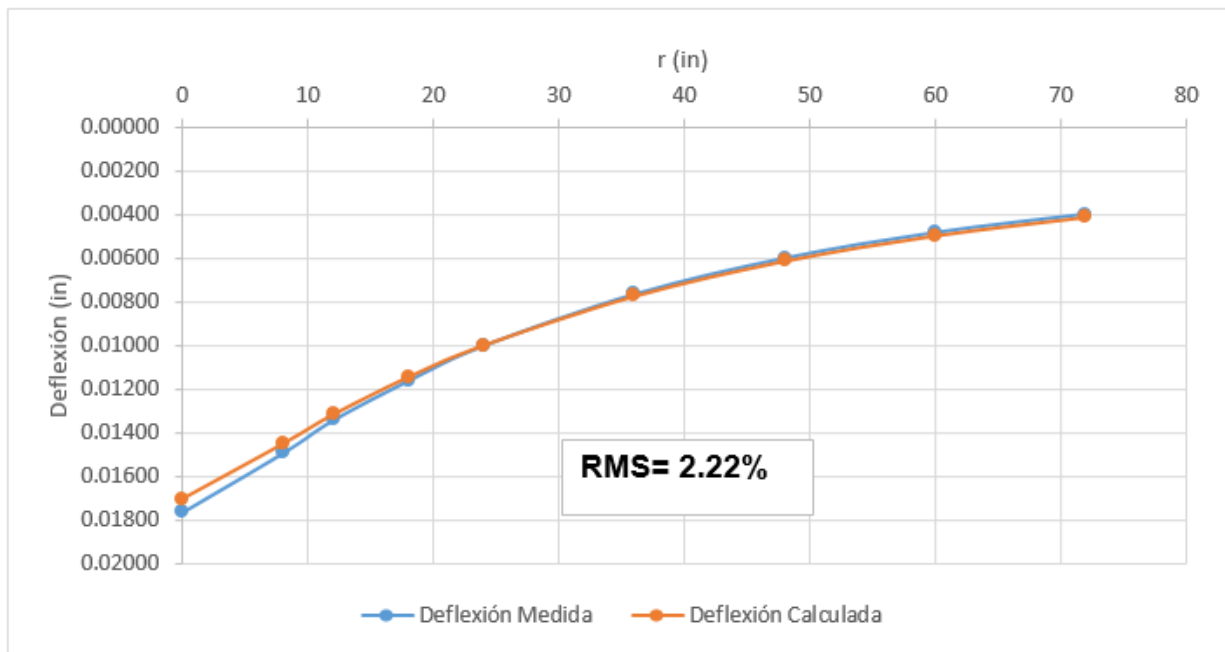


Figura 61.- Cuenca de deflexiones (Cuarta iteración)

- **Quinta iteración.**

De acuerdo a los resultados de la cuarta iteración y tomando en cuenta los puntos analizados para la quinta iteración se buscará bajar el valor de RMS a un valor más aceptable, para lo cual se proponen los siguientes valores:  $E_1= 325,000$  psi,  $E_2= 32,500$  psi y  $E_3= 9,000$  psi. Ver Figura 62.

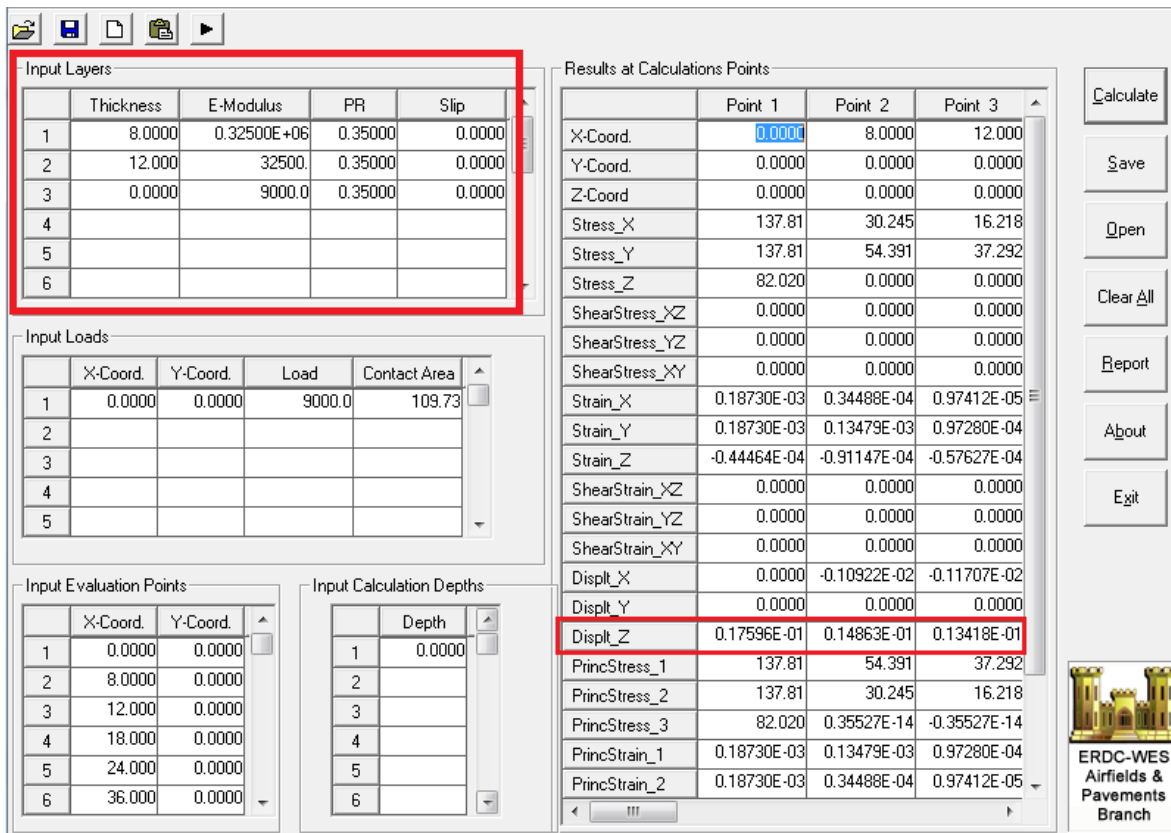


Figura 62.- Módulos elásticos propuestos y deflexiones calculadas (Quinta iteración)

Una vez obtenidas las deflexiones correspondientes a los módulos elásticos propuestos, se procede a calcular el RMS con ayuda de una hoja de Excel.

Para la quinta iteración se logró disminuir el RMS a 0.15%, un valor bastante aceptable. Con esta propuesta se obtuvo un error menor al 1% por lo que los valores de los módulos elásticos propuestos se consideran correctos. Ver Tabla 10.

Tabla 10.- Calculo de RMS (Quinta iteración)

QUINTA ITERACIÓN			
r (in)	Deflexión medida (in)	Deflexión calculada (in)	RMS
	FWD	WinJULEA	
0	0.01760	0.01760	5.165E-08
8	0.01490	0.01486	6.166E-06
12	0.01340	0.01342	1.804E-06
18	0.01160	0.01157	8.59E-06
24	0.01000	0.01002	2.56E-06
36	0.00765	0.00765	1.285E-32
48	0.00600	0.00600	1E-08
60	0.00483	0.00483	2.267E-07
72	0.00399	0.00399	8.599E-07
RMS=			<b>0.150%</b>

Como se puede observar en la Figura 63 prácticamente las dos graficas forman una sola debido a la buena aproximación, lo anterior indica que los módulos propuestos para esta corrida son prácticamente iguales a los módulos reales, puesto que ambos generan la misma cuenca deflectométrica bajo las mismas condiciones estructurales y de carga.

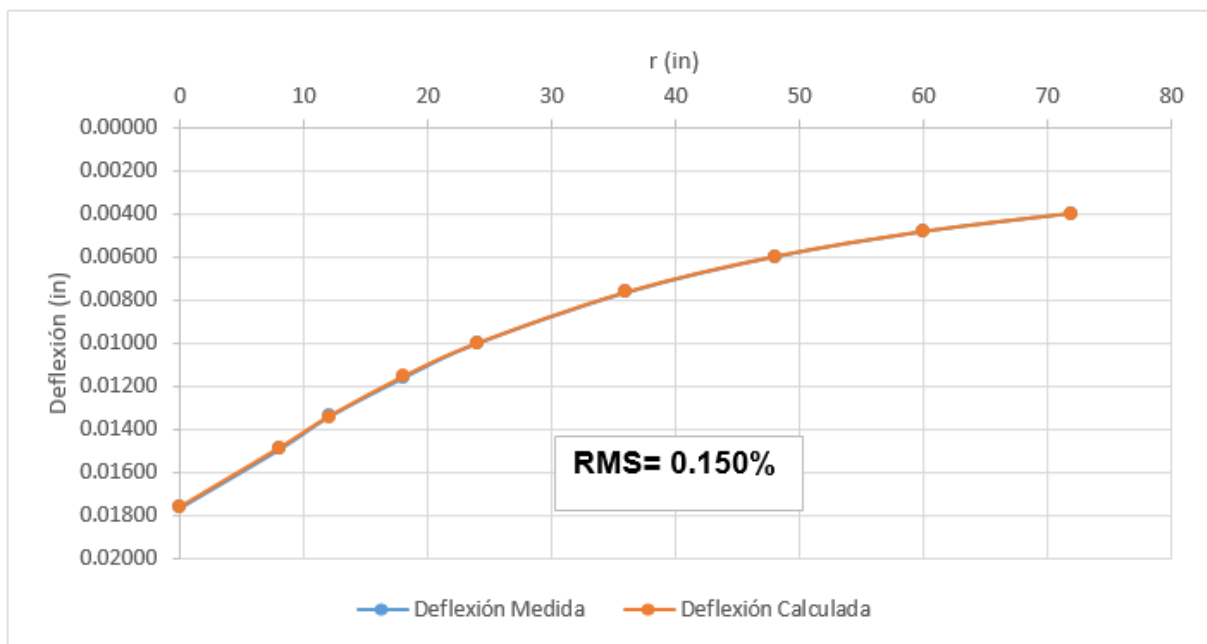


Figura 63.- Cuenca de deflexiones (Quinta iteración)

## 2.5. Programas de retrocálculo

Existen varios programas que se desarrollaron estrictamente para investigación, mientras que otros están disponibles comercialmente, como se muestra en la Tabla 11, existen diferencias entre los programas, incluidos los métodos de cálculo, la cantidad de capas permitidas, los tipos de pavimentos aplicables, etc. Las diferencias adicionales incluyen consideraciones sobre el comportamiento no lineal y la variación de entrada de los módulos semilla.

Tabla 11.- Programas de retrocálculo (Evaluation of Procedures for Backcalculation of Airfield Pavement Modulli)

Nombre del programa	Disponibilidad gratuita	Programa elástico multicapa	Tipo de pavimento	Número máximo de capas	Esquema de convergencia (error)
BAKFAA	Si	LEAF	Flexible/Rígido	10	Error cuadrático medio (RMS)
BISDEF	No	BISAR	Flexible	Mejor para 3	Suma de cuadrados de error abs.
BOUSDEF 2.0	No	MET	Flexible	Al menos 4	Suma de porcentaje de error
CHEVDEF	Si	CHEVRON	Flexible	Mejor para 3	Suma de cuadrados de error abs.
COMDEF	No	CHEVRON	Compuesto	3	Varios
DBCNPAS	No	FEACONS	Rígido	2	-
DIPLOBACK	No	DIPLOMAT	Compuesto	3	Soluciones cerradas

Nombre del programa	Disponibilidad gratuita	Programa elástico multicapa	Tipo de pavimento	Número máximo de capas	Esquema de convergencia (error)
<b>ELMOD 6</b>	No	MULTIPLE	Flex/Rig/Comp.	Hasta 5 incluyendo la s/r	Varios
<b>ELSDEF</b>	No	ELSYM5	Flexible	Mejor para 3	Suma de cuadrados de error abs.
<b>EMOD</b>	No	CHEVRON	Flexible	3	Suma de cuadrados de error relativo
<b>EverCalc</b>	Si	CHEVRON	Flexible	3	Suma de cuadrados de error abs.
<b>FPEDD 1</b>	No	ELSYM5	Flexible/compuesto	3 o 4	Error relativo de desviación en el sensor
<b>ISSEM4</b>		ELSYM5	Flexible	4	Error relativo de desviación en el sensor

Por último, PITRA BACK del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) de la Universidad de Costa Rica (Laurent y Loria, 2017), es un programa que procesa la cuenca de deflexión medida a 0, 300, 450, 600, 900, 1200 y 1500 mm al centro del plato de carga. Dicho plato de carga tiene un diámetro de 30 cm y en él se considera un esfuerzo de 40 kN. Dicha cuenca de deflexión se ajusta a los espesores de cada capa del pavimento hasta que su variación cuadrática (RMS) esté entre el 2%.

Independientemente del software a utilizar, se debe hacer hincapié en que el uso de estas herramientas requiere de una alta experiencia y conocimiento por parte del ingeniero a cargo, pues como se detalla más adelante, el número de posibles

soluciones es muy amplia y depende en cierta parte de los datos de entrada (módulos semilla) los cuales deben ser ingresados con un buen criterio y con base en las condiciones observadas del estado del pavimento.

### 2.5.1. PITRA-BACK 1.0

El PITRA-BACK es una herramienta de retrocálculo y diseño de sobrecapas, que permite mediante ajuste entre la deflectometría proveniente del ensayo FWD y la predicha por las teorías básicas fundamentales de la ingeniería, los módulos que caracterizan la estructura en pavimentos en análisis. Adicionalmente, con base en tales resultados, la herramienta es capaz de verificar el diseño de la sobrecarpeta asfáltica que deberá colocarse para el periodo adicional de vida que se requiere dar al pavimento. Ver Figura 64.



Figura 64.- Software de retrocálculo de módulos PITRA-BACK

El programa utiliza al algoritmo BOBYQA (Bound Optimization BY Quadratic Approximation) para la minimización del RMS de las deflexiones medidas y calculadas.

Además, para el cálculo de respuestas incorpora la metodología de multicapa elástica definida en el software PITRA-PAVE y la metodología de espesor equivalente de Odemark-Boussinesq. PITRA-BACK incorpora la modificación del método de espesor equivalente para considerar la no linealidad de la subrasante.

### 2.5.2. Funcionamiento del programa

A continuación, se muestra una descripción del programa de retrocálculo PITRA-BACK, para su mejor conocimiento.

La Figura 65 muestra el interfaz de entrada al abrir el software, se puede apreciar la primera pestaña de “información del proyecto”, para iniciar se debe dar click en el botón de nuevo, de forma instantánea emerge una ventanilla donde deben introducirse los datos solicitados.

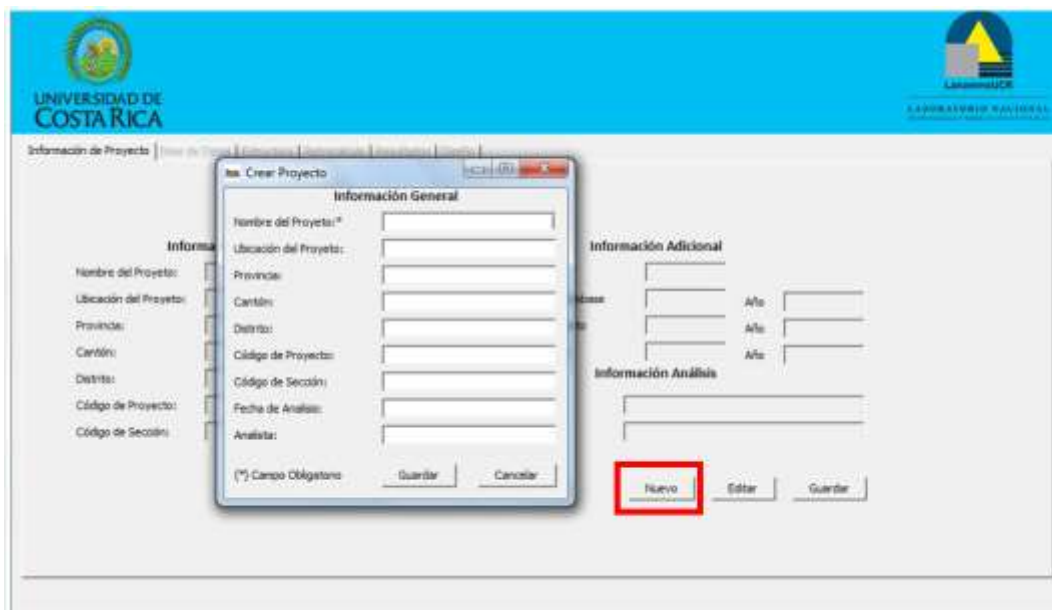


Figura 65.- Interfaz de inicio PITRA-BACK

La siguiente pestaña es la de “Base de Datos” donde pueden cargarse los datos de deflexión obtenidas del FWD desde el botón de “Cargar Datos”. Después de elegir el archivo deseado se cargarán los datos de deflexiones y aparecerán en la pantalla; posteriormente al darle “Guardar Cambios” habilitará la siguiente pestaña.

Es importante verificar que si los datos de temperatura de la superficie varían del valor de referencia (20° C) debe aplicarse la corrección por temperatura como se indica más adelante. Ver Figura 66.



Figura 66.- Base de datos PITRA-BACK

La pestaña “Estructura” es para modelar la estructura que se va a evaluar (para un mejor resultado se recomienda tomar en cuenta los puntos vistos en “Modelo de pavimentos para retrocálculo”) de la siguiente manera. Ver Figura 67.

1. **Capas:** Sirve para habilitar la edición y se debe elegir el número de capas con las que cuenta el pavimento.
2. **Tipo de capas:** Con la barra de opciones se debe elegir el tipo de capa al que pertenece. (Carpeta asfáltica, base granular, subbase, subrasante, etc)
3. **Poisson V:** Se debe ingresar el valor del módulo de Poisson.
4. **Modulo semilla:** Se introduce el Modulo Semilla (E) para cada capa a evaluar en KPa. (se recomienda un buen criterio basado en el estado del pavimento)
5. **Espesor H:** se introduce el espesor de cada capa en mm.



Figura 67.- Modelación de la estructura, PITRA-BACK

En la pestaña “Retrocálculo” (ver Figura 68) se eligen las últimas especificaciones antes de realizar el proceso de cálculo, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- En el apartado de “Caída para el análisis” se debe escoger la opción caída # 2, debido el primer golpe se considera como un golpe de ajuste de asentamiento y hasta el golpe 2 ya considera como dato valido de deflexión.
- En la opción de “Corrección por Temperatura” se debe escoger la opción “Realizar Corrección”, en caso de que los datos de deflexión sean tomados con temperaturas diferentes a 20° C.
- Finalmente “Guardar” y “Ejecutar”.

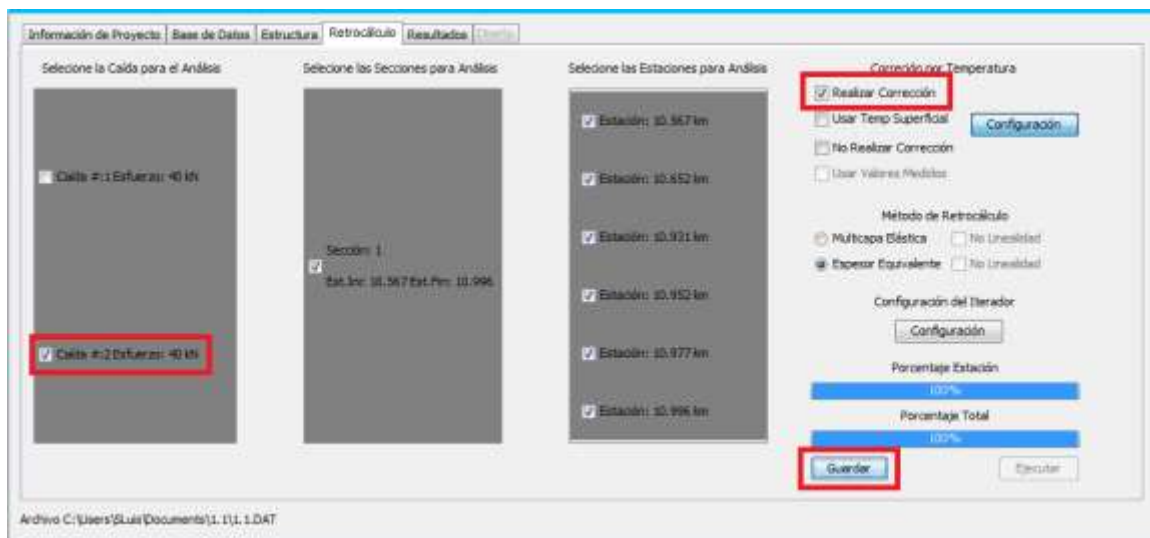


Figura 68.- Proceso de retrocálculo, PITRA-BACK

Por ultimo después de realizar el cálculo, habilita la pestaña “Resultados”, donde se puede observar el valor del módulo elástico retrocalculado para cada capa, donde E1 corresponde a la primera capa, E2 a la segunda capa, etc. Estos valores se usan posteriormente como un dato de entrada para calcular la vida remanente de la estructura (Se recomienda utilizar el valor promedio). Ver Figura 69.

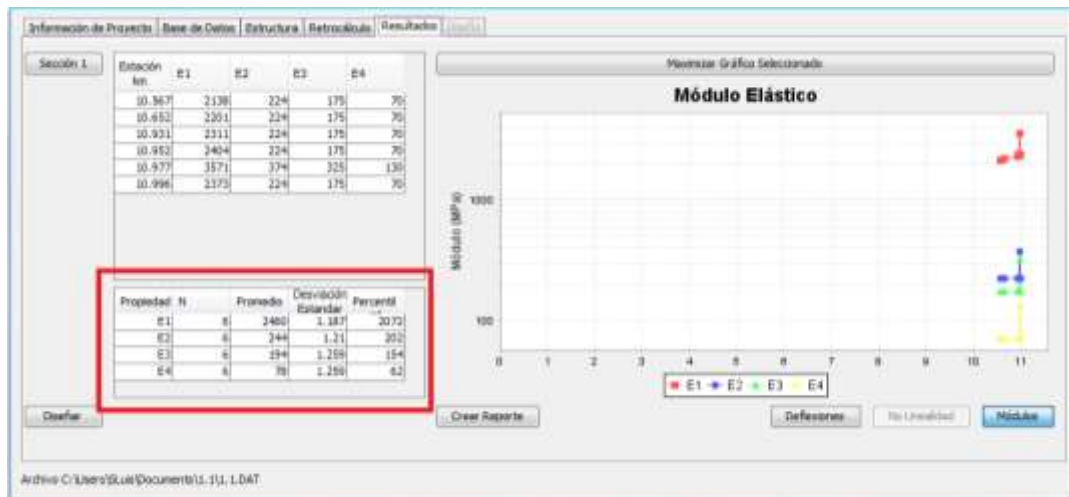


Figura 69.- Resultado de módulos retrocalculados, PITRA-BACK.

## 2.6. Módulo Resiliente

El paso continuo de los vehículos sobre un pavimento somete a la estructura a un gran número de ciclos de carga y descarga que induce a los diferentes materiales que lo conforman a un estado de esfuerzos y deformaciones variables, en función de la magnitud de la carga que actúa sobre ella y del tiempo de duración de la misma.

Durante un ciclo de carga los materiales no se recuperan en su totalidad de la deformación a la que han sido sometidos, por lo que la deformación original estará dividida en dos partes: una deformación plástica o permanente y una deformación elástica o resiliente. Con el incremento de los ciclos la deformación permanente se va acumulando, aunque dicha deformación en cada ciclo consecutivo va siendo menor, hasta llegar al ciclo N donde prácticamente se recupera toda la deformación inducida. Ver Figura 70.

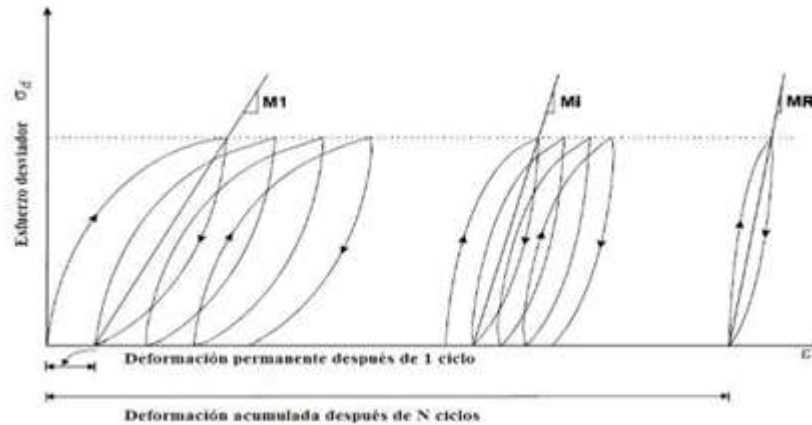


Figura 70.- Módulo resiliente.

Al final de este proceso el material describe prácticamente la misma curva y la deformación permanente tiende a ser muy pequeña, considerando para fines de análisis que el comportamiento del material es fundamentalmente elástico, por lo que se puede caracterizar con el denominado módulo resiliente. El módulo resiliente ( $M_r$ ) está definido como la relación existente entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación axial recuperable. La obtención del  $M_r$  en laboratorio se realiza con una cámara triaxial que posibilita modelar el confinamiento lateral que le brinda el suelo circundante en el campo y un dispositivo neumático para aplicar el esfuerzo desviante que simula las acciones del tránsito, matemáticamente se expresa así: ver ecuación (12)

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (12)$$

Donde:

$\sigma_d$  = esfuerzo desviante

$\epsilon_r$  = deformación específica resiliente axial

Debido a que la realización del ensayo de módulo resiliente en laboratorio implica tiempo y costos considerables, se ha optado por obtener este parámetro a partir de información recopilada mediante pruebas no destructivas, como las desarrolladas por el FWD.

## 2.7. Módulo dinámico

Es un parámetro fundamental que determina la capacidad del material para resistir la deformación de compresión, sujeto a ciclos de carga y descarga. Define la relación esfuerzo/deformación de un material visco-elástico lineal y se puede evaluar mediante una prueba no destructiva

### ¿Por qué es importante conocer el módulo dinámico de una mezcla asfáltica?

Forma parte importante de los insumos de diseño de los pavimentos, además sirve como parámetro de control, verificación de control de campo y adicionalmente ha sido utilizado como base en los modelos de predicción de deterioro por deformación o fatiga permanente de las mezclas asfálticas.

### Ensayo

Consiste en someter un espécimen cilíndrico a esfuerzos de compresión simple a través de cargas dinámicas de forma haverseno, es decir, ondas sinusoidales de carga y descarga. El esfuerzo aplicado debe ser de tal magnitud que la deformación recuperable se encuentre entre 50 y 150 micras de deformación o microdeformaciones, lo anterior con el fin de trabajar con el rango elástico lineal del material y no inducir deformaciones no recuperables que puedan dañar al espécimen. Ver Figura 71.



Figura 71.- Ensayo de módulo dinámico

Las curvas isotermas son la representación gráfica del módulo dinámico respecto a la frecuencia de ensayo para cada temperatura evaluada, es posible construir una curva maestra a través del principio de superposición tiempo-temperatura.

La curva maestra representa la variación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas respecto de la temperatura y frecuencia de ensayo, esta una propiedad que tienen los materiales termo-reologicamente simples, tenemos que, a mayor temperatura y menor frecuencia de aplicación de carga, el módulo de la mezcla asfáltica es menor; de forma análoga, a menor temperatura y a mayor frecuencia de carga el módulo de la mezcla asfáltica es mayor. Ver Figura 72.

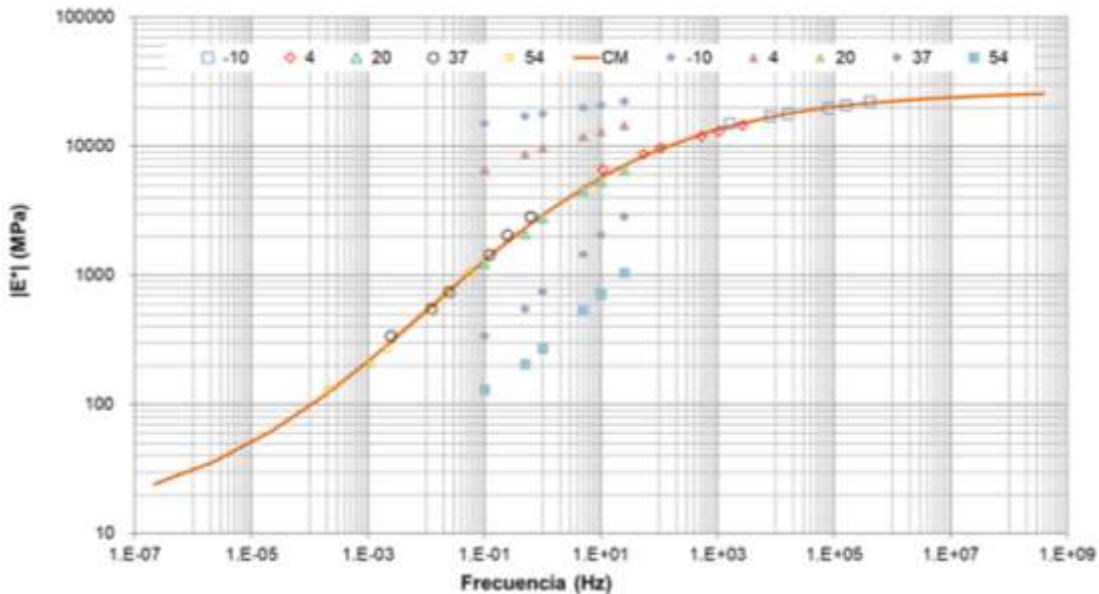


Figura 72.- Gráfica de la curva maestra.

## 2.8. Tramos Homogéneos.

Cuando se desean llevar a cabo todas las actividades de un programa de conservación y reconstrucción de pavimentos en corredores carreteros, es necesario tener plenamente identificados los tramos o segmentos donde se van a llevar a cabo dichas actividades. Dado que existen marcados cambios en un cuanto a geometría, tránsito y características en materiales a lo largo de un tramo carretero,

es necesario llevar a cabo un proceso de homogenización de los mismos. Un tramo homogéneo es un segmento de carretera que tiene características semejantes en cuanto a tipo de pavimento, deterioros, deflexiones, topografía, tránsito, etc.

El método seguido para la delimitación de zonas homogéneas es el recomendado por la guía AASHTO 93 (Apéndice J) denominado “Aproximación por diferencias acumuladas” el cual nos permite visualizar de una mejor manera los cambios en el comportamiento del pavimento. El método de Diferencias acumuladas es una herramienta que permite delimitar estadísticamente tramos homogéneos utilizando mediciones de respuesta del pavimento (deflexión, número estructural, IRI, etc.).

En la Figura 73 se observa el método numérico de las diferencias acumuladas. La diferencia acumulada se grafica contra el cadenamiento del proyecto. En cada cambio de pendiente se tendrá un tramo homogéneo. Se sugiere consultar el anexo J de la metodología de la AASHTO 93 para mayor detalle de los algoritmos de cálculo utilizados.

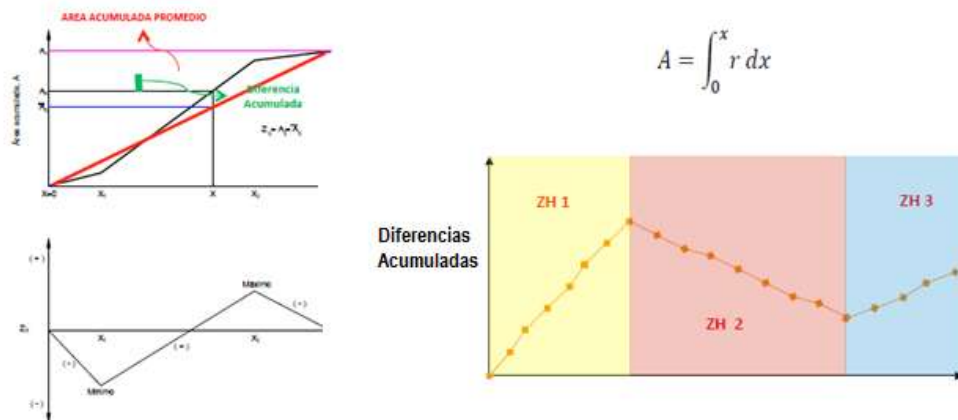


Figura 73.- Segmentación por diferencias acumuladas AASHTO 93.

## 2.9. Vida remanente

La vida remanente es la cantidad de años que le quedan a la estructura de pavimento para satisfacer el nivel del tránsito vehicular al que fue diseñado de manera inicial, después de haber sido expuesto a cierto nivel de tránsito y a

condiciones meteorológicas como la temperatura y la humedad. Dicha vida remanente debe cumplir con ciertos indicadores de deterioro:

- la fatiga en las capas estabilizadas por asfalto y
- la deformación permanente en las capas no ligadas o granulares.

Estos indicadores se obtienen cuantitativamente a través de modelos de deterioro por fatiga y por deformación permanente mismos que forman parte de las metodologías de diseño de pavimentos empírico-mecanicistas.

Es importante enfatizar que la vida remanente de una estructura vial está relacionada con la buena serviciabilidad que se le puede brindar al usuario, pues una baja vida remanente no siempre indica que el pavimento se encuentra con excesivo daño estructural, sin embargo, es un indicativo de que en poco tiempo la vía dejara de ser rentable y poco confortable para transitar.

En consecuencia, si no se atiende luego, el deterioro será cada vez más severo y más costosa la rehabilitación.

Existen diversos programas de cómputo que calculan la vida remanente; entre los más conocidos se encuentra el DAMA del instituto del asfalto, DISPAV-5 de la UNAM y el IMT PAVE 3.0 del instituto Mexicano del Transporte (IMT).

### 3. APLICACIONES PRÁCTICAS

Como complemento a toda la teoría anteriormente mencionada y para exponer más a fondo el proceso de retrocálculo, a continuación, se muestran como ejemplos prácticos 6 proyectos de auscultación pertenecientes a zonas específicas de carreteras mexicanas con el fin de llevar a cabo el proceso de retrocálculo con ayuda del software PITRA-BACK de la Universidad de Costa Rica, siguiendo todos los pasos, especificaciones y recomendaciones de uso que ya se mencionaron anteriormente.

Cada proyecto cuenta con información específica acerca de los datos de deflectometría proporcionados por un FWD; así como las capas y espesores que conforman estructuralmente al pavimento obtenidas mediante georadar y calas. Estos datos fueron ingresados en el software de retrocálculo para obtener los módulos elásticos representativos de cada capa de pavimento, de manera adicional se anexa una fotografía que muestra el deterioro presente en el tramo evaluado, con el fin de contrastar los valores de los módulos elásticos obtenidos con el programa de retrocálculo y el estado real del pavimento.

Después de obtener los módulos retrocalculados para cada una de las capas de pavimento y con información extra acerca del tránsito diario promedio anual (TDPA), la configuración vehicular, la tasa de crecimiento, el periodo de diseño y tipo de carretera, se obtiene la vida remanente de la estructura utilizando el programa de diseño de pavimentos IMT-PAVE del Instituto Mexicano del Transporte.

Finalmente se hace un análisis de los resultados generales, donde se discute el valor de los módulos retrocalculados obtenidos con el software, las causas de las fallas (funcional o estructural) presentes en el pavimento y el valor de vida remanente obtenido para determinar si el proceso de retrocálculo es apropiado.

### 3.1. Proyecto 1

Este proyecto muestra un tramo carretero en corte, constituido estructuralmente por 3 sobrecarpetas asfálticas, base hidráulica, subrasante y terreno de cimentación, puede observarse que el pavimento muestra agrietamiento en la superficie debido a la fatiga (piel de cocodrilo) en un grado considerable. La auscultación de pavimentos ha mostrado que se tienen altos valores de deflexiones en estos puntos característicos debido sobre todo a la insuficiencia o falta de obras de drenaje (subdrenes) que no permiten evacuar el agua contenida en los taludes del corte. Ver Figura 74.



Figura 74.- Panorama general (proyecto 1)

**3.1.1. Proceso de retrocálculo.**

Analizando la estructura del pavimento y con base en las recomendaciones de uso, para simplificar el modelaje de las capas existentes, las 3 sobrecarpetas existentes formaran una sola carpeta asfáltica de 15 cm. Ver Figura 75.

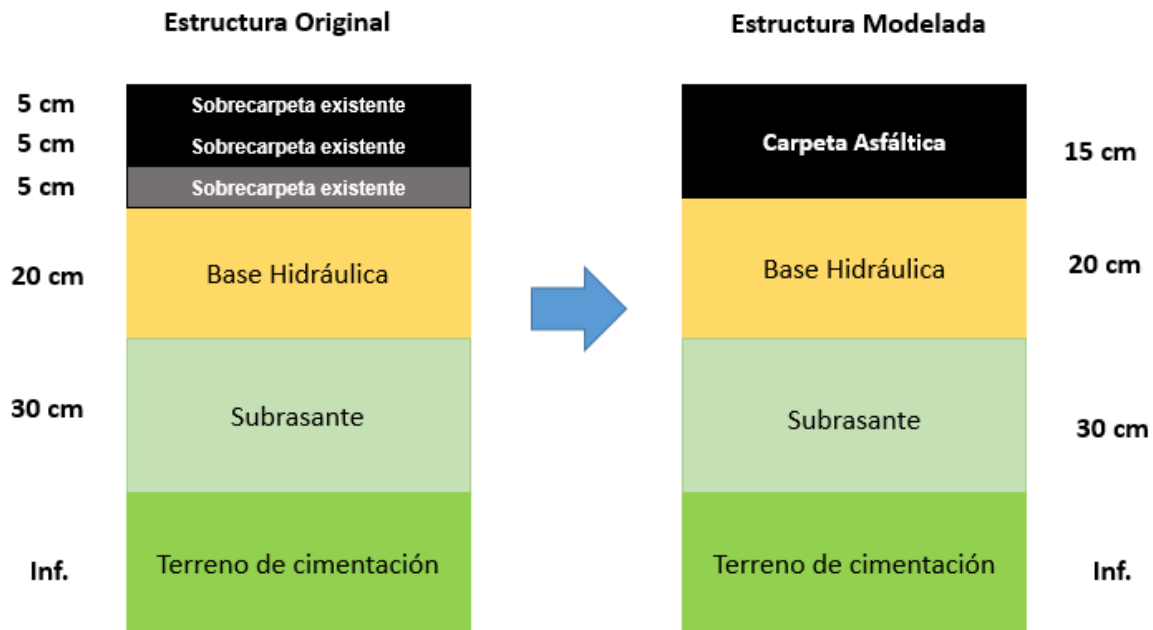


Figura 75.- Simplificación de capas (proyecto 1)

Después de ingresar los datos de deflectometría y con los datos de la Tabla 12 se procede a modelar la estructura en el programa PITRA-BACK. Ver Figura 76.

Tabla 12.- Caracterización del pavimento (Proyecto 1)

Capa	Espesor (mm)	Modulo semilla (KPa)	Relación de Poisson
<b>Carpeta Asfáltica</b>	150	2,500,000.0	0.30
<b>Base Hidráulica</b>	200	320,000.00	0.35
<b>Subrasante</b>	300	250,000.0	0.35
<b>Terreno Cimentación</b>	-	100,000.0	0.40

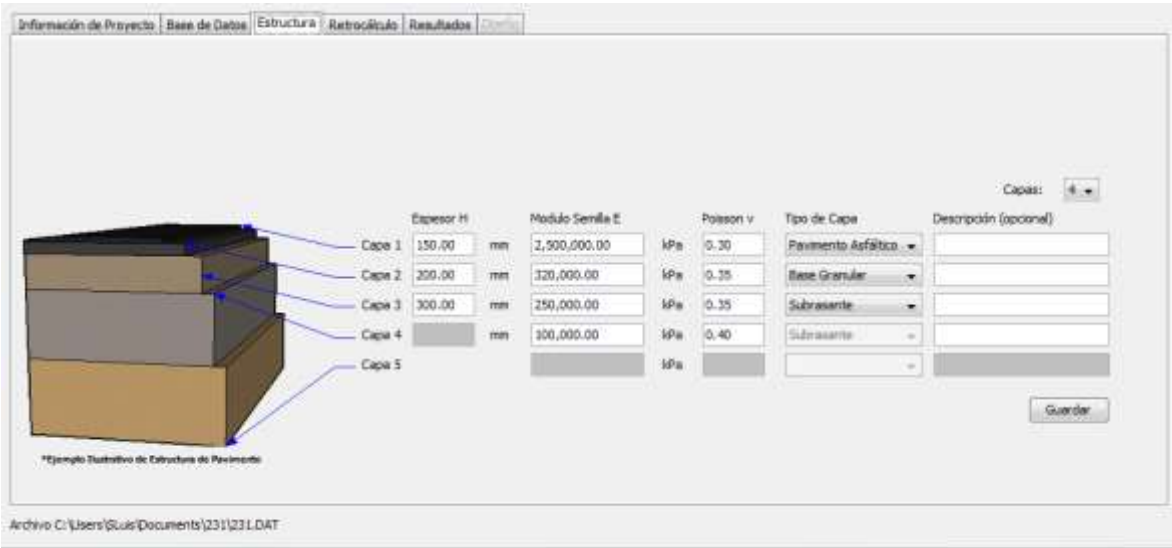


Figura 76.- Modelaje estructural en PITRA-BACK (proyecto 1)

En la Figura 77 se pueden observar los valores finales de los módulos retrocalculados obtenidos con el programa, se toman en cuenta los módulos promedio y para este proyecto son: E1= 2121 MPa, E2= 247 MPa, E3= 191 Mpa y E4 78 MPa.

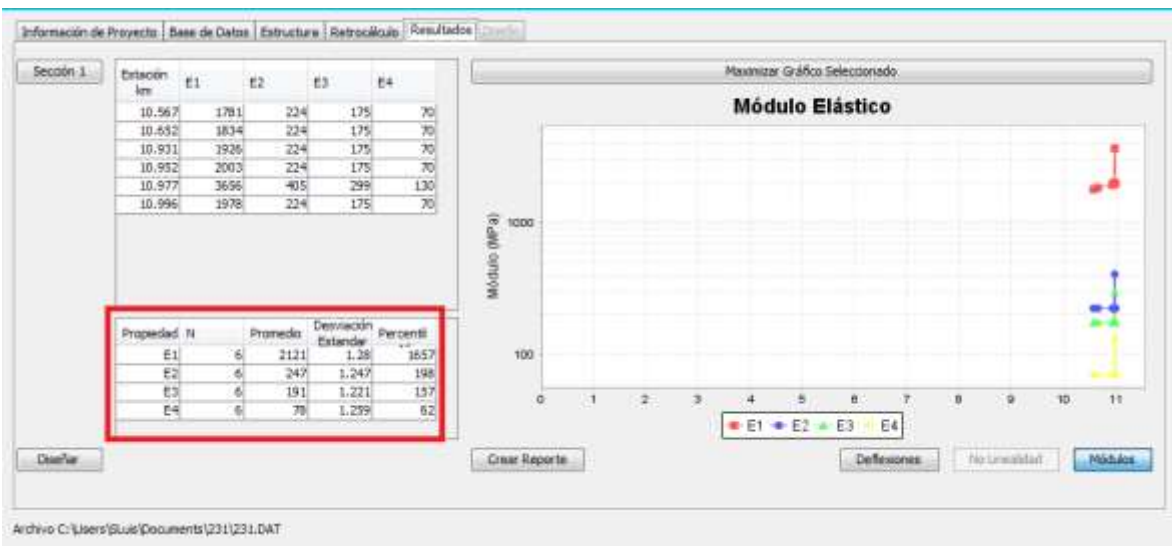


Figura 77.- Resultado de módulos retrocalculados

**3.1.2. Cálculo de vida remanente.**

Con los módulos obtenidos, se calcula la vida remanente para la estructura, tomando los siguientes datos:

- Carretera tipo A4.
- TDPA total (2018) = 3,233 vehículos.
- Factor sentido = 1.0 (aforo en un sentido)
- Factor carril = 0.8 (dos carriles por sentido)
- Tasa de crecimiento= 5.0 %
- Espectro de Carga Legal
- Confiabilidad = 90%
- Periodo de diseño: 10 años
- COV = 15% para todas las capas

Se obtiene la configuración vehicular representativa correspondiente a la carretera en “Datos Viales” de la DGST. En la Figura 78 puede apreciarse que predominan los vehículos ligeros en casi un 57.7% respecto al 42.3 % de vehículos pesados.

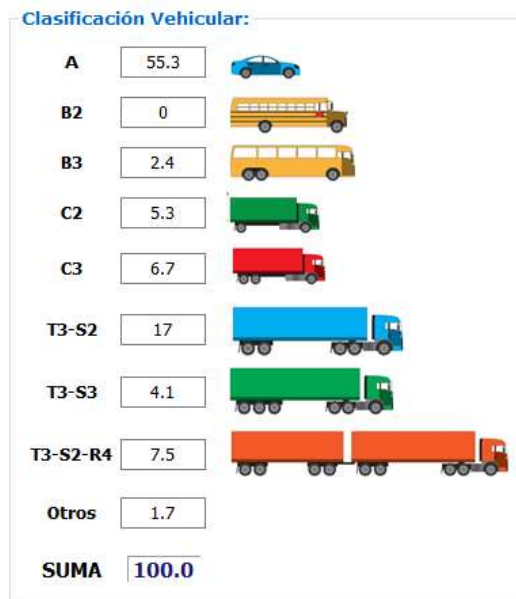


Figura 78.- Configuración vehicular (Proyecto 1)

Una vez ingresados todos los parámetros, se procede a calcular la vida remanente con ayuda del programa IMT-PAVE 3.0. Ver Figura 79.

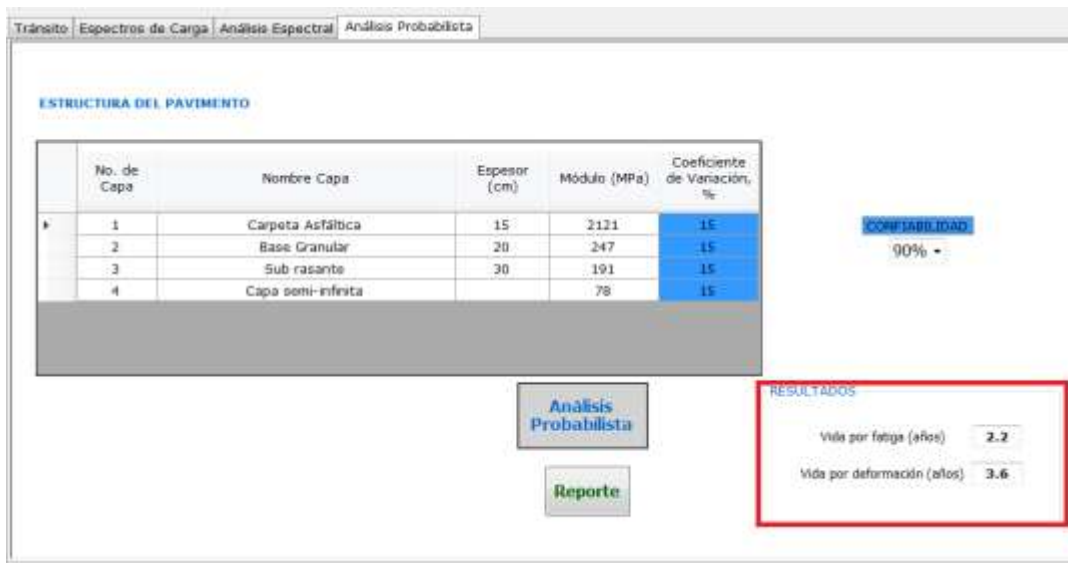


Figura 79.- Vida remanente IMT-PAVE (Proyecto 1)

Como puede observarse la vida remanente es pequeña, por fatiga son 2.2 años y por deformación 3.6 años.

### 3.1.3. Análisis de resultados.

Recordando el estado actual del punto evaluado (ver Figura 74) se puede verificar que la carpeta ya se encuentra muy agrietada debido a que las cargas y el tránsito al que se está sometiendo, han superado los valores para lo que fue diseñada.

El PITRA-BACK dio un módulo de carpeta asfáltica relativamente bajo, lo cual tiene coherencia con lo anterior, pues debido al tráfico y las condiciones en que se encuentra, la carpeta ha perdido rigidez.

Al obtener el valor de vida remanente con el IMT-PAVE el valor es muy pequeño (2.2 años) comparado con el periodo de diseño (10 años), además se rige por la fatiga, lo cual indica que el problema del pavimento está en la carpeta asfáltica.

De esta manera se puede concluir que los módulos retrocalculados son muy representativos de las capas que conforman la estructura del pavimento evaluado.

### 3.2. Proyecto 2

Este proyecto a evaluar consta estructuralmente de dos sobrecarpetas de 5 cm de espesor, una base hidráulica de 20 cm, una subbase de 25 cm y una subrasante de 30 cm. Se puede observar que la superficie del pavimento tiene un alto agrietamiento por fatiga y zonas con desprendimiento de material. La auscultación realizada en ese tramo muestra valores de deflexión muy grandes, en conjunto, todos estos factores representan un evidente daño estructural en la carretera. Ver Figura 80.



Figura 80.- Panorama general (Proyecto 2)

**3.2.1. Proceso de retrocálculo**

Siguiendo los lineamientos y recomendaciones de esta metodología, la estructura teórica modelada está compuesta por una carpeta asfáltica de 10 cm, la base hidráulica y la subbase forman una sola capa de 45 cm y la subrasante con un espesor de 30 cm. Ver Figura 81.

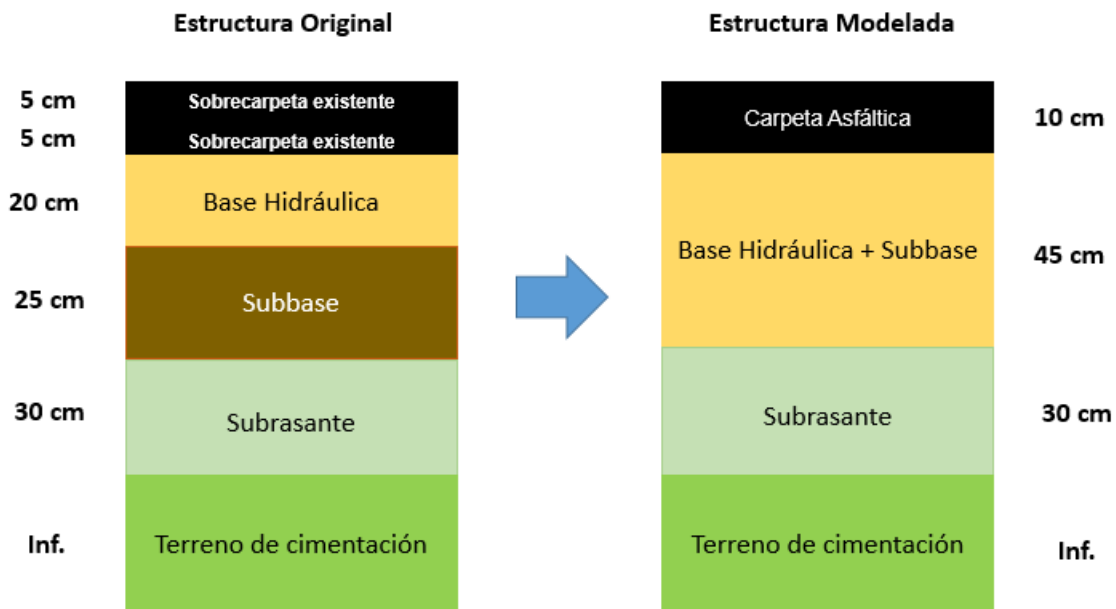


Figura 81.- Simplificación de capas (Proyecto 2)

Después de ingresar los datos de deflectometría y con los datos de la Tabla 13 se procede a modelar la estructura en el programa PITRA-BACK. Ver Figura 82.

Tabla 13.- Caracterización del pavimento (Proyecto 2)

Capa	Espesor (mm)	Modulo semilla (KPa)	Relación de Poisson
<b>Carpeta Asfáltica</b>	100	2,700,000.0	0.30
<b>Base Hidráulica</b>	450	320,000.00	0.35
<b>Subrasante</b>	300	250,000.0	0.35
<b>Terreno Cimentación</b>	-	100,000.0	0.40

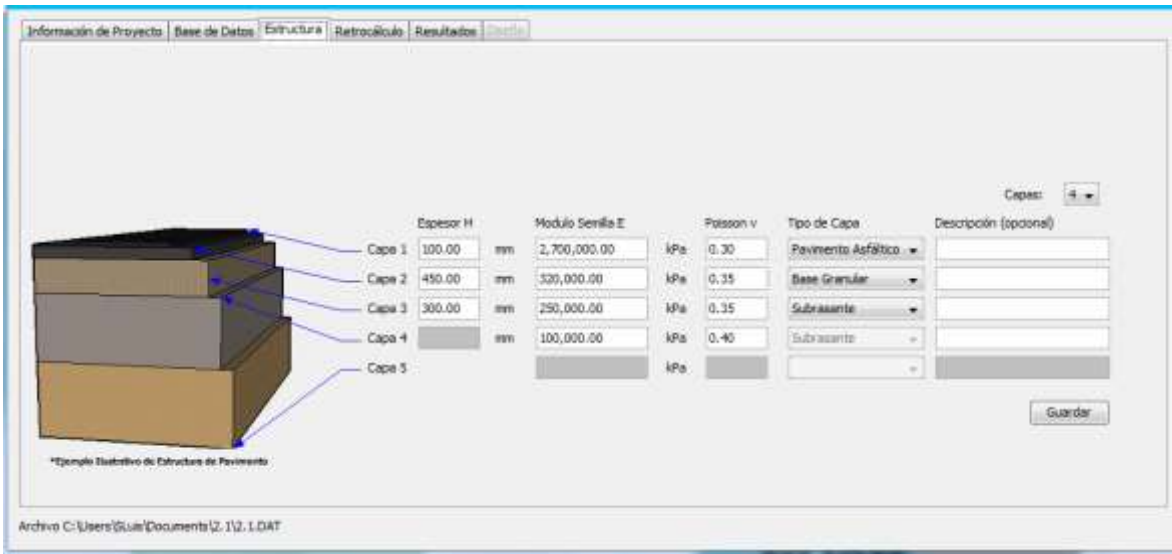


Figura 82.- Modelaje estructural en PITRA-BACK (Proyecto 2)

En la Figura 83 se pueden observar los valores finales de los módulos retrocalculados obtenidos con el programa, se toman en cuenta los módulos promedio y para este proyecto son: E1= 1813 MPa, E2= 228 MPa, E3= 175 Mpa y E4 70 MPa.

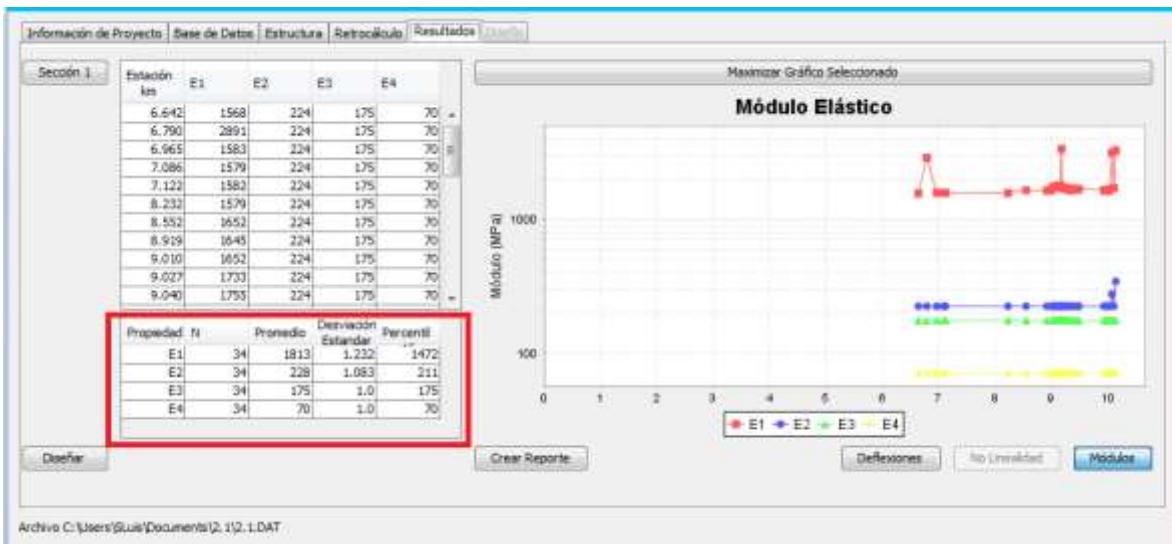


Figura 83.- Resultado de módulos retrocalculados

### 3.2.2. Cálculo de vida remanente.

Con estos módulos, se calcula la vida remanente para la estructura, tomando los siguientes datos:

- Carretera tipo A4
- TDPA total (2018) = 5,088 vehículos
- Factor sentido = 1.0 (aforo en un sentido)
- Factor carril = 0.8 (dos carriles por sentido)
- Tasa de crecimiento= 4.5 %
- Espectro de Carga Legal
- Confiabilidad = 90%
- Periodo de diseño: 10 años
- COV = 15% para todas las capas

Se obtiene la configuración vehicular representativa correspondiente a la carretera en “Datos Viales” de la DGST. En la Figura 84 puede apreciarse que predominan los vehículos ligeros en casi un 69.3% respecto al 29.7 % de vehículos pesados.

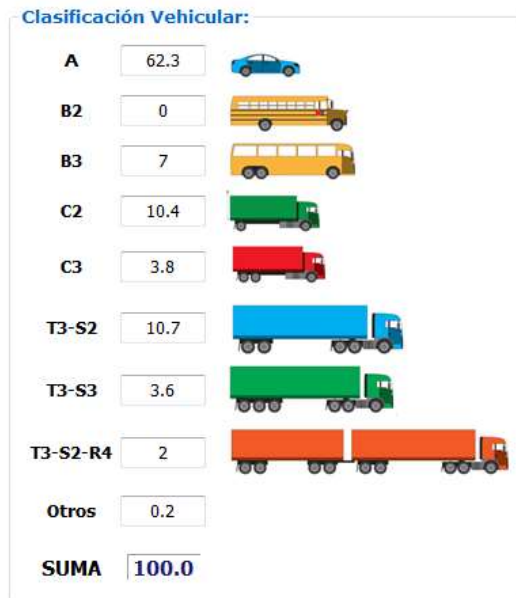


Figura 84.- Configuración Vehicular (Proyecto 2)

Una vez ingresados todos los parámetros, se procede a calcular la vida remanente con ayuda del programa IMT-PAVE 3.0. Ver Figura 85.

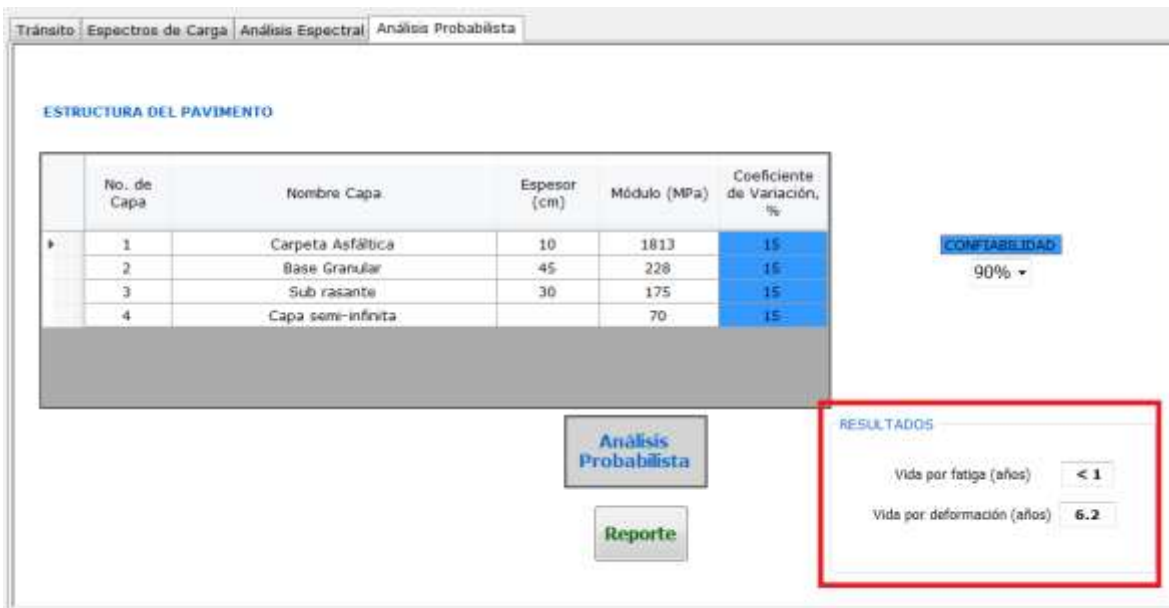


Figura 85.- Vida remanente IMT-PAVE (Proyecto 2)

Como puede observarse la vida remanente es pequeña, por fatiga <1 y por deformación 6.2 años.

### 3.2.3. Análisis de resultados.

El módulo retrocalculado para la carpeta asfáltica es bajo y hace referencia a una carpeta que se encuentra dañada, lo cual se puede corroborar con las imágenes anteriores donde se muestra la carpeta con un grado de agrietamiento importante.

La vida remanente de la estructura es demasiado baja, debido a las condiciones estructurales en combinación con los demás factores de tránsito ya mencionados, dan como resultado una vida remanente corta que se rige por la fatiga, lo cual es un indicativo de que el problema está en la capa asfáltica. El espesor y la baja rigidez que presenta la carpeta ya no son suficientes para satisfacer adecuadamente las solicitudes de tránsito presentes en ese tramo carretero.

De esta manera podemos concluir que los módulos retrocalculados son muy representativos de las capas que conforman la estructura del pavimento evaluado.

### 3.3. Proyecto 3.

El siguiente proyecto carretero a evaluar está compuesto estructuralmente por una carpeta asfáltica de 10 cm, una base granular de 25 cm y una subbase de 30 cm. Como se puede observar la superficie del pavimento muestra alto grado de deterioro y agrietamiento por fatiga muy marcado, también conocido como piel de cocodrilo presente en casi toda la calzada. Los datos de deflectometría obtenidos en la auscultación del pavimento indican deflexiones muy altas que sobrepasan los límites permisibles. Ver Figura 86.



Figura 86.- Panorama general (Proyecto 3)

**3.3.1. Proceso de retrocálculo**

La estructura modelada y la real son iguales debido a que no es necesaria ninguna simplificación o agrupación de capas estructurales. Ver Figura 87.

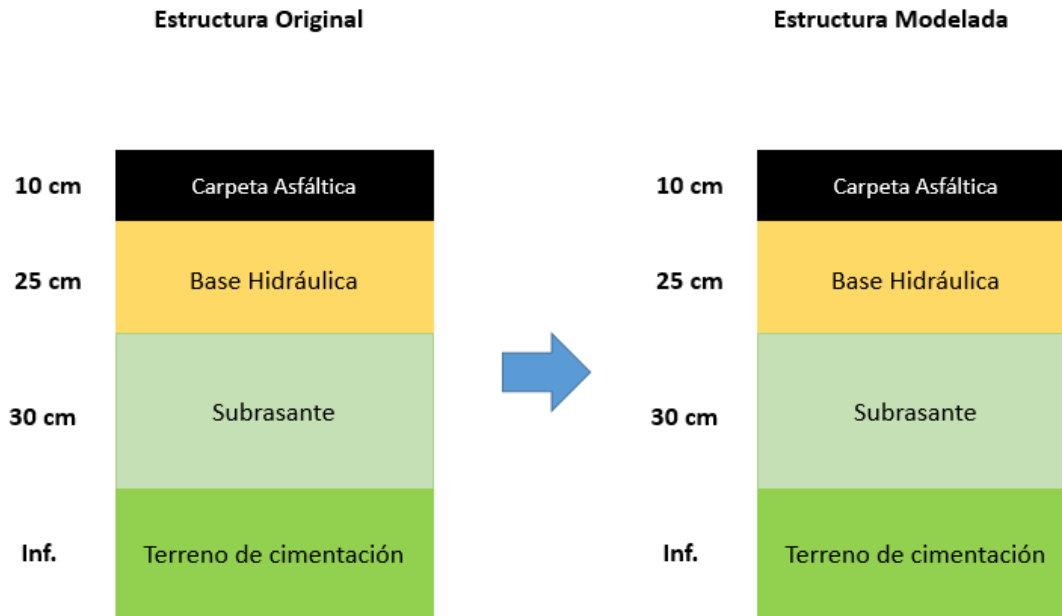


Figura 87.- Simplificación de capas (Proyecto 3)

Después de ingresar los datos de deflectometría y con los datos de la Tabla 14 se procede a modelar la estructura en el programa PITRA-BACK. Ver Figura 88

Tabla 14.- Caracterización del pavimento (Proyecto 3)

Capa	Espesor (mm)	Modulo semilla (KPa)	Relación de Poisson
<b>Carpeta Asfáltica</b>	100	2,500,000.0	0.30
<b>Base Hidráulica</b>	250	320,000.00	0.35
<b>Subrasante</b>	300	250,000.0	0.35
<b>Terreno Cimentación</b>	-	100,000.0	0.40

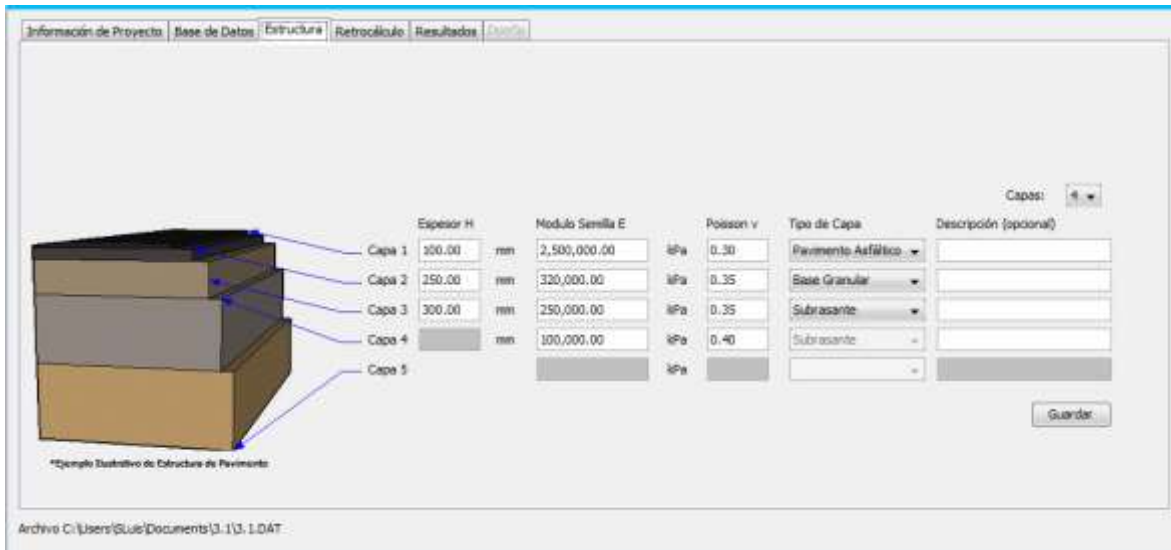


Figura 88.- Modelaje estructural en PITRA-BACK (Proyecto 3)

En la Figura 89 se pueden observar los valores finales de los módulos retrocalculados obtenidos con el programa, se toman en cuenta los módulos promedio y para este proyecto son: E1= 1762 MPa, E2= 249 MPa, E3= 186 Mpa y E4 76 MPa.

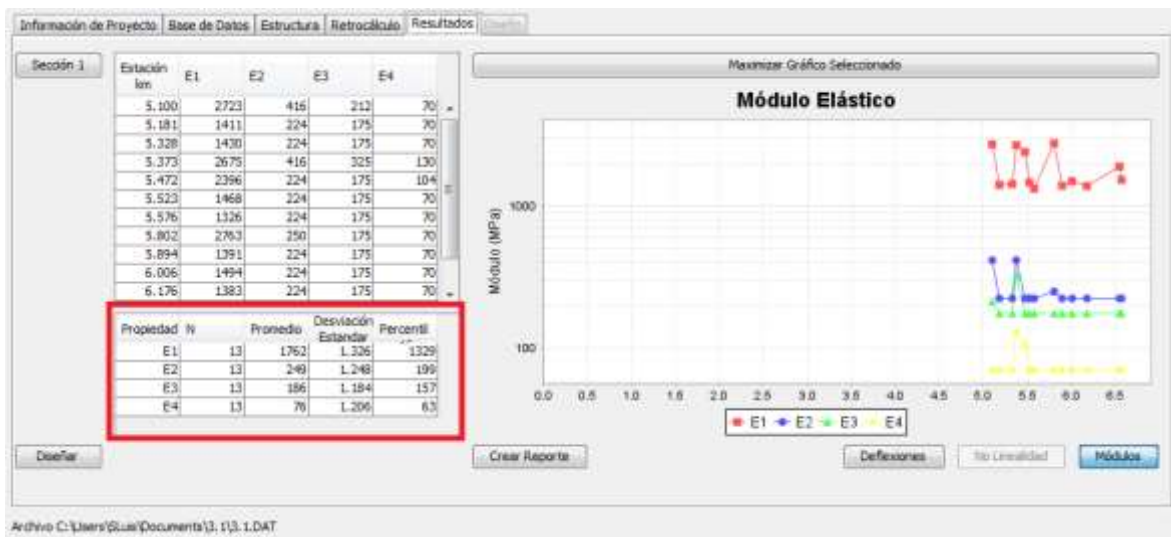


Figura 89.- Resultado de módulos retrocalculados

### 3.3.2. Cálculo de vida remanente

Con estos módulos, se calcula la vida remanente para la estructura, tomando los siguientes datos:

- Carretera tipo A4
- TDPA total (2018) = 4,484 vehículos
- Factor sentido = 1.0 (aforo en un sentido)
- Factor carril = 0.8 (dos carriles)
- Tasa de crecimiento= 10.4 %
- Espectro de Carga Legal
- Confiabilidad = 90%
- Periodo de diseño: 10 años
- COV = 15% para todas las capas

Se obtiene la configuración vehicular representativa correspondiente a la carretera en “Datos Viales” de la DGST. En la Figura 90 puede apreciarse que predominan los vehículos ligeros en casi un 69.2% respecto al 29.8 % de vehículos pesados.

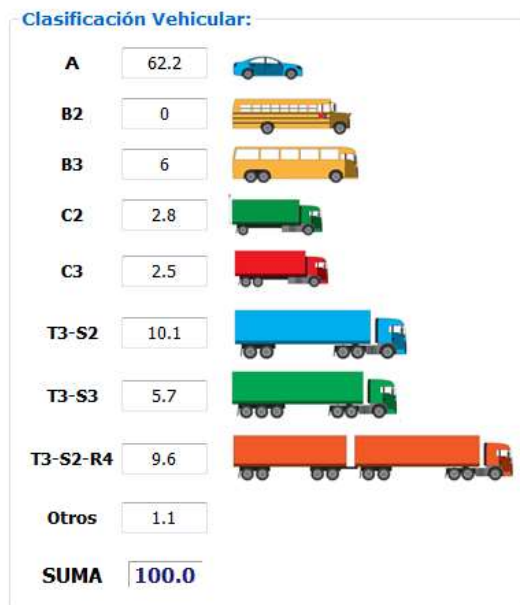


Figura 90.- Configuración Vehicular (Proyecto 3)

Una vez ingresados todos los parámetros, se procede a calcular la vida remanente con ayuda del programa IMT-PAVE 3.0. Ver Figura 91.

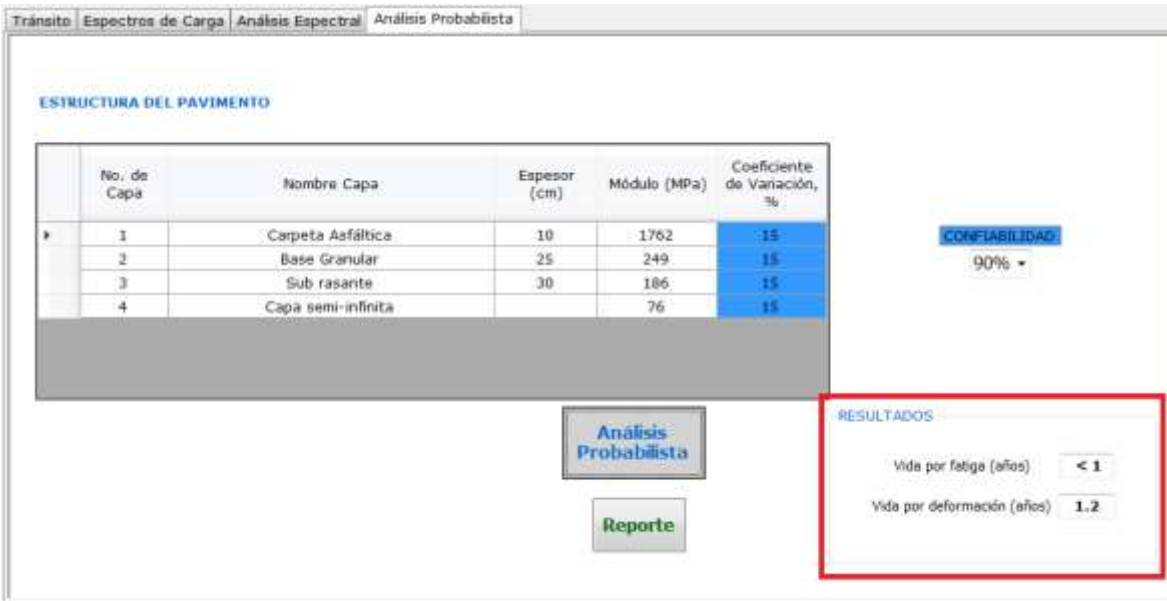


Figura 91.- Vida remanente IMT-PAVE (Proyecto 3)

Como puede observarse la vida remanente es pequeña, por fatiga <1 y por deformación 1.2 años.

### 3.3.3. Análisis de resultados.

Este caso al igual que los anteriores muestra agrietamiento en la superficie, aunque en un grado más severo, por lo tanto, el valor del módulo retrocalculado para la carpeta asfáltica resulto menor. En consecuencia, la vida remanente calculada para dicha estructura de igual manera fue baja, tanto por fatiga como por deformación, lo cual indica que el problema está en toda la estructura de pavimento y la subrasante.

La carpeta asfáltica presenta agrietamiento tipo piel de cocodrilo debido a que las condiciones de tránsito para las que fue diseñada han sido superadas totalmente, aunado a esto, la fisuración en la superficie hace que la carpeta asfáltica pierda impermeabilidad permitiendo la entrada de agua a las capas granulares, lo cual ocasiona pérdida de rigidez y asentamientos en la estructura.

### 3.4. Proyecto 4.

El siguiente proyecto está constituido estructuralmente por una carpeta asfáltica de 7 cm, una base cementada de 20 cm y una subrasante de 30 cm. En la imagen se puede apreciar que a lo largo de la calzada se presenta una serie de grietas en bloque (agrietamiento reflexivo). Los datos de deflectometría medidos en la auscultación muestran que los datos de deflexiones son relativamente bajos pues a diferencia de los anteriores, este proyecto cuenta con una base estabilizada con cemento Portland la cual que aporta una gran rigidez a la estructura, sin embargo, el daño en la carpeta ocasionado por la reflexión de las grietas de la base es muy claro. Ver Figura 92.



Figura 92.- Panorama general (Proyecto 4)

### 3.4.1. Proceso de retrocálculo

Para modelar la estructura no se hace ningún cambio respecto a la estructura original, pues no aplica en ningún caso de agrupación de capas y se puede representar de esa manera en el programa de retrocálculo. Ver Figura 93.

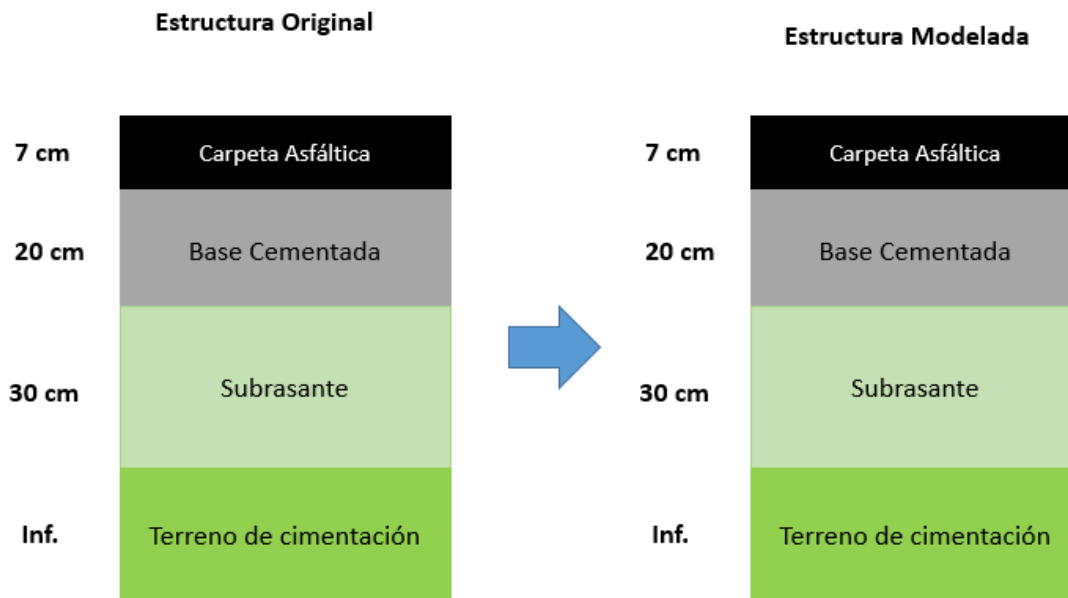


Figura 93.- Simplificación de capas (Proyecto 4)

Después de ingresar los datos de deflectometría y con los datos de la Tabla 15 se procede a modelar la estructura en el programa PITRA-BACK. Ver Figura 94.

Tabla 15.- Caracterización del pavimento (Proyecto 4)

Capa	Espesor (mm)	Módulo semilla (KPa)	Relación de Poisson
<b>Carpeta Asfáltica</b>	70	700,000.0	0.30
<b>Base Cementada</b>	200	4,500,000.00	0.30
<b>Subrasante</b>	300	250,000.0	0.35
<b>Terreno Cimentación</b>	-	100,000.0	0.40

# RETROCÁLCULO DE MÓDULOS ELÁSTICOS APLICADO A PAVIMENTOS FLEXIBLES

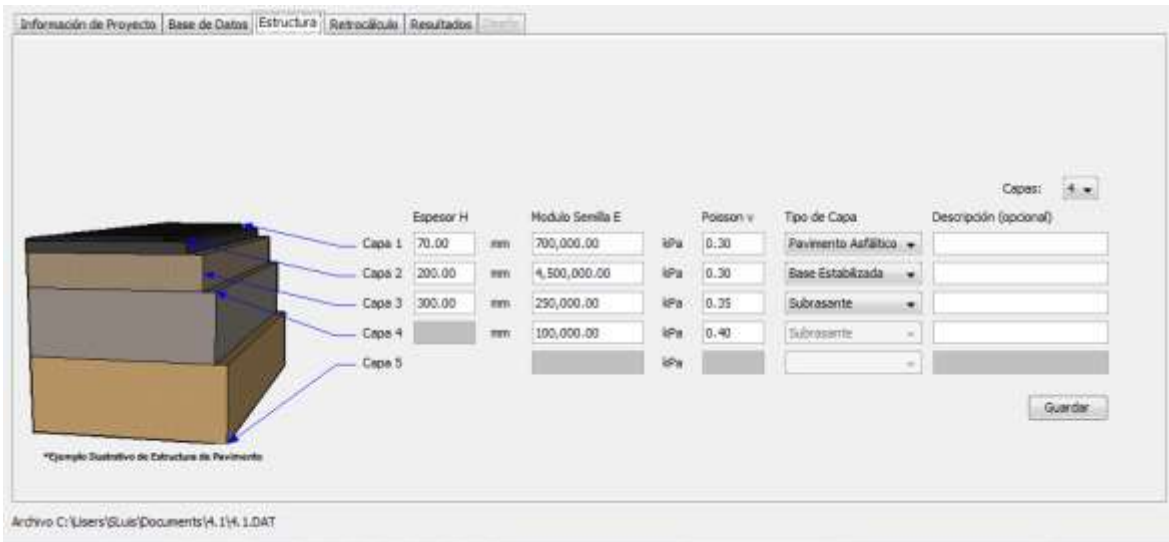


Figura 94.- Representación del modelo estructural en PITRA-BACK (Proyecto 4)

En la Figura 95 se pueden observar los valores finales de los módulos retrocalculados obtenidos con el programa, se toman en cuenta los módulos promedio y para este proyecto son: E1= 1667 MPa, E2= 3312 MPa, E3= 185 Mpa y E4 73 MPa.

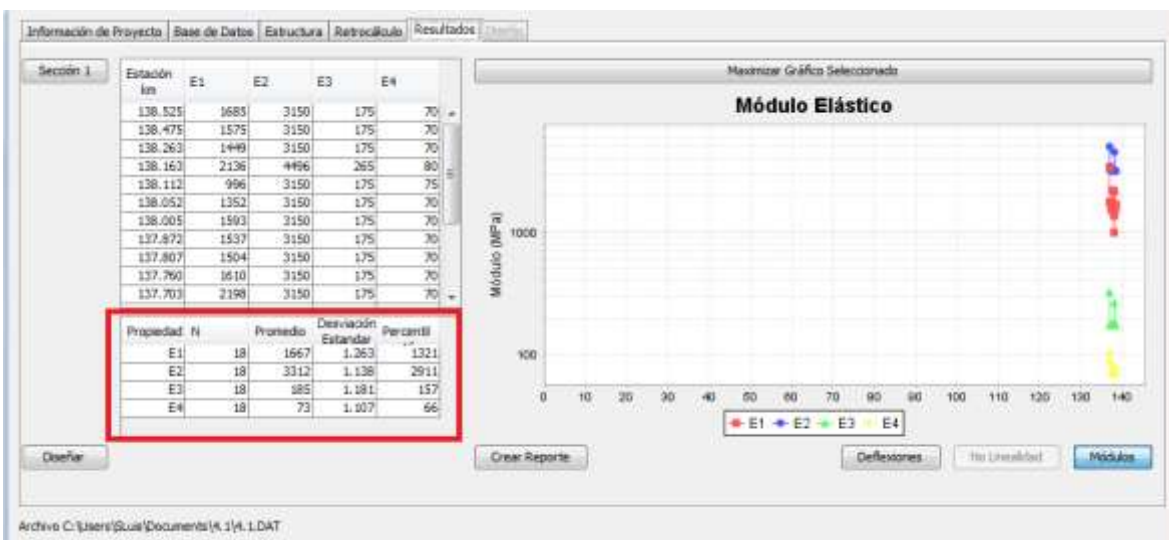


Figura 95.- Resultado de módulos retrocalculados

### 3.4.2. Cálculo de vida remanente.

Con estos módulos, se calcula la vida remanente para la estructura, tomando los siguientes datos:

- Carretera tipo A4
- TDPA total (2018) = 6,475 vehículos
- Factor sentido = 1.0 (aforo en un sentido)
- Factor carril = 0.8 (dos carriles)
- Tasa de crecimiento= 10.4 %
- Espectro de Carga Legal
- Confiabilidad = 90%
- Periodo de diseño: 10 años
- COV = 15% para todas las capas

Se obtiene la configuración vehicular representativa correspondiente a la carretera en “Datos Viales” de la DGST. En la Figura 96 puede apreciarse que predominan los vehículos ligeros en casi un 86.2 % respecto al 13.8 % de vehículos pesados.

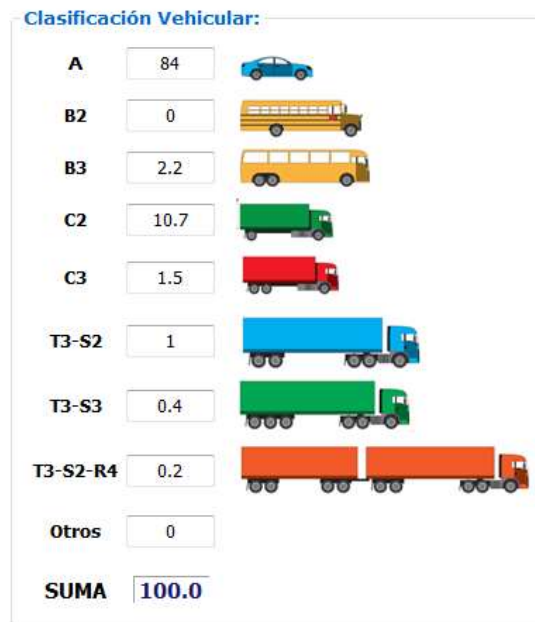


Figura 96.- Configuración Vehicular (Proyecto 4)

Una vez ingresados todos los parámetros, se procede a calcular la vida remanente con ayuda del programa IMT-PAVE 3.0. Ver Figura 97.

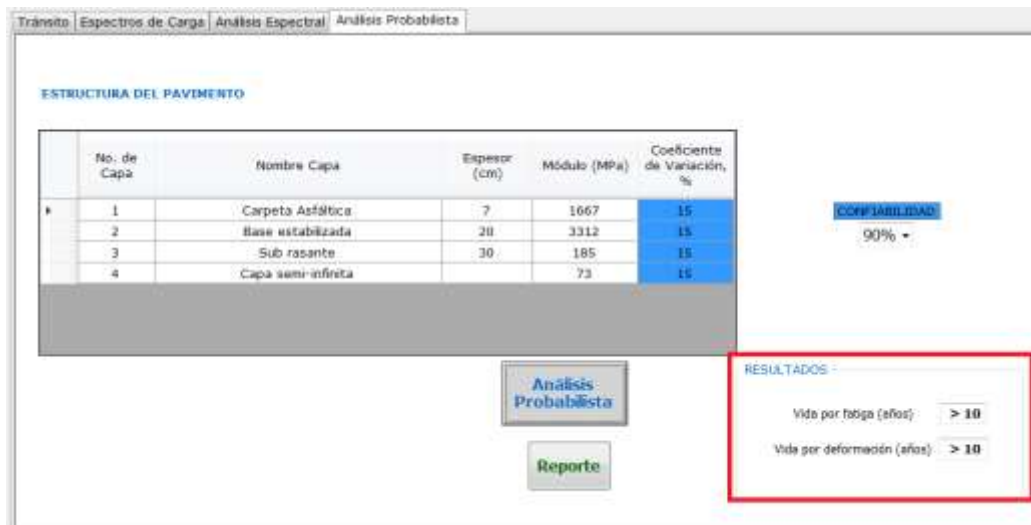


Figura 97.- Vida remanente IMT-PAVE (Proyecto 4)

### 3.4.3. Análisis de resultados.

El valor del módulo retrocalculado para la carpeta es muy bajo y corresponde a una superficie dañada, lo cual es muy evidente en la imagen mostrada anteriormente, por consiguiente el valor del módulo retrocalculado para la base cementada de igual forma es un valor relativamente bajo comparado con el de una base rigidizada en buen estado, lo cual indica que se encuentra agrietada debido a los movimientos de expansión y contracción que ocasionan los cambios de temperatura y humedad, estas grietas en la base se reflejan con el mismo patrón en la carpeta asfáltica debido a la diferencia de rigidez y al escaso espesor de la misma.

Sin embargo, la vida remanente calculada es alta (>10 años), pues como se sabe existen diferentes variables que son tomadas en cuenta a la hora de hacer este cálculo. Como se mencionó anteriormente las deflexiones medidas fueron pequeñas debido a la gran rigidez que aporta la base cementada lo cual contrasta con los daños presentados en la estructura. Un punto muy importante a considerar es que los softwares carecen de un “criterio lógico” lo cual ocasiona una situación posiblemente engañosa si no se tiene la suficiente experiencia y un buen criterio sobre estos temas.

### 3.5. Proyecto 5.

El presente proyecto a evaluar es muy parecido al anterior, pues ambos cuentan con una base estabilizada, solo que en este caso la base está estabilizada con asfalto y no es tan rígida comparada con la anterior, aunque es de gran aportación y tiene un mejor comportamiento para la estructura.

Estructuralmente se conforma por una carpeta asfáltica de 10 cm, una base negra de 20 cm y una subrasante de 30 cm. Como se puede apreciar se presenta el fenómeno de exudación sobre la superficie del pavimento, aunque en términos generales se considera en un estado de regular a bueno. La auscultación muestra datos de deflexión que no sobrepasan el límite permisible. Ver Figura 98.

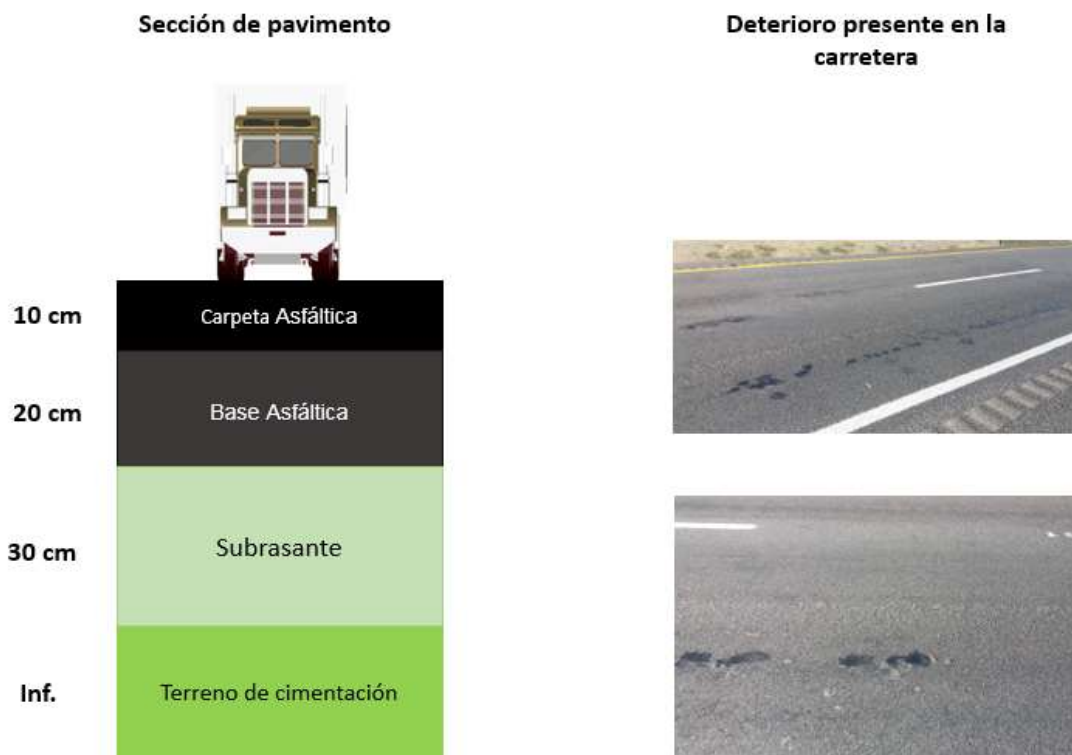


Figura 98.- Panorama general (Proyecto 5)

**3.5.1. Proceso de retrocálculo.**

Para modelar la estructura no se hace ningún cambio respecto a la estructura original, pues no aplica en ningún caso de agrupación de capas y se puede representar de esa manera en el programa de retrocálculo. Ver Figura 99.

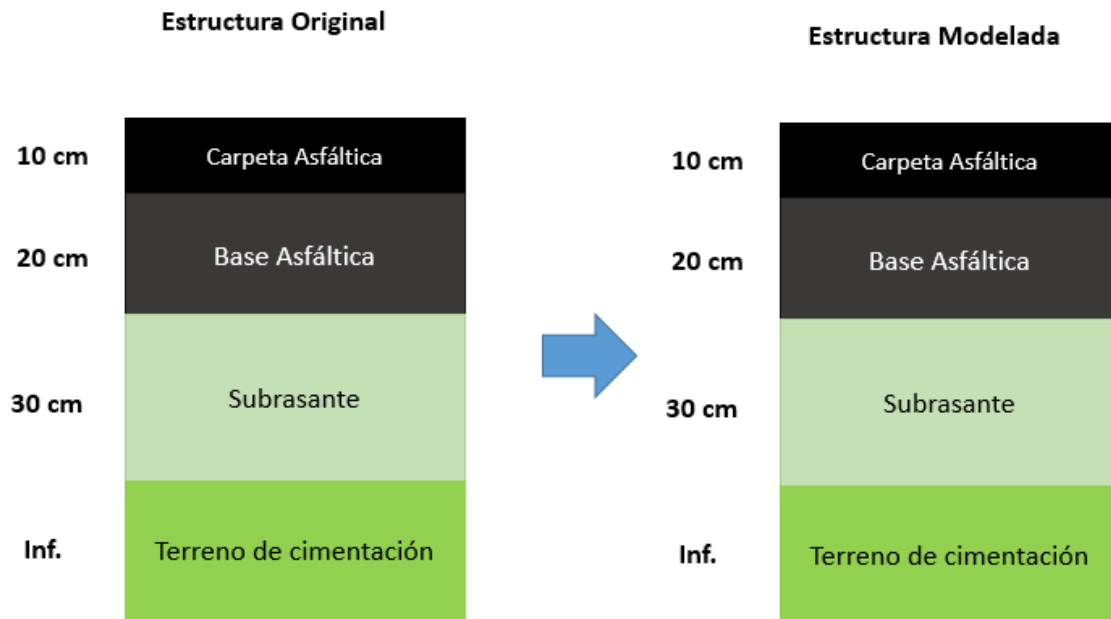


Figura 99.- Simplificación de capas (Proyecto 5)

Después de ingresar los datos de deflectometría y con los datos de la Tabla 16 se procede a modelar la estructura en el programa PITRA-BACK. Ver Figura 100.

Tabla 16.- Caracterización del pavimento (Proyecto 5)

Capa	Espesor (mm)	Módulo semilla (KPa)	Relación de Poisson
<b>Carpeta Asfáltica</b>	100	3,000,000.0	0.30
<b>Base Asfáltica</b>	200	2,500,000.0	0.30
<b>Subrasante</b>	300	240,000.0	0.35
<b>Terreno Cimentación</b>	-	100,000.0	0.40

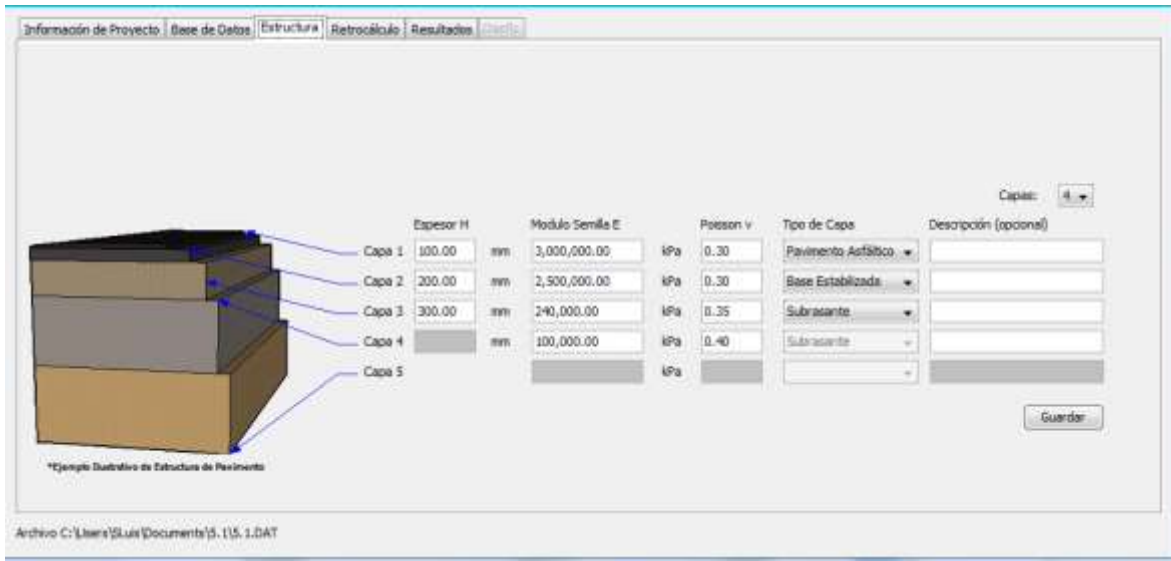


Figura 100.- Modelaje estructural en PITRA-BACK (Proyecto 5)

En la Figura 101 se pueden observar los valores finales de los módulos retrocalculados obtenidos con el programa, se toman en cuenta los módulos promedio y para este proyecto son: E1= 5243 MPa, E2= 1750 MPa, E3= 169 Mpa y E4 70 MPa.

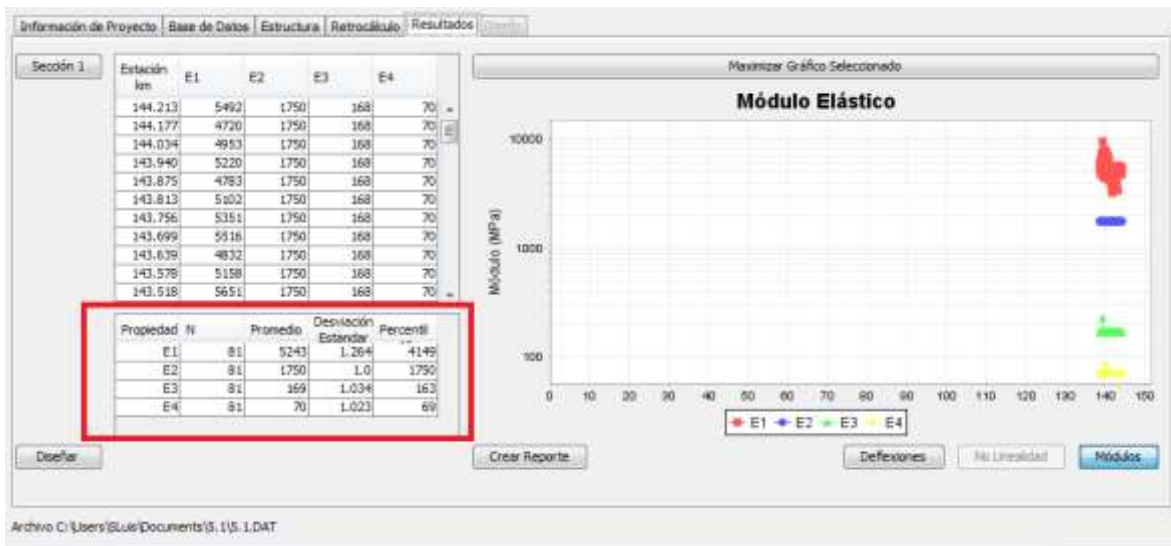


Figura 101.- Resultados de módulos retrocalculados

### 3.5.2. Cálculo de vida remanente.

Con estos módulos, se calcula la vida remanente para la estructura, tomando los siguientes datos:

- Carretera tipo A4
- TDPA total (2018) = 6,475 vehículos
- Factor sentido = 1.0 (aforo en un sentido)
- Factor carril = 0.8 (dos carriles)
- Tasa de crecimiento= 10.4 %
- Espectro de Carga Legal
- Confiabilidad = 90%
- Periodo de diseño: 10 años
- COV = 15% para todas las capas

Se obtiene la configuración vehicular representativa correspondiente a la carretera en “Datos Viales” de la DGST. En la Figura 102 puede apreciarse que predominan los vehículos ligeros en casi un 90.0 % respecto al 10.0 % de vehículos pesados.

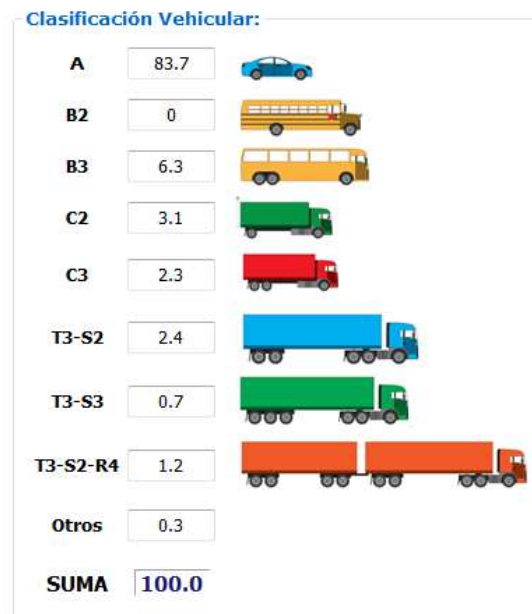


Figura 102.- Configuración Vehicular (Proyecto 5)

Una vez ingresados todos los parámetros, se procede a calcular la vida remanente con ayuda del programa IMT-PAVE 3.0. Ver Figura 103.

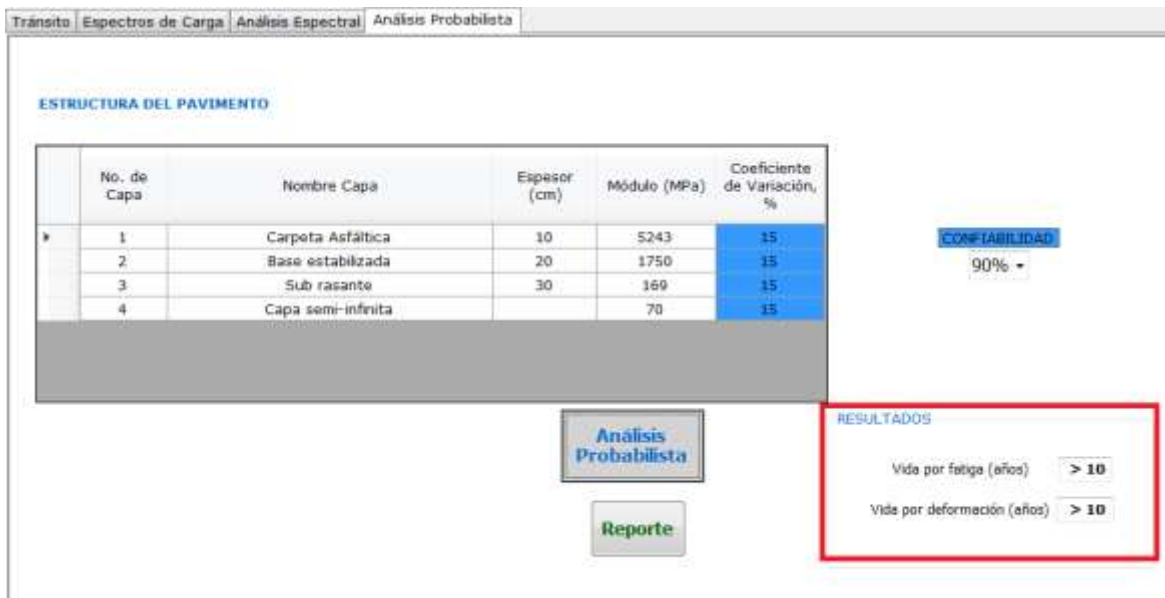


Figura 103.- Vida remanente IMT-PAVE (Proyecto 5)

Como puede observarse la vida remanente es pequeña, por fatiga >10 años y por deformación >10 años.

### 3.5.3. Análisis de resultados.

Los módulos retrocalculados para las capas asfálticas hacen referencia a unas capas estructurales en buen estado, recordando las imágenes mostradas anteriormente se puede observar una superficie que en términos generales no presenta daños estructurales. Se presenta en pequeñas partes desprendimiento de material y también la presencia de una película de marial bituminoso en el pavimento (exudación), la cual forma una superficie cristalina y reflectora que usualmente llega a ser pegajosa; puede ser originada por el exceso de asfalto en el diseño de la mezcla, exceso de sellante asfáltico, un bajo contenido de vacíos de aire o por deposición de aceites caídos de los vehículos.

La vida remanente arroja un valor alto que sobrepasa el periodo de diseño, pues como ya se mencionó la estructura del pavimento tiene un buen comportamiento y no presenta daños de tipo estructural.

### 3.6. Proyecto 6.

El presente proyecto se conforma estructuralmente por dos sobrecarpetas de 5 cm, una base asfáltica de 20 cm, una subbase de 15 cm y una subrasante de 30 cm. Analizando la imagen se puede observar que sobre la superficie del pavimento hay manchas blancas (principalmente en la zona de roderas) que corresponden a la presencia de material fino proveniente de las capas granulares inferiores, a este fenómeno se le conoce como migración de finos o bombeo. La auscultación muestra datos de deflexiones altas que sobrepasan el límite permisible lo cual indica importantes asentamientos y deformaciones en la estructura. Ver Figura 104.



Figura 104.- Panorama general (Proyecto 6)

**3.6.1. Proceso de retrocálculo.**

Para modelar la estructura en el programa de retrocálculo las dos sobre carpetas forman una sola de 10 cm, en este caso no se puede sumar la base con la subbase, pues la base es asfáltica y la subbase granular; por lo que se recomienda combinar las dos capas granulares presentes (subbase y subrasante). Ver Figura 105.

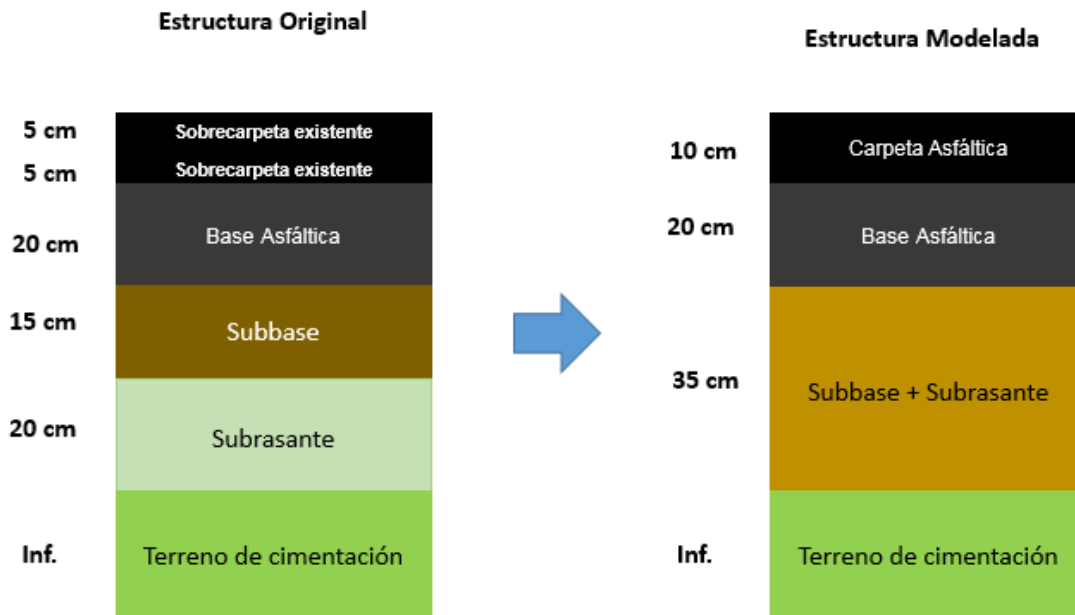


Figura 105.- Simplificación de capas (Proyecto 6)

Después de ingresar los datos de deflectometría y con los datos de la Tabla 17 se procede a modelar la estructura en el programa PITRA-BACK. Ver Figura 106

Tabla 17.- Caracterización del pavimento (Proyecto 6)

Capa	Espesor (mm)	Módulo semilla (KPa)	Relación de Poisson
Carpeta Asfáltica	100	2,000,000.0	0.30
Base Asfáltica	200	1,800,000.0	0.30
Subrasante	350	230,000.0	0.35
Terreno Cimentación	-	100,000.0	0.40

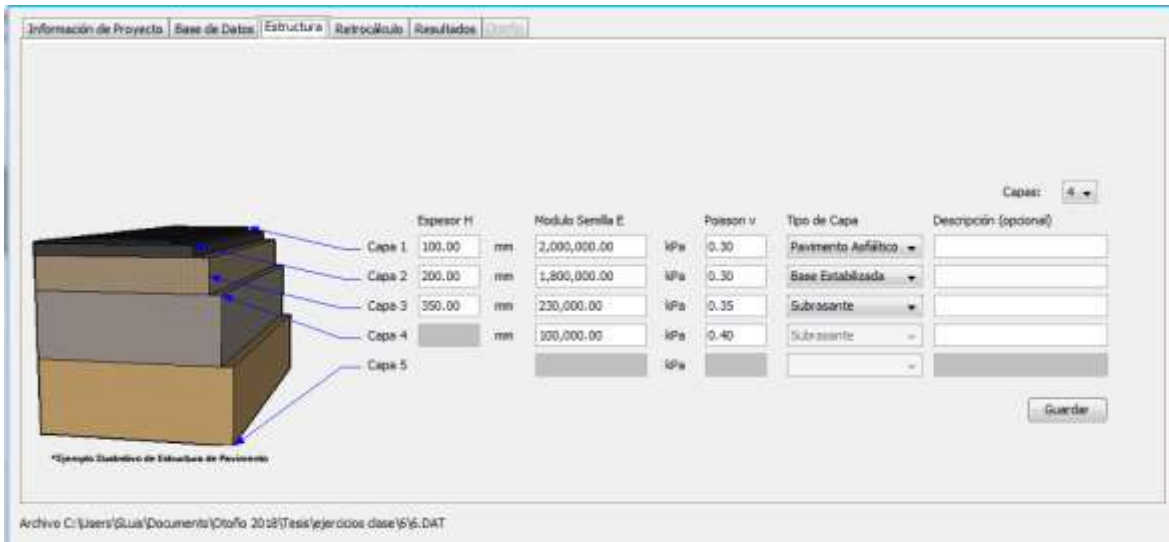


Figura 106.- Modelaje estructural en PITRA-BACK (Proyecto 6)

En la Figura 107 se pueden observar los valores finales de los módulos retrocalculados obtenidos con el programa, se toman en cuenta los módulos promedio y para este proyecto son: E1= 2888 MPa, E2= 1282 MPa, E3= 164 MPa y E4 70 MPa

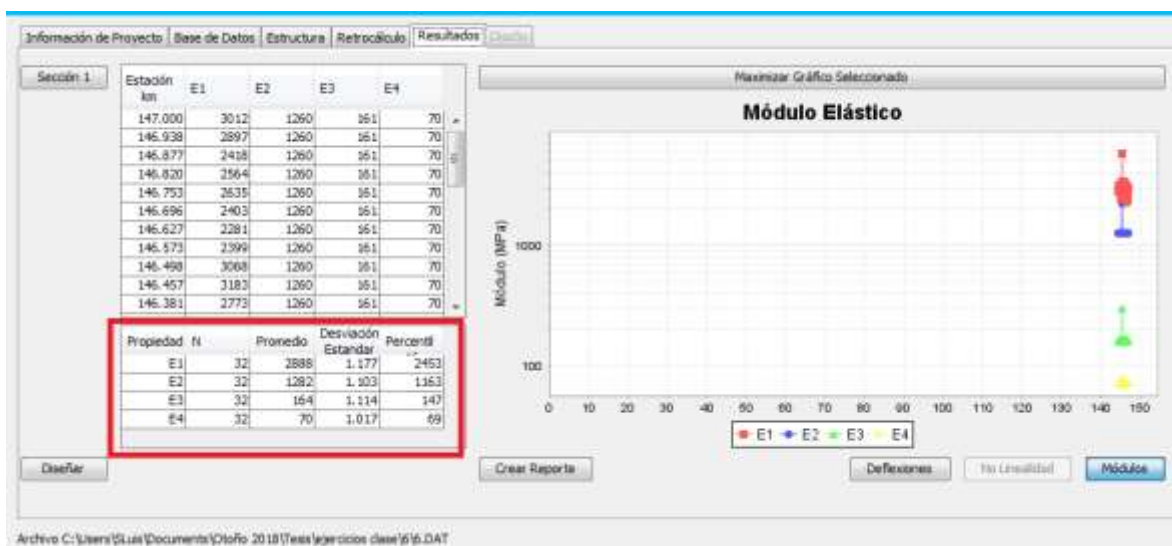


Figura 107.- Resultado de módulos retrocalculados

### 3.6.2. Cálculo de vida remanente

Con estos módulos, se calcula la vida remanente para la estructura, tomando los siguientes datos:

- Carretera tipo A4
- TDPA total (2018) = 6,475 vehículos
- Factor sentido = 1.0 (aforo en un sentido)
- Factor carril = 0.8 (dos carriles)
- Tasa de crecimiento= 10.4 %
- Espectro de Carga Legal
- Confiabilidad = 90%
- Periodo de diseño: 10 años
- COV = 15% para todas las capas

Se obtiene la configuración vehicular representativa correspondiente a la carretera en “Datos Viales” de la DGST. En la Figura 108 puede apreciarse que predominan los vehículos ligeros en casi un 81.73 % respecto al 18.27 % de vehículos pesados.

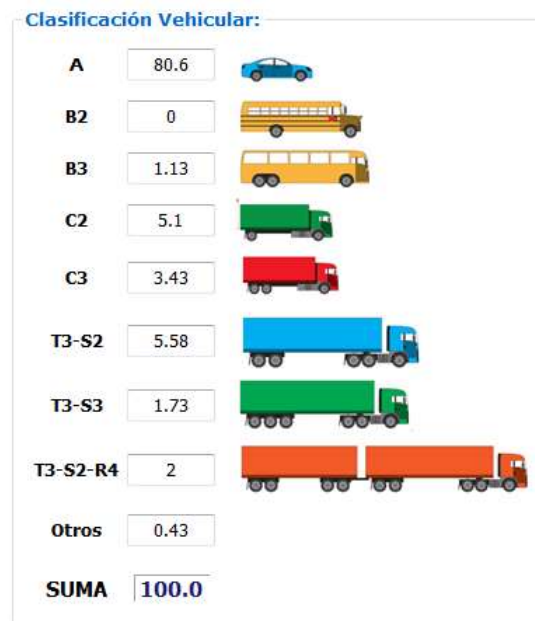


Figura 108.- Configuración Vehicular (Proyecto 6)

Una vez ingresados todos los parámetros, se procede a calcular la vida remanente con ayuda del programa IMT-PAVE 3.0. Ver Figura 109

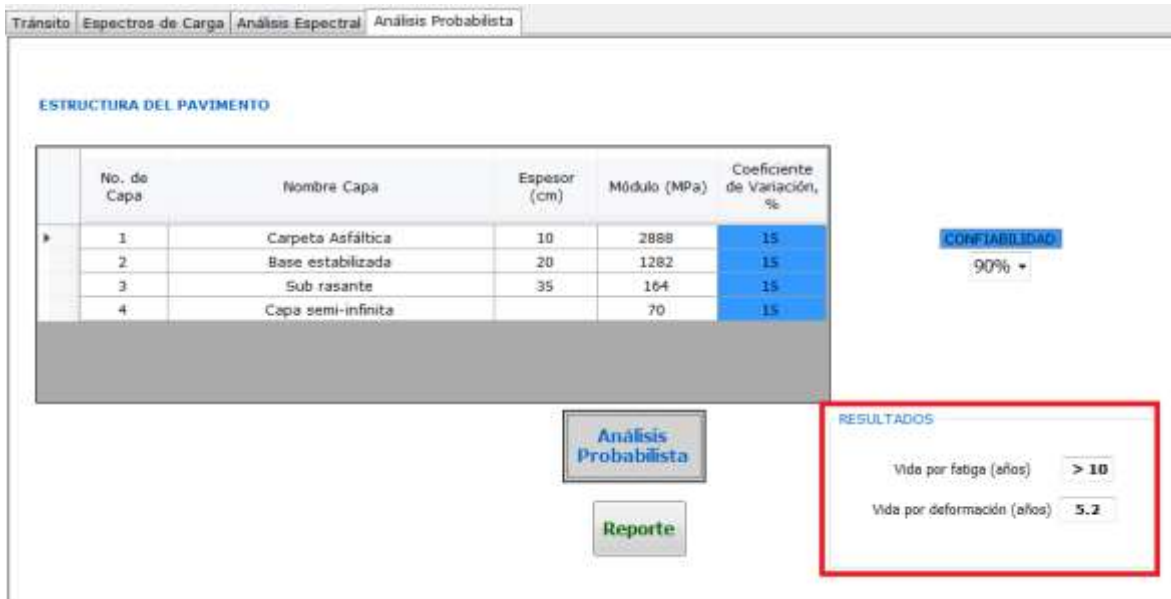


Figura 109.- Vida remanente IMT-PAVE (Proyecto 6)

Como puede observarse la vida remanente es pequeña, por fatiga >10 años y por deformación 5.2 años.

### 3.6.3. Análisis de resultados

Los módulos retrocalculados son muy representativos de la condición real del pavimento, recordando el estado de la carretera se da el fenómeno de bombeo de finos provenientes de las capas granulares (subbase y subrasante) a la superficie y principalmente en las roderas. Esta anomalía se origina cuando existe agua en la capa de apoyo y el impacto de la llanta al pasar por ahí provoca la eyección de los materiales finos y agua a través de las fisuras y grietas presentes en las capas asfálticas superiores (carpeta y base asfáltica).

La vida remanente calculada es de 5.2 años y está gobernada por la deformación, lo cual está relacionado con la migración de finos presente en la superficie; esto indica la presencia de agua en la subbase o subrasante debido a un mal subdrenaje, que debilita a dichas capas provocando altas deflexiones y baja resistencia.

## CONCLUSIONES

En la actualidad las pruebas no destructivas son muy utilizadas en la auscultación de pavimentos para evaluar el comportamiento estructural, pues presentan importantes ventajas como rapidez y precisión en la medición. Sin embargo, en los trabajos de rehabilitación y reconstrucción de carreteras no es suficiente con conocer las deflexiones presentes en la estructura, para elegir la mejor opción a llevar a cabo es necesario conocer otros insumos importantes como, por ejemplo; la vida remanente del pavimento. Por consiguiente, se necesita conocer los módulos elásticos de la estructura y es ahí donde los programas de retrocálculo toman gran importancia en este proceso.

Existen diferentes programas de retrocálculo de pavimentos en el mercado, el PITRA-BACK de la Universidad de Costa Rica fue el utilizado para este trabajo y como se demostró, su funcionamiento fue satisfactorio debido a sus cálculos demasiado razonables y coherentes, además muestra una interfaz muy amigable y fácil de usar, aunque tiene la peculiaridad de que los datos deflectométricos deben ingresarse en un formato especial para que puedan ser procesados. Sin embargo, su uso permite conocer de forma muy aproximada los módulos elásticos representativos de cada capa de pavimento evaluado en cuestión de segundos.

De igual forma se enfatizó que el uso de softwares de retrocálculo optimiza al máximo el proceso, pues como se demostró el proceso iterativo de forma manual mediante hojas de cálculo resulta un proceso tardado y más cuando se trata de tramos carreteros extensos pues este método solo permite calcular módulos elásticos para una sola cuenca de deflexión.

Algo muy importante que se debe aclarar en el uso de los softwares de retrocálculo, es que se requiere de mucha experiencia y conocimiento para tener un buen criterio ingenieril y hacer que el proceso resulte correcto, pues como se mencionó los resultados son muy variables, incluso cuando son ejecutados por expertos resulta difícil saber cuáles son los módulos correctos para las secciones de pavimento evaluadas.

## BIBLIOGRAFIA

- a) American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO (1993). ***“Design of pavement structures”***, Washington D.C, EUA.
- b) Andrade C., Machado I. y Rufino J. (2015). ***“Metodología de análisis de la condición del pavimento a partir del cuenco de deflexión”***, Revista Infraestructura Vial LANAMME UCR, Volumen 17, Número 29, San José Costa Rica.
- c) Bazi, G. (2010). ***“Evaluation of layer moduli and overlay design ELMOD”***, Dynatest ELMOD 6 Consulting Inc Training , México.
- d) Beltrán, G. y Romo M. (2012). ***“Análisis de índices derivados de pruebas de deflexión por impacto para evaluación de pavimentos”***, XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica SMIG, Cancún Quintana Roo, México.
- e) Coria C. (2016). ***“Delimitación de tramos homogéneos para actividades de conservación y reconstrucción de pavimentos flexibles”***, Revista “El Caminero”, Edición 29, AMIVTAC Jalisco, sección pavimentos, pp. 14-18.
- f) Coria C. (2017). ***“Delimitación de tramos homogéneos para actividades de conservación y reconstrucción de pavimentos flexibles”***, Revista “ASFÁLTICA”, Número 50, AMAAC, Abril-Junio, pp. 19-28.
- g) Facultad de ingeniería, BUAP (2018). ***“Retrocálculo aplicado a pavimentos flexibles”***, curso-taller 18 hrs, Puebla, Puebla, México.
- h) Federal Aviation Administration (FAA) (2011). ***“Backcalculation BAKFAA”***, Atlantic City NJ.
- i) Federal Highway Administration FHWA (2000). ***“Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement”***, US Department of transportation, Publicación No. FHWA-RD-98-085, Washington DC.
- j) Federal Highway Administration FHWA (2002). ***“Introduction to Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavements”***, National Highway Institute, Reference Manual Module 5.1 Structural evaluation of existing pavements, NHI Course No. 131064, EUA.
- k) Federal Highway Administration FHWA (2006). ***“Guidelines for review and evaluation of backcalculation results”***, US Department of transportation, Publicación No. FHWA-HRT-05-152, Washington DC.

- l) Garnica P. y Pérez A. (2015). **“Influencia de la temperatura en la determinación de la capacidad estructural de pavimentos flexibles”**, *Revista Asfáltica de la Asociación Mexicana del Asfalto AMAAC*, No 42 pp. 18-26, México DF.
- m) Garnica P. y Hernández R. (2015). **“El nuevo simulador de vehículos pesados del IMT”**, *Revista Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres AMIVTAC* No 37, pp. 4-7, México DF.
- a) Hoffman, M. (2003). **“Direct method for evaluating the structural needs of flexible pavements with Falling Weigh Deflectometer deflections”**, *In Transportation Research Board TRB, Issue 1860*, pp. 41-47, Washington DC, EUA.
- n) Higuera C. (2007). **“Mecánica de pavimentos. Principios básicos”**, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), GRINFRAVIAL, Boyacá, Colombia.
- o) Horak, E. (1987). **“Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa”**, PhD thesis, Department of Civil Engineering at, Pretoria, Sudáfrica.
- p) Instituto Mexicano del Transporte IMT (2015). **“Taller de evaluación de características superficiales y estructurales de pavimentos”**, *Curso de Actualización Post-profesional*, Sanfandila Querétaro, México.
- q) Instituto Mexicano del Transporte IMT (2015). **“Análisis y Diseño Mecanicista de Pavimentos en Carreteras Mexicanas”**, *Curso de Actualización Post-profesional*, Sanfandila Querétaro, México.
- r) López C. (2016). **“Auscultación de pavimentos y su aplicación para estrategias de conservación”**, *Seminario Diagnóstico de la situación actual y desarrollo de las nuevas tecnologías para el diseño y conservación de pavimentos*, Asociación Mexicana en Ingeniería en Vías Terrestres (AMIVTAC), Pachuca, Hidalgo.
- s) Montejó A. (2008). **“Ingeniería de pavimentos: Evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías”**, Tomo 2, tercera edición, Universidad Católica de Colombia, Bogotá Colombia.
- t) Orozco, R. (2005). **“Evaluación de pavimentos flexibles con métodos no destructivos”**, *Instituto de Ingeniería de la UNAM, Tesis doctoral*, México DF.
- u) Orozco, R. (2007). **“Un nuevo índice para evaluar la capacidad estructural de pavimentos flexibles”**, *Revista Asfáltica de la Asociación Mexicana del Asfalto AMAAC* No 8, pp. 29-37, México DF.

- v) Pimentel P. (2017). "**Metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco**", Revista "El Caminero", Edición 32, AMIVTAC Jalisco, sección pavimentos, pp. 36-37.
- w) Poon C. (2016). "**Infraestructura carretera en México**", Seminario Internacional del Asfalto: *Nuevas tecnologías sustentables en los pavimentos asfálticos*", Asociación Mexicana del Asfalto AMAAC, Guadalajara Jalisco.
- x) Rao C. y Von Quintus H. (2016). "**Determination of In-Place Elastic Layer Modulus: Backcalculation Methodology and Procedures**", Seminar TRB Committee on Pavement Structural Modeling and Evaluation. EUA.
- y) Ulloa A. (2015). "**Retrocálculo de módulos de capas y diseño mecanístico-empírico de pavimentos**", XXXI Reunión Anual ANALISEC, Villahermosa, Tabasco.
- z) Zarate, M. (2009). "**Análisis de la respuesta de pavimentos flexibles utilizando el deflectómetro de impacto HWD**", *Revista Asfáltica de la Asociación Mexicana del Asfalto AMAAC No 19*, pp. 3-18, México DF.
- aa) Zarate M. (2013). "**Uso de HWD en pavimentos flexibles**", Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres AMIVTAC, revista No. 22, pp. 4-8, México, DF.