
Capítulo I

Marco introductorio

Capítulo I

Marco introductorio

I. Generalidades

El presente trabajo trata sobre la evaluación de las capas que componen a un pavimento, desde una perspectiva geotécnica actual, mostrando los avances en las herramientas de medición y análisis, y discutiendo las limitaciones que ellas presentan. El énfasis se da sobre los materiales térreos, más que en las capas de rodamiento. Por lo mismo, no se pretende dar una descripción panorámica de las metodologías de evaluación existentes para todos los tipos de pavimentos. Tampoco se trata de discutir y describir las metodologías de evaluación en su sentido más amplio. Se privilegia las formas comunes aceptadas para evaluar desde una perspectiva estructural a los pavimentos. Por ello, será necesario tratar los aspectos geotécnicos con un poco de más detalle.

Por la naturaleza del trabajo, y dado que se emplearon herramientas de análisis para describir mejor las respuestas de estructuras ante diferentes solicitaciones, se tuvieron que discutir algunas características de los pavimentos flexibles y rígidos.

Cualquier intento de caracterizar a los materiales de forma racional, y que pueda usarse la información emanada de tal caracterización en métodos sofisticados del tipo mecanicista debe considerar la interacción de materiales, clima, tráfico, respuesta estructural y los componentes de predicción de comportamiento. Aún más, la caracterización de los materiales se requiere no solamente para calcular respuestas del pavimento, sino para fines complementarios, tales como , para el modelado de la evolución de deterioros y efectos climáticos.

En los métodos actuales se requiere pronosticar los estados de esfuerzo, de deformaciones y desplazamientos dentro de la estructura del pavimento cuando este se somete a cargas de tráfico. Por ello, para cada capa se requiere conocer de manera básica los módulos elásticos, E , y de relación de Poisson, μ ,

I.2 Objetivo y alcances

Según se mencionó, se plantea discutir algunos de los métodos de uso común, pero enfocados a herramientas analíticas que complementan los resultados de campo y su interpretación racional.

En este trabajo no se hace un recuento generalizado del estado del arte de todas las metodologías de evaluación estructural y funcional. En su lugar se tratan aquellas relacionadas solamente con el terreno de apoyo y materiales de terracerías.

1. Discusión y marco general de las propiedades elásticas de los materiales que constituyen un pavimento
2. Obtención del módulo de resiliencia y su significado físico
3. Modelos teóricos para simular sistemas de cimentación para pavimentos
4. Medición de deflexiones en campo, su proceso y formas analíticas de su proceso
5. Discusión de procedimientos de sistemas multicapas elásticas para procesos de evaluación
6. Herramientas de análisis mediante técnicas de elemento finito como formas de evaluación

I.3 Consideraciones adicionales sobre los materiales

Propiedades dependientes del tiempo: Existen variaciones sobre algunas de las propiedades de los materiales que se deben considerar. Por ejemplo su variación con el tiempo. En este último rubro puede decirse que habrá efectos benéficos (endurecimiento de asfaltos, aumento de rigidez de carpetas asfálticas, de aumento de la resistencia de losas de concreto hidráulico. Todo asociado con el tiempo. También se incluyen aumentos de densificaciones o procesos de consolidación en capas inferiores). Pero también existe efectos adversos con el tiempo, como son el deterioro de alguna de las propiedades.

I.4 Efectos dependientes de temperatura y tiempo

Se sabe que el comportamiento de carpetas asfálticas depende de la temperatura y del tiempo en que se apliquen las cargas externas. Por ejemplo, para cargas de aplicación lentas -tránsito a bajas velocidades- y a altas temperaturas los módulos de la citada carpeta tienden a homologarse con los de las capas granulares que la subyacen. Pero en el caso inverso no aplica- cargas rápidas y climas fríos.

También las losas de concreto experimentan cambios con la velocidad de aplicación de cargas. Por ejemplo, un pavimento rígido muestra una reducción de 30 % en las deflexiones en las esquinas y en las deformaciones de bordes en las losas cuando el vehículo incrementa su velocidad de 5 a 100 Km/hora. Otro dato relevante: el módulo dinámico de una losa de concreto a velocidades comunes en autopistas es del orden de 20 % mayor que el módulo obtenido en condiciones estáticas, y que

históricamente se ha venido usando en los análisis de pavimentos rígidos. En términos estrictamente geotécnicos, los terrenos de apoyo consistentes en arcillas blandas saturadas, que exhiben comportamiento visco -plástico, también manifiestan una respuesta en cuanto a su módulo que es dependiente del tiempo. Casi siempre se deja al diseñador especificar los parámetros que mejor representen al estado de los materiales y a la velocidad de carga que haga más crítica su respuesta.

El efecto de la carga no solamente es función de la velocidad del vehículo, sino de la ubicación del material dentro de la estructura del pavimento. Generalmente, mientras más profundo se encuentre el material dentro de dicha estructura, mayor será la longitud del esfuerzo de pulso generado por el vehículo; ello sugiere que también se incrementa el tiempo de duración del pulso de carga.

I.5 Comportamiento no lineal

Se considera que un material es no lineal si su módulo elástico depende del estado de esfuerzos. Casi siempre se asocia este comportamiento a materiales sujetos a altos niveles de esfuerzo. También este comportamiento se asocia a capas granulares y terreno natural. Al final de este trabajo se presenta un ejemplo de simulación de materiales con comportamiento no lineal, usando el método de elemento finito. Con esta herramienta se determina la flexibilidad de la estructura - estados de esfuerzo, deformaciones y desplazamientos). Sin embargo, las metodologías de cálculo se pueden adoptar empleando un enfoque meramente elástico lineal y por capas, por ejemplo para determinar respuestas estructurales de pavimentos flexibles.

I.6 Parámetros requeridos para caracterización de materiales

A continuación se enuncian únicamente los parámetros que se deben evaluar en cada caso, haciendo hincapié que solamente se enuncian, y se tratarán a detalle las respuestas estructurales de los suelos involucrados.

I.6.1 Asfaltos

- 1) Módulos dinámico por capa, para proyectos nuevos y de reconstrucción
- 2) Módulos dinámicos por capa, para diseño de rehabilitaciones
- 3) Relación de Poisson para materiales asfálticos

Otras propiedades:

- Resistencia a la tensión
- Conformidad con relajación plástica ("*Creep*")
- Coeficiente de contracción térmica
- Potencial de Absorber de ondas de superficie cortas

- Conductividad térmica y capacidad de calor

I.6.2 Concretos

Módulos de elasticidad de concretos: función entre otros factores, de relación agua: productos cementantes (a: pc), relación de agregados con la pasta, tipo y tamaño de agregados.

- 4) Relación de Poisson para concretos hidráulicos
- 5) Resistencia a la flexión de concretos hidráulicos
- 6) Resistencia a la tensión indirecta de los concretos hidráulicos
- 7) Resistencia a la compresión de los concretos
- 8) Coeficiente de expansión térmica de los concretos
- 9) Contracción de los concretos hidráulicos

I.6.3 Materiales estabilizados químicamente

Dentro de este grupo se incluyen los concretos pobres, materiales estabilizados con cemento, bases de estructura abierta estabilizadas con cemento, suelo -cemento, materiales tratados con cal o cal-cemento-ceniza volante. Para estos materiales se requiere conocer:

- Resistencias y módulos elásticos
- Propiedades térmicas

I.6.3 Requerimientos de módulo elástico, E, y del módulo de resiliencia, MR

Para estos materiales estabilizados es común que se requieran los valores de los módulos elásticos y de resiliencia serán con base a probetas a los 28 días. Los estados de esfuerzo (esfuerzos desviadores y confinantes, ver descripción más adelante) a que se deben de obtener los MR se pueden determinar a partir del análisis estructural de la sección de prueba, tomando en cuenta los esfuerzos totales.

I.6.4 Suelos granulares sin cementar y terreno natural

Existen dos formas conocidas y familiares para clasificar a los suelos, la metodología de la AASHTO (AASHTO M 145), y el Sistema Unificado de Clasificación de suelos, SUCS (ASTM D 2487). Ambos no se tratarán en esta oportunidad.

Para todos los modelos de análisis estructural, o modelos de respuesta de los pavimentos, se requiere conocer el módulo de resiliencia, M_R , y la relación de Poisson, μ . los módulos elásticos de las capas duras o rígidas para cuantificar la rigidez que es dependiente de los niveles de esfuerzo de materiales granulares sin cementar, así como de la misma capa de cimentación -terreno natural - sujetos a cargas móviles. El módulo resiliente se define como la relación entre esfuerzos desviador axial repetitivo y la deformación axial recuperada. Los materiales granulares exhiben propiedades que dependen de los niveles de esfuerzo a que están sujetos. Por ejemplo, los materiales granulares muestran una rigidización cuando se someten a esfuerzos -su módulo aumenta -, mientras que por el contrario, los de naturaleza fina y cohesiva responden de manera adversa ante presencia de esfuerzos, pues su rigidez disminuye (el módulo tiende a disminuir).

1.7 Suelos granulares. Información de evaluación

Los datos de entrada para un modelo de respuesta de un pavimento, como ya se mencionó, son el módulo resiliente y la relación de Poisson.

1.7.1 Módulo de resiliencia, M_R

Tiene influencia significativa en la respuesta calculada en los pavimentos, y en el módulo de reacción dinámico del terreno de cimentación., valor k . Como se discutirá más ampliamente en los incisos que siguen, el valor de M_R se puede determinar a partir de ensayos de laboratorio, o bien de manera muy aproximada a partir de correlaciones con otras propiedades de resistencia de los materiales, tal como el California Bearing Ratio, CBR.

1.7.2 Pruebas físicas

Se incluyen las de rutina, tales como límites de Atterberg, granulometría y otras especiales, como la conductividad hidráulica en condición saturada.

Grado de saturación y densidad de sólidos

1.7.3 Otras propiedades para materiales sin cementar

Coefficiente de presión de tierras: relación de la presión lateral a la presión vertical de tierras. Para materiales granulares usados en pavimentos, y para los terrenos de apoyo tal coeficiente, K_o , está del orden de 0.4 a 0.6.

Para suelos granulares: $k_o = \frac{\mu}{1-\mu}$

Para suelos finos cohesivos: $k_o = 1-\Phi$

En donde Φ = ángulo de fricción interna efectivo, μ = relación de Poisson

La discusión de sus formulaciones y demás implicaciones está fuera del alcance de este trabajo.

Finalmente, para las capas que se puedan considerar de rigidez suficiente como para ser prácticamente indeformables, también se deben tipificar mediante valores de E y de μ para completar los análisis de respuesta, según se desprende en los análisis tipo inverso de multicapa que se describen en los capítulos III y IV.

Capítulo II

Medición de la respuesta ante cargas

CAPÍTULO II

Medición de la respuesta ante cargas

II.1 Introducción

En la actualidad los pavimentos y sus capas inferiores se evalúan en las formas ya conocidas, las del tipo destructivo, que involucra, como su nombre lo indica, la obtención de muestras y su ensaye en el laboratorio. Aparte ofrece la gran ventaja de permitir una inspección visual directa. Con mucho es un paso esencial al momento de evaluar estructuras de pavimento desde el punto de vista geotécnico. La segunda vertiente de evaluación es medio ensayes del tipo no destructivo. Como su nombre lo indica, la evaluación depende de mediciones que se realizan desde la superficie de rodamiento, o de la superficie de los cuerpos de terraplén que alojan a las citadas estructuras. Por sus mismas características, esta evaluación implica el conocimiento lo más racional posible sobre los alcances y limitaciones de cada una de las modalidades de evaluación. Estos métodos ofrecen ventajas y problemas asociados a la forma misma de ensaye In Situ, además de los algoritmos y formulaciones que sustentan o forman el núcleo mismo para la elaboración, procesamiento e interpretación de los resultados. Casi todos los métodos de ensaye del tipo no destructivo requieren que los resultados sean interpretados por personal calificado.

Este trabajo se centrará exclusivamente en los parámetros elásticos que representan a las capas de los pavimentos, así como del mismo terreno de cimentación. Ello se justifica por la dependencia relativamente alta que tienen los pavimentos en el comportamiento elástico o composición elástica que ofrecen los materiales que los forman.

Históricamente el análisis de deflexiones se ejecutaban con cuatro categorías de equipos y metodologías: a) Equipo de viga para medir deflexiones a nivel estático, b) Equipo de deflexión con vigas automatizadas, c) equipos de medición de deflexiones mediante vibraciones dinámicas continuas, 4) equipos de deflexión por impulsos, y 5) los analizadores de ondas sísmicas.

Si bien la descripción de cada uno de éstos tipos de equipos de evaluación está fuera del alcance de este trabajo, se procederá a describir, de manera simple, las características más simples de los basados en impulsos y los de ondas sísmicas, por ser los de mayor uso actual.

Sin pretender ser exhaustivo, por la naturaleza de este trabajo, a continuación se hace una descripción muy breve, solo para enmarcarla discusión más detallada de los capítulos III y IV.

II.2 Equipos de deflexión por impulso

En estos se inscriben todos aquellos que aplican impulsos a la superficie de rodamiento de cualquier tipo de pavimento, provocando deflexiones que puedan ser registradas por dispositivos de medición. El mecanismo básico es dejar caer una masa de geometría y de peso conocido, que provoca una energía conocida. Para ello la altura de caída se puede ajustar, y se aplica en un transmisor que amplifica la señal y la pasa a una placa de carga apoyada en la superficie del pavimento. La idea fundamental es simular mediante esta aplicación de carga transitoria el movimiento de una carga externa, por tránsito vehicular y la deflexión real asociada, como respuesta a la carga real. Los deflectómetros (FWD, por sus siglas en idioma inglés) de impacto son los equipos más usuales.

Dentro de los más conocidos son los Dynatest, los cuales van montados en un semi remolque, y puede se jalados por cualquier camioneta o tipo Van. Las alturas de masa se pueden controlar, así como los niveles de carga. La respuesta de los pavimentos se mide mediante siete a nueve transductores localizados a distancias prefijadas a partir de los puntos de carga. Como más adelante se detalla, toda la operación puede ser controlada por los operadores.

Existe también el deflectómetro tipo KUAB. Es muy similar al anterior, pero la placa de carga tiene un área mayor, que permite distribuir de mejor manera las energías de los pulsos. También en este equipo los desplazamientos se mediante transductores que son transformadores diferenciales y los impulsos de carga aplicados son más largos que los aplicados por el Dynatest.



Fig. II.1 Dynatest 8082 HWD



Fig. II.2 Batería y barra sensora, FWD

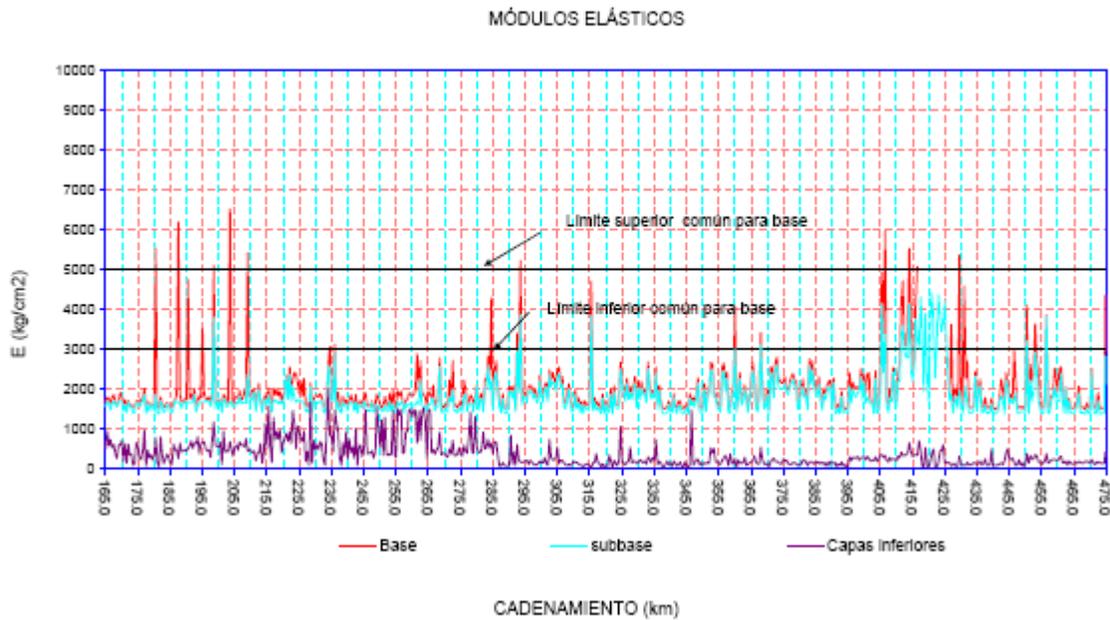


Fig. II.3 Resumen de módulos elásticos derivados a partir de medición de deflexiones, Equipos de FWD

En la Fig. II.2: aparecen los sensores y en la Fig. II.3. aparece una gráfica mostrando los resultados de análisis. En el Capítulo III. aparece un desglose de análisis y su discusión.

Herramientas de análisis

Los ensayos del tipo no destructivo utilizan programas de cómputo que agilizan la colección y el procesamiento de datos. Estos programas se utilizan para diferentes propósitos: evaluación de capas de pavimentos, programas de conservación e inventariado, investigación, detección de vacíos en ciertas estructuras, y la eficiencia de transferencia de cargas en pavimentos rígidos. La tabla II.1 ejemplifica algunos programas populares que se utilizan desde hace algunos años:

Tabla No II.1: Programas de cómputo comunes para evaluación de pavimentos

Programa	Evaluación de pavimentos	Diseño de sobrecarpetas
Darwin	x	x
AASHTO	x	x
Modulus	x	x
Evercalc	x	x
Elmod	x	x
Everpav	x	x
Wesdef	x	x
Padal	x	x
Illiback	x	x
Elcon	x	x
Pedmod	x	x
Dama	x	x
Michback		
Michpave		x
Otros	x	x

Por ejemplo, el programa de la AASHTO y el programa DARWIN, asociado al primero, son de los más comunes para el dimensionamiento de sobrecarpetas. También se puede mencionar que de los métodos más comunes para evaluación son el ELMOD, MODULUS y DARWIN.

El programa ELMOD por ejemplo es ampliamente conocido para el procesamiento de datos de deflexiones de los dispositivos FWD. Ver Fig, II.3.

II.3 Georadar

Esta técnica se usa para determinar espesores de capas de pavimento como complemento a calas de exploración o de extracción de núcleos. La ventaja de esta forma no destructiva de evaluar los materiales es su operación a velocidad de operación. Los componentes principales de un GPR (por sus siglas en inglés) es una unidad de control con un programa de cómputo asociado para el procesamiento de datos y una o varias antenas para recibir y emitir las ondas electromagnéticas. Dependiendo del tipo de antenas, los GPR se clasifican en acoplados en aire o en tierra. En los primeros las antenas receptoras-emisoras (“cuernos”) se suspenden del orden de 15 a 50 cm de la superficie para operar el equipo a 80 km/ hora. Estos equipos proporcionan buenas señales, limpias y de fácil interpretación. Pero algunas ondas se refractan en la superficie, lo que limita la profundidad de penetración. Por el contrario, las antenas que usan acoplamientos en tierra, al estar en contacto

directo con la superficie de rodamiento, proporciona una profundidad de penetración mayor para las mismas frecuencias, pero se limita la velocidad de operación.

El mecanismo es relativamente simple: se emite hacia la estructura de pavimento ondas electromagnéticas cortas. Estas ondas viajan a través de los diferentes estratos o capas. Sin embargo, la forma en que se obtienen los resultados buscados es mediante la reflexión de ondas que toma lugar al encontrar estas varias condiciones; espesores, condiciones de humedad, rigideces, discontinuidades, densidades. La intensidad de los pulsos reflejados es directamente proporcional con las constantes dieléctricas entre materiales adyacentes. Los pulsos recibidos por las antenas son guardados como ondas, que se procesan y digitalizan para ser posteriormente interpretadas mediante el cálculo de amplitudes y los tiempos de arribo para cada reflexión principal. Para calcular los espesores de capa se requiere conocer la constante dieléctrica correspondiente al material de estudio. Esta constante se puede inferir mediante mediciones directas de espesor en ensayos destructivos, o bien se puede inferir mediante otras pruebas no destructivas. Al usar una antena se puede estimar por ejemplo en un pavimento asfáltico su constante mediante la medición de amplitudes de las señales reflejadas obtenidas directamente de la superficie, y otra obtenida de la señal reflejada desde una placa metálica colocada en la superficie.

Para el método de la antena exterior o sin contacto (acoplados en aire) los espesores de las capas se pueden determinar a partir de los tiempos de arribo de las ondas, así como de sus amplitudes. Ver Ref. 2

$$h_i = \frac{ct_i}{2\sqrt{\epsilon_i}}$$

Ec. II.1

En donde h_i = espesor de la capa i -ésima, t_i = el tiempo del viaje de la onda electromagnética en ambas direcciones a través de la i -ésima capa, c = la velocidad de luz en espacio libre, ϵ_i = constante dieléctrica de la i -ésima capa.

Para el sistema acoplado a tierra, o de contacto, la ecuación II.1 no aplica, ya que las ondas emitidas por el georadar no viajan en el aire. Por ello, la constante dieléctrica se tiene que calibrar ahora directamente de núcleos. Con base en el teorema de Pitágoras, la Ecuación II.1 se construye con espesores de capas:

Aquí h = espesor de capa, V = velocidad de la onda electromagnética, t = tiempo de viaje registrado, d = distancia entre las unidades transmisoras y de registro dentro de la antena.

II.4 Métodos de propagación de ondas superficiales

Por concepto, las ondas superficiales son ondas de esfuerzo que se propagan en la superficie libre de un material. La velocidad con que viajan las ondas son función de las propiedades elásticas de los estratos involucrados; por ello se pueden usar para determinar los módulos elásticos. Existen varias formas de realizar estas mediciones: Análisis espectral de ondas superficiales (SASW, por sus siglas en inglés), simulación en canal múltiple con un receptor (MSOR), análisis en canal múltiple de ondas superficiales (MASW). Todas ellas se han usado en tecnologías de pavimentos, en especial en asfaltos para determinar módulos elásticos In Situ. (Ver Ref. 8, Nazarian, S., Stokoe, 1983)

Cuando se aplican impactos a la superficie de un material elástico se generan dos tipos de ondas de esfuerzo: las de cuerpo y las superficiales. Las de cuerpo incluyen las ya conocidas de compresión (P) y las de corte (S). Viajan de manera radial hacia afuera del punto de impacto a lo largo de un frente de onda hemisférico, dentro de la masa del cuerpo elástico. Por el contrario, las ondas Rayleigh viajan solamente en la superficie del semi espacio, por ello se les denomina ondas de superficie; no lo hacen dentro del cuerpo elástico. Por lo anterior, el ensaye de las ondas Rayleigh utilizan la naturaleza de estas ondas, que es dispersa dentro de un medio estratificado, para evaluar las propiedades de rigidez elástica en cada una de las capas. La dispersión se define como la variación de las velocidades de ondas Rayleigh con la frecuencia - longitud de onda- en donde la rigidez cambia con la profundidad.

En los últimos años se ha introducido la técnica de MASW para el procesamiento de datos completado con la técnica de adquisición de datos MSOR, para mitigar un poco el problema de uso de la técnica SASW. Con el sistema MSOR se obtiene un registro multicanal solamente un transductor o receptor. Este solamente se coloca en la superficie y recibe señales de los impactos colocadas a separaciones cada vez mayores. Véase la Ref. 8



Fig. II.4 Aspecto dl equipo MSOR

Una vez que se determinan las velocidades de fase se pueden determinar también las velocidades de ondas de cortante y finalmente se puede estimar también los módulos mediante la Ec. II.2:

$$E = 2(\rho V_s^2)(1 + \nu)$$

Ec. II.2

Estos módulos, obtenidos mediante mediciones de ondas superficiales, se consideran módulos de alta frecuencia con datos de velocidad obtenidos a frecuencias en el rango de 10 a 90 kHz. Por otro lado, en la realidad las frecuencias asociadas al tráfico y al FWD, usadas para diseño, son del orden de 10 a 25 Hz. Es por ello que se tienen que hacer determinaciones de módulos de capa más realistas.

II.5 Analizador sísmico de pavimentos, ASP

El analizador sísmico de pavimentos consiste básicamente en dispositivo para analizar estructuras de pavimento del tipo no destructivo. Consiste en un remolque montado en llantas y operado por vehículos ligeros. Es capaz de detectar esfuerzos en medios estratificados. En él se combinan varias técnicas de análisis.

1. Ondas de cuerpo ultrasónicas
2. Ondas superficiales ultrasónicas
3. Respuesta a los impulsos
4. Análisis espectral de ondas superficiales (SASW)
5. Velocidad de pulso



Fig. II.5 Vista de perfil de un ASP



Fig. II.6 Aspectos de los transductores de un equipo ASP

Estas técnicas involucran la emisión de ondas de esfuerzo de una fuente desde la superficie del pavimento (pueden ser un transductor o un proyectil ligero a alta velocidad), y la detección de ondas características por sensores de precisión. Se emplean ondas de compresión y de cortante para determinar resistencias y módulos.

Algunas características que se pueden medir con estos equipos son los siguientes

1. Humedad en la capa base, (caso de pavimentos flexibles);
2. Huecos y pérdida de soporte (pavimentos rígidos);
3. Exfoliación en sobrecarpetas;
4. Agrietamiento fino; y
5. Envejecimiento de pavimentos

El ASP durante su operación baja las Fuentes y transductores hasta la superficie del pavimento y registra de forma digital las deformaciones provocadas por un gran martillo neumático que genera vibraciones de baja frecuencia y las de un martillo pequeño que genera también vibraciones, pero de bajas frecuencias, Ver Fig. II.7.

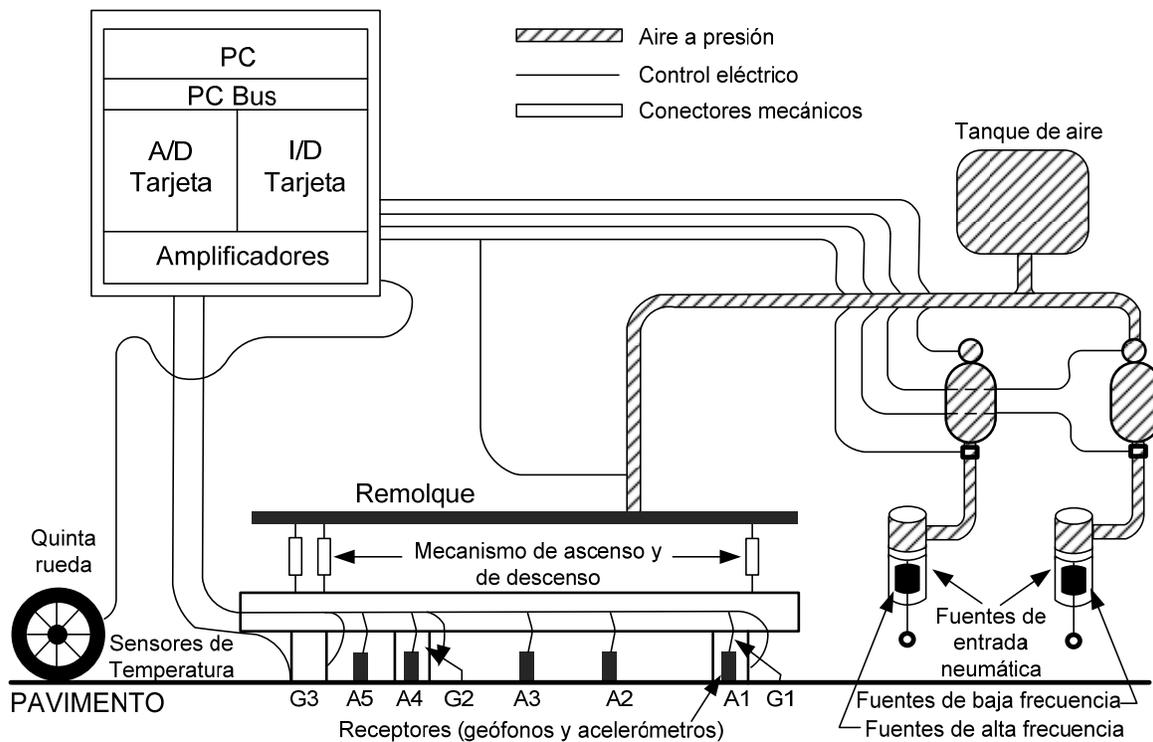


Fig. II.7 Esquema de un Analizador sísmico de pavimentos

El semirremolque y chasis es similar al deflectómetro de impactos. Consiste en un bastidor que aloja a transductores que a su vez lo opera un semirremolque que es arrastrado por un tracto camión ligero. Sin embargo, difiere del deflectómetro ya citado en que usa más transductores, y de más alta frecuencia. Su interpretación técnica es más sofisticada. La Fig. VII.8 muestra un detalle del contacto de los acelerógrafos con la superficie.

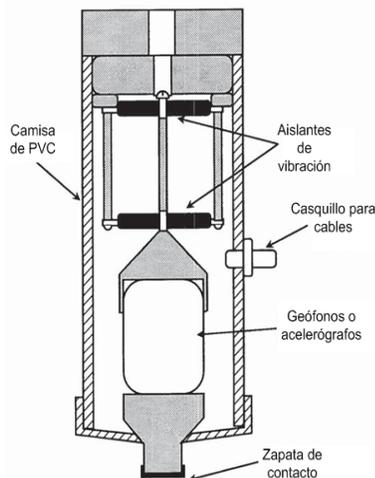


Fig. II. 8 Detalle de los acelerógrafos

Un ciclo completo de medición, una vez que se arriba al punto de interés, toma del orden de un minuto. Tal ciclo consiste en situarse en el punto, bajar las fuentes y los transductores, ejecución de la medición y retiro del equipo. Generalmente esta operación toma unos segundos, tiempo en el cual se hace la colección y procesamiento de datos.

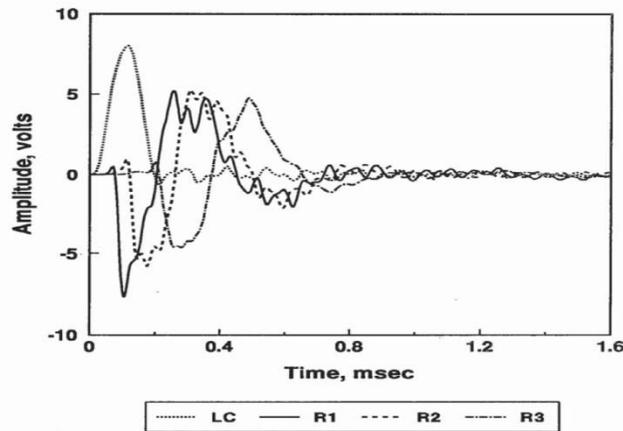


Fig. II.9 Ejemplo de registros típicos de tiempo, ASP

Enfoque de la discusión: Si bien el dispositivo sirve para evaluar deterioros en sus diferentes tipos o variedades en los diferentes tipos de pavimentos, por la orientación de este trabajo se hará énfasis solamente en la capacidad que tiene de evaluar características de los materiales térreos, en especial el terreno de apoyo.

Contenido de agua en la base

Como se sabe, en tanto se ingrese mayor cantidad de agua a las capas de terracería y del mismo terreno natural, se gestará una disminución de rigideces y resistencias. Midiendo el perfil de velocidades de ondas de corte de un sitio dado, usando el método de análisis espectral de ondas superficiales, SASW, se puede determinar la magnitud del decremento del módulo de las diferentes capas dentro de la estructura del pavimento.

Tabla II.2: Niveles y naturaleza de medidas para el precursor de daño, capas base y terreno natural

Precursor del daño	Ensaye	Cantidad medida	Componente evaluado del pavimento
Cantidad de agua en la base (humedad)	Respuesta a impulsos	Cambio en la flexibilidad por un cambio en el contenido de agua	Toda la estructura del pavimento
	Análisis espectral de ondas superficiales (SASW)	Cambio en el módulo de Young debido al cambio del contenido de agua	Capas base, subbase y de terreno natural

El método de ultrasonido de ondas de cuerpo determina la existencia de grietas, aunque sean muy superficiales. En este método la energía por ondas de esfuerzo se genera en un punto específico y se detecta en varios otros puntos. Entre los puntos de impacto y los receptores en caso de existir anomalías en las capas del pavimento -oquedades, fisura o grietas -, ellas ocasionarán retrasos en los tiempos de llegada y alterarán las frecuencias de las ondas. Una de las desventajas de este método es que no se pueden diferenciar materiales competentes (resistentes) que tengan grietas de los materiales débiles.

Las diferentes técnicas sísmicas se pueden aplicar, en forma diferenciada para diversas anomalías: exfoliaciones (respuestas a impulsos, y velocidad de pulso), oquedades y pérdidas de soporte (velocidad de pulso), envejecimiento del asfalto (velocidad de ondas de cortante)

Método de la respuesta de impulsos

Mediante este método se pueden obtener los módulos al cortante del terreno de apoyo, así como la relación de amortiguamiento del sistema. Estos parámetros en sí caracterizan la existencia de varios precursores de deterioro. Dicho módulo puede sugerir si se trata de un apoyo adecuado o no. La relación de amortiguamiento puede calificar de alguna manera las condiciones de pérdida de soporte o apoyo débil. Ambos parámetros se pueden extraer del espectro de flexibilidad medido en el campo. Solamente para capas muy delgadas -menores a 7.5 cm- y en capas muy débiles en pavimentos flexibles, estudios (Ref. Reddy, 1992) indican que los valores obtenidos de los módulos por el método de respuesta de impulsos representan bien a los módulos al corte del terreno de apoyo. También indican que la rigidez de las capas influyen mucho los resultados. También existen casos en que las propiedades de las capas de los pavimentos- carpetas asfálticas y capa base - afecta el resultados de tal forma que los módulos obtenidos del método y su ensaye deben considerarse como un módulo global.

El análisis del pavimento involucra algunas hipótesis de trabajo. La estructura del pavimento se modela como un sistema de un grado de libertad. Se requieren tres parámetros: la frecuencia natural, relación de amortiguamiento y factor de ganancia. Estos dos últimos se pueden sustituir por la amplitud estática y por la amplitud pico. En conjunto se conocen como parámetros modales del sistema. La frecuencia natural y el factor de ganancia se usan para determinar el módulo del terreno. La relación de amortiguamiento se usa de forma directa.

Para determinar los parámetros modales, se ajusta una curva al espectro de flexibilidad de acuerdo a un algoritmo de ajuste de curvas que usa funciones de coherencia como funciones de peso (Richardson, M. H., 1982) Los ceros y factores de ganancia a partir de las curvas de ajuste se convierten a parámetros modales. A partir de aquí se obtienen ya los módulos del terreno de apoyo. Luego, a partir de la siguiente ecuación II.3 se obtiene el módulo de cortante del terreno (Dobry and Gazetas, 1986):

$$G = \frac{(1-\nu)}{[2 L A_0 I_s S_z]} \quad \text{Ec. II.3}$$

ν = relación de Poisson de la capa de apoyo

L = longitud de las losas

A_0 = flexibilidad estática de la losa (flexibilidad para $f = 0$).

El factor de forma S_z ha sido desarrollado por Dobry and Gazetas (1986). S_z es igual a 0.80 para un pavimento flexible largo.

I_s (Ref. Reddy, 1992) es un parámetro que considera el aumento de flexibilidad cerca de las orillas y esquinas de una losa. Es función de la geometría de la losa, así como de las coordenadas del punto de impacto con relación a una esquina. Dependiendo de la posición del punto de impacto y de la geometría de la losa, el valor de I_s será igual a 6.

La relación de amortiguamiento, que normalmente varía entre 0 y 100 %; es un indicador del potencial de movimiento que pueda tener la losa. Por ejemplo, si una losa está en contacto completo con el terreno de apoyo, o si contiene un vacío saturado con agua, ello indicará que tendrá un comportamiento altamente amortiguador, con una relación de amortiguamiento mayor a 70 %. Una losa que presente una oquedad en las orillas demostrará una relación de amortiguamiento en el rango de 10 % a 40 %. Si la losa presentara una pérdida de soporte en la mitad de la losa tendrá un amortiguamiento de 30 % a 60 %.

Las otras técnicas restantes de medición

- Ondas de cuerpo ultrasónicas
- Ondas superficiales ultrasónicas
- Análisis espectral de ondas superficiales (SASW)
- Velocidad de pulso

En sí representan formas atractivas para evaluar diferentes componentes de precursores de daño para las diferentes capas del pavimento, pero lo hacen en zonas no necesariamente al terreno de apoyo. Lo hacen para detectar de manera temprana factores que pueden afectar al comportamiento de las capas de rodamiento, y en este trabajo no se ha dado prioridad a estos rubros.

II.6 Investigación directa

La calibración de todo programa de pruebas no destructivas requiere forzosamente de un programa complementario de sondeos directos. Esta investigación geotécnica puede ser mediante sondeos profundos o pozos a cielo abierto. Al igual que todo proyecto geotécnico, esta investigación servirá para caracterizar a los depósitos de suelo natural de apoyo (cimentación), y a las mismas capas de transición.

Con los datos de entrada de las características físico mecánicas de los materiales involucrados, se estará en condiciones de correlacionarlos con las mediciones rápidas de tipo indirecto.

Referencias Capítulos I y II

1. American Society for Testing and Materials. "ASTM D 2493 Viscosity-Temperature Chart for Asphalts," 1998 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 0.403, pp. 230-234.
2. Al-Qadi, I.L., and Lahouar, S. (2004). "Ground Penetrating Radar: State of the Practice for Pavement Assessment", Materials Evaluation, American Society for Nondestructive Testing, Vol. 62, No. 7, pp. 759-763.
3. Jones, G. M., M. I. Darter, and G. Littlefield. "Thermal Expansion-Contraction of Asphalt Concrete." Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 37. 1968
4. Burnham, T., and A. Koubaa. "Determining the Coefficient of Thermal Expansion and Shrinkage of Jointed Concrete Pavement," 2nd Annual Mn/ROAD Workshop, Minnesota, 2002.
5. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1993.
6. Khazanovich L., S.D. Tayabji, and M.I. Darter. *Backcalculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume I: Slab on Elastic Solid and Slab on Dense Liquid Foundation Analysis of Rigid Pavements*, Report No. FHWA-RD-00-086, Washington, DC: Federal Highway Administration, 1999.
7. Maser, K.R., Holland, T.J., Roberts, R., and Popovics, J. (2006). "NDE methods for quality assurance of new pavement thickness", The International Journal of Pavement engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 1-10.
8. Nazarian, S., Stokoe II, K. H., Hudson, W.R. (1983). "Use of Spectral Analysis of Surface Waves Method for Determination of Moduli and Thicknesses of Pavement Systems", Transportation Research Record 930, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. pp. 38-45.
9. Ryden, N., Park, C.B., Ulriksen, P., and Miller, R.D. (2004). "Multimodal Approach to Seismic Pavement Testing", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering., Vol. 130, No. 6, pp. 636-645.
10. Ryden, N., Ulriksen, P., Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., and Ivanov, J. (2001). "High frequency MASW for non-destructive testing of pavements-accelerometer approach", Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2001), Environmental and Engineering Geophysical Society, Annual Meeting, Denver, RBA-5.
11. Raad, L. 1982. "Pumping Mechanism of Foundation Soils under Rigid Pavements." Transportation Research Record (National Research Council, Washington, DC) 849:29-47.

12. Richardson, M. H., and D. L. Formenti. 1982. "Parameter Estimation from Frequency Response Measurements Using Rational Fraction Polynomials." In Proceedings, First International Modal Analysis Conference (Society for Experimental Mechanics, Orlando, FL), 167-81.
13. Dobry, R., and G. Gazetas. 1986. "Dynamic Response of Arbitrary Shaped Foundations." Journal of Geotechnical Engineering (American Society of Civil Engineers, New York) 112, no. 2, 2:109-35.

Capítulo III

TÉCNICAS DE CÁLCULO INVERSO

CAPITULO III

TÉCNICAS DE CÁLCULO INVERSO

III.1 Introducción

En ingeniería de pavimentos se usa el valor de k elástico como dato de entrada en los procedimientos de análisis o diseño; solamente la componente elástica del terreno se emplea para simular la respuesta a de la estructura cuando esta se somete al tránsito vehicular. El valor del módulo de reacción inmediatamente por debajo de la estructura de pavimento es un valor que incide en la respuesta a largo plazo de este último.

III.2 Formas de definir el valor del módulo de reacción.

III.2.1 Métodos de correlación: Se propone un valor k atendiendo al tipo de suelo, densidad, CBR (California Bearing Ratio), estabilómetro Hveem (valor R), o con resultados de penetrómetro de cono dinámico (PCD). Si bien se usan de forma rutinaria, estas correlaciones deben ajustarse para tomar en cuenta la compresibilidad que implica presencia de terraplenes por encima del terreno natural, o cuando existan capas rígidas muy cerca y por debajo del desplante del pavimento.

III.2.2 Métodos de cálculo inverso: Estos métodos son muy efectivos cuando se trata de diseñar sobrecarpetas de refuerzo de estructuras existentes de pavimento, o para diseño de reconstrucciones en alineamientos ya existentes, o para diseñar estructuras similares tomando en cuenta las propiedades mecánicas del terreno de alineamiento. También esta información resulta útil para establecer correlaciones entre ensayos no destructivos de deflexiones con diferentes tipos de suelos y sus propiedades asociadas.

Cuando se tienen alineamientos con cortes y rellenos (terraplenes) se obtiene valores diferenciados de " k "; cuando se ejecuten ensayos y cálculos inversos en estas zonas, y que sea la condición predominante para los pavimentos medidos o en proceso de diseño, no se requiere hacer los ajustes por presencia de terraplén o de capa rígida. Sin embargo, las mediciones de deflexiones arrojan un valor dinámico de " k ", por lo que para propósitos de diseño este valor se debe llevar a un valor estático, para lo cual se aplica un factor reductivo, casi siempre del orden de 2.

III.2.3 Prueba de placa: Es la forma más directa de determinar el valor de " k ", en sus variantes de carga repetitiva o no repetitiva (ASTM D 195 o D 1196, AASHTO T221 o T 222). Por su alto costo y tiempo de ejecución se usa poco como herramienta de evaluación en forma rutinaria.

En la variante de carga repetida, el valor de k se define como la relación entre la carga con la deformación elástica (la porción recuperada de la deformación total). En la variante de carga no repetitiva, de acuerdo al criterio propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de E.U.A., el valor de k se define como la relación carga- deformación que corresponda a una deformación de 1.25 mm (0.05). El diámetro de la placa debe ser de 76.2 cm para determinar el valor estático y elástico de k . Cuando las placas son de diámetro menor hay tendencia a sobreestimar el valor de k .

III. 3 Fundamentos del cálculo inverso

El procedimiento de cálculo inverso es una forma “mecanicista” de analizar superficies deformadas provocadas por equipos de deflexión de pavimentos. Mediante este cálculo se hacen coincidir, con tolerancias razonables en sus márgenes de error, cuencas (o configuración) deflexiones calculadas y medidas, de esa manera se obtienen parámetros de enganche o clave, que no son otra cosa que los módulos de capa. El proceso de este cálculo inverso generalmente implica iteraciones, y se asocia a soluciones con programas de cómputo. Véanse las figuras III.1 y III.2

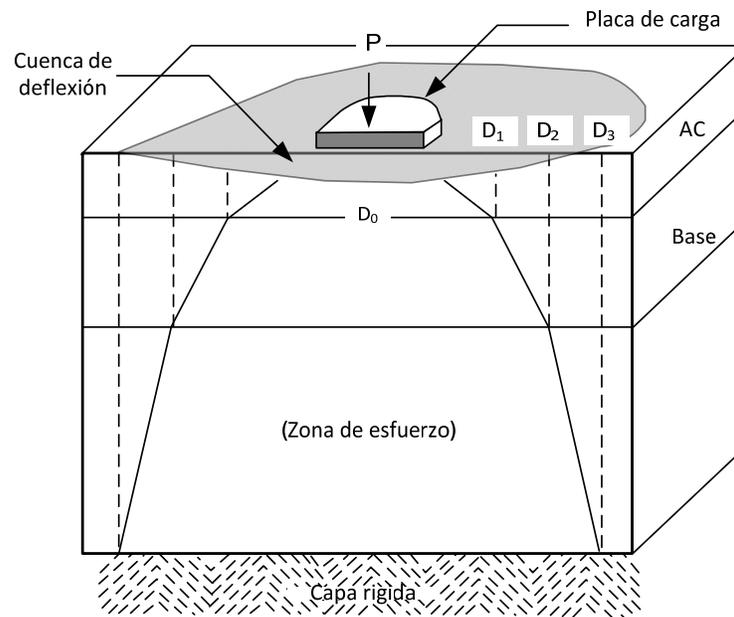


Fig. III.1 Esquema ilustrativo para el cálculo inverso de los módulos de resiliencia en capas

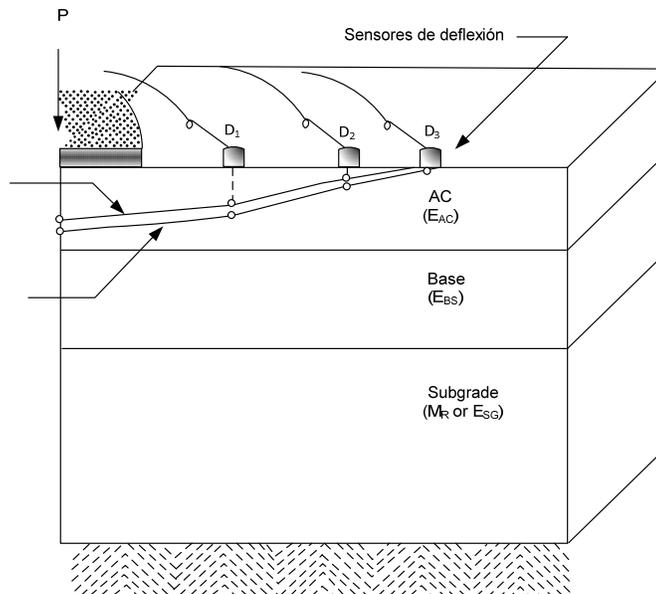


Fig. III.2 Proceso de cálculo inverso, la convergencia entre cuenca de deflexión medida y calculada

III.3.1 Secuencia de medición y cálculo

Un organigrama de acciones sería la siguiente (Ver Fig. III.3). Los elementos incluyen

a) Deflexiones medidas

Se incluyen todas las mediciones de deflexiones y las separaciones de los transductores respectivos, y la posición de cada uno de ellos respecto al punto de carga, en la superficie de rodamiento sujeta a analizar.

b) Cargas y espesores de las capas involucradas

Se incluyen todos los espesores de capa y niveles de carga para localizaciones específicas

c) Módulo de tanteo

Se propone un módulo elástico inicial, que sirva para refinarlo y hacer conciliar las condiciones especiales del problema. Con él se calculan las deflexiones superficiales iniciales. Se propone con base al juicio del analista, o a partir de ecuaciones de correlación, con base en otras propiedades de los suelos.

d) Cálculo de deflexiones

Se hacen los cálculos de las cuencas o de las elásticas de deformación superficial, mediante la ayuda de programas comerciales tales como CHEVRON, BISAR o ELSYM5.

e) Verificación de errores

Se comparan los módulos propuestos con los calculados. Se pueden hacer diferentes ajustes.

f) Buscar un módulo nuevo

Se pueden hacer varios cálculos con varios programas de cómputo para este propósito, de cálculo inverso, para hacer converger en diferentes módulos en cada una de las capas, hasta que se logre un error tolerable entre las elásticas deformadas (cuencas) calculadas y las propuesta, con base en iteraciones.

g) Control de márgenes de error (o de módulos)

En algunos programas se pueden establecer rangos de módulos máximos y mínimos; ello para evitar que los programas calculen módulos que no son muy razonables.

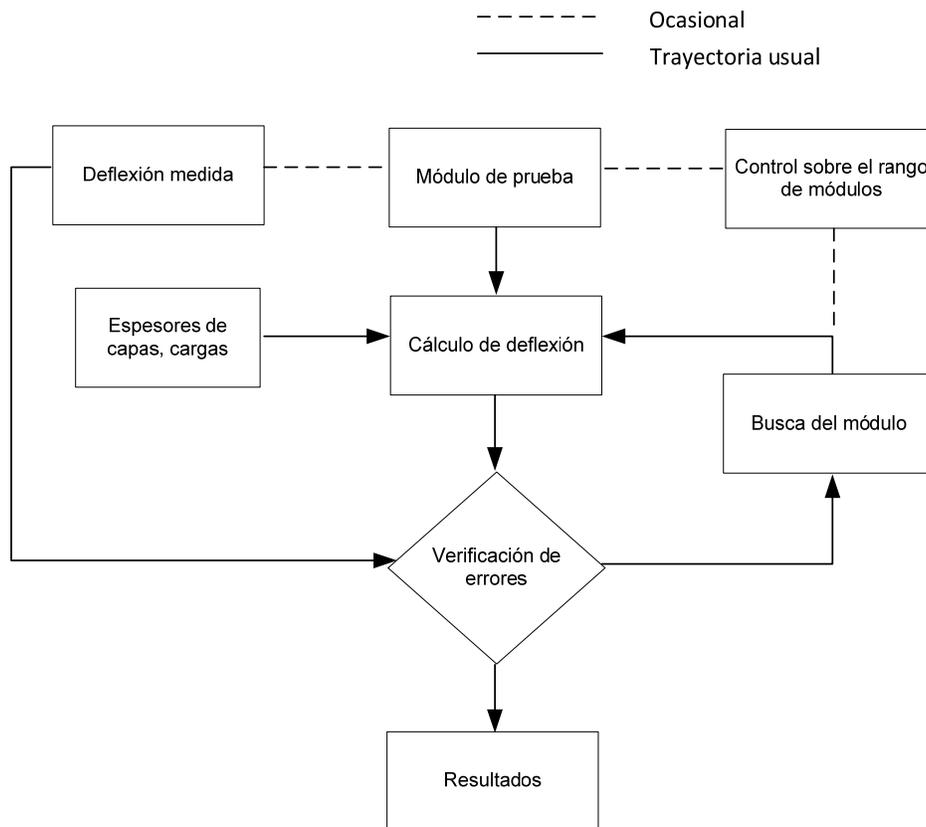


Fig. III.3 Elementos comunes en los programas para determinar el módulo mediante cálculo inverso

2.2 Medidas de convergencia

2.1.1 Medidas de la convergencia entre cuencas de deflexiones

Se utiliza la raíz cuadrada media (RCM) o el erro medio cuadrático, que se define como:

$$RCM = \sqrt{\frac{1}{n_{d_{i=1}}} \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \times 100$$

Ec. III.1

Donde:

RCM = Error en la media de la raíz cuadrada,
dci = Deflexión calculada en la superficie en el sensor i,
dmi = Deflexión medida en la superficie el sensor i, y
nd = número de sensores usados en el proceso de cálculo inverso

Ejemplo de cálculo;

Nd	Medida	Calculada
1 (0")	5.07	4.90
2 (8")	4.32	3.94
3 (12")	3.67	3.50
4 (18")	2.99	3.06
5 (24")	2.40	2.62
6 (36")	1.69	1.86
7 (60")	1.01	0.95

$$RCM (\%) = \frac{1}{7} \left(\frac{4.9 - 5.07}{1.01} \right)^2 + \dots \left(\frac{0.96 - 1.01}{1.01} \right)^2$$

RCM (%) = 6.9 % (valor considerado muy alto. Se considera adecuado entre 1 y 2 %)

Se han utilizado en la práctica muchos procedimientos para el cálculo inverso, sobre todo hay ligeras variaciones dependiendo del tipo de estructura de pavimento de que se trate. Sin embargo, para los pavimentos del tipo rígido se pueden asumir las siguientes actividades:

- Programas de cómputo para cálculos inverso y procedimientos analíticos con base en capas elásticas, como el caso de estructuras flexibles
- Cálculo inverso específicamente desarrollados para el caso de pavimentos rígidos, cuyos sistemas de cimentación son sólidos elásticos o bien mediante líquidos densos,
- Procedimientos con base al método del AREA
- Procedimientos de mejores ajustes (regresión estadística)

III.3.3 Profundidad del estrato rígido

Existen enfoques técnicos que tratan sobre la determinación de esta capa (Ver Refs. Rohde and Scullion y Hossain, A.S.M). Se puede mencionar el programa MODULUS 4.0, que es ampliamente usado para cálculo inverso de módulos elásticos.

a) En estos enfoque se acepta la premisa básica que las deformaciones en la superficie son el resultado de las deformaciones que experimentan los materiales dentro de la zona sujeta a esfuerzo. En otros términos, las deflexiones de materiales situados a cierta profundidad conocida respecto a los puntos de carga serán las responsables de lo que se manifieste en la superficie; solamente la porción del pavimento esforzado contribuye a las deformaciones. Además, no habrá deformaciones más allá de la zona compresible, esto es, la zona comprendida entre el punto de carga y una capa rígida, definida esta última como aquella que presenta una rigidez de 100 veces mayor a la del terreno natural. El método para obtener la profundidad de la capa rígida se fundamenta en la hipótesis de que la profundidad en donde no existe deformaciones- presumiblemente por la presencia de muy alta rigidez- se relaciona con aquella medida de profundidad, respecto a la superficie, en donde no se presente en esta última deflexiones por deformaciones en una capa a cierta profundidad. O sea la capa rígida representa deformación cero en la superficie. Ello se ilustra con la Fig. III.4. En ella la distancia D_c es la de deflexión cero,

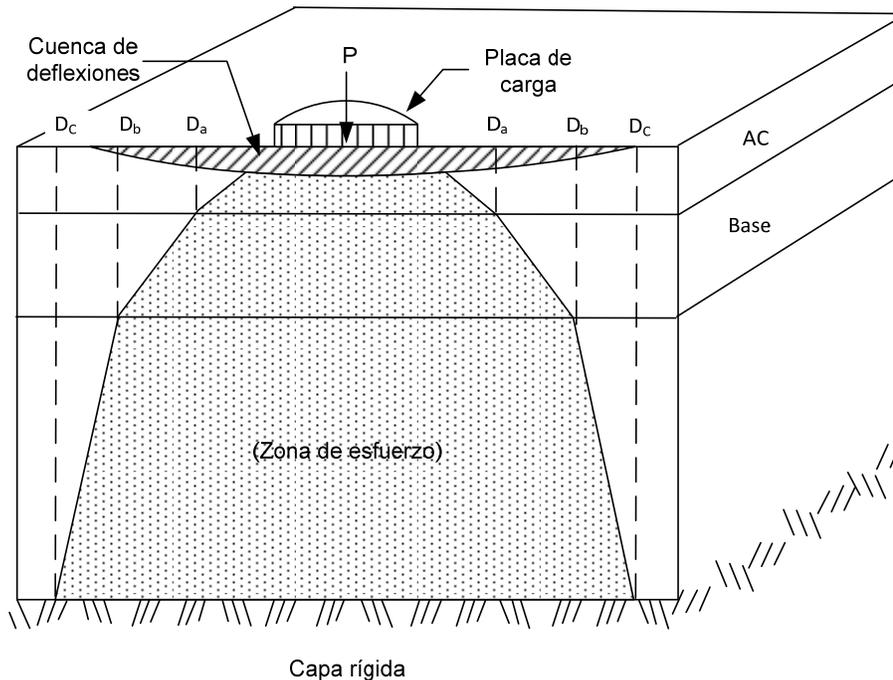


Fig. III.4 Croquis mostrando el concepto de deformación cero debido a una capa muy rígida

La profundidad para la condición deflexión igual a cero se puede obtener mediante la gráfica de deflexiones superficiales medidas y el recíproco de la distancia de cero deflexión ($1/r$). En la Fig. III. 5

se ilustra este concepto. En ella se aprecia que existe linealidad en la porción central de la curva, no así en los extremos, en donde el comportamiento no lineal se asocia al comportamiento de las capas superiores y del mismo terreno de apoyo. Conforme a esta figura, la profundidad de desplazamiento cero se obtiene extendiendo la parte lineal de la curva D vs $1/r$ hasta $D=0$; la intersección de $1/r$ con la abscisa se denomina r_0 . Existen demasiados factores o variables en el desempeño de una estructura de pavimento, de manera que no se puede inferir siempre la profundidad de la capa rígida a partir de r_0 . Se requieren otros factores, y varias ecuaciones del tipo regresión estadística, tales como las siguientes, derivadas de un programa de computadora (BISAR).

Carga = $P = 9,000$ lbs (40 kN) (Nivel de carga seleccionado) Ec. III.2

Relaciones entre módulos elásticos: $E_1 / E_{c.a} = 10, 30, 100$
 $E_2 / E_{c.a} = 0.30, 1.0, 3.0, 10.0$
 $E_{rígida} / E_{c.a} = 100$
 $E_{c.a}$ = módulo de la capa de apoyo o terreno

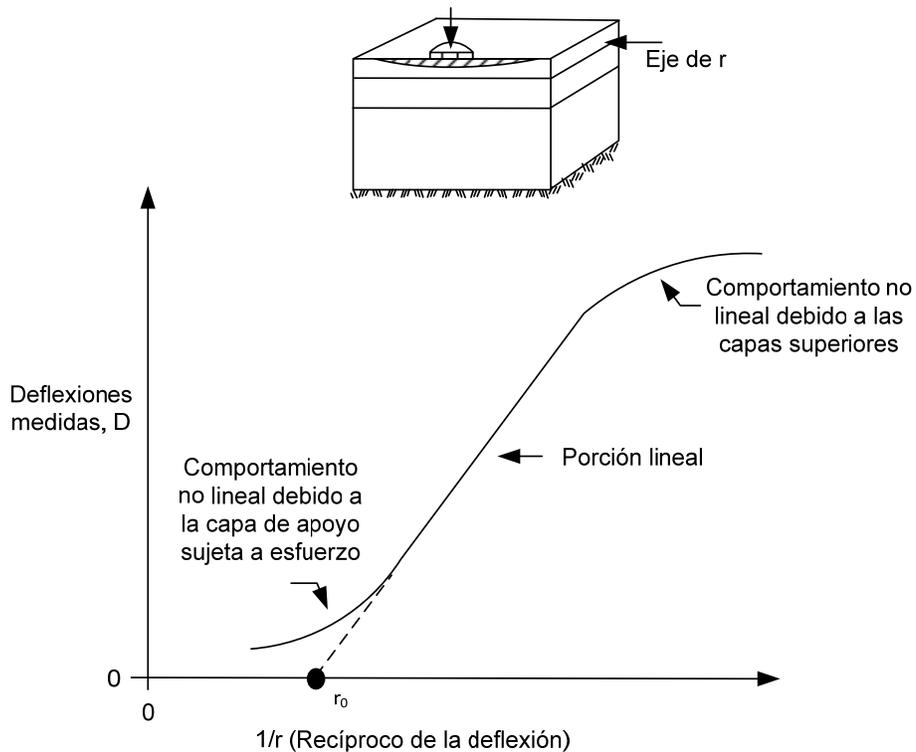


Fig. III.5 Gráfica de recíproco de la distancia de deflexión vs deflexiones medidas

Niveles de espesor:

$$T_1 = 2.5, 7.5, 12.5, 25 \text{ cm})$$

$$T_2 = 15, 25, 37.5 \text{ mm}$$

$$B = 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5, 9.0, 15.0 \text{ m})$$

Donde: E_i = modulo elástico de la capa "i" (o MR)

T_i = Espesor de la capa. "i"

B = Profundidad de la capa rígida, medida desde la superficie del pavimento (m).

En el inciso b) se muestran resultados de análisis de regresión

Para el caso de pavimentos asfálticos se desarrollaron cuatro ecuaciones separadas. La variable dependiente es $1/B$ y la variable independiente es r_0 (así como sus potencias) y varias formas de cuencas de deflexión, tales como SCI, ICB y IDB. Ver la III.1 para algunas definiciones.

Tabla III.1: Resumen de parámetros derivados de una cuenca de deformaciones (Ref. 1)

Parámetro	Fórmula	Equipo de medición
Deflexión máxima	d_0	Viga Benkelman, deflectómetro Lacroix, FWD
Radio de curvatura	$R = \frac{r^2}{2 D_0 \left(\frac{D_0}{Dr} - 1 \right)}$	Medidor de Curvaturas
Extensión	$S = \left(\frac{[(D_0 + D_1 + D_2 + D_3)/5] 100}{D_0} \right)$	Dynalect
AREA	$A = 6[1 + 2(D_1/D_2) + 2(D_2/D_0) + (D_3/D_0)]$ 0, 1, 2, 3 en pies	FWD
Factores de forma	$F1 = (D_0 - D_2) / D_1$ $F2 = (D_1 - D_3) / D_2$	FDW
Índice de curvatura superficial	$ICS = D_0 - Dr$ Donde $r = 30.5 \text{ cm}$ o $r = 51 \text{ cm}$	Viga Benkelman, Calificador vial, FWD
Índice de curvatura de la base	$ICB = D_{24}'' - D_{36}''$	Calificador vial
Índice de daño en la base	$ICD = D_{12}'' - D_{24}''$	Calificador vial
Relación de deflexiones	$Qr = Dr / D_0$ Donde $Dr = D_0/2$	FWD
Índice de flexión	$IF = D/a$ Donde a = cuenca de deflexiones	Viga Benkelman
Pendiente de deflexiones	$PD = \tan^{-1} (D_0 - Dr)/r$ Donde $r = 61 \text{ cm}$ (24 pulgadas)	Viga Benkelman

Otras relaciones de interés

AREA normalizada = $150 (1 + 2 D_1 / D_o + 2 D_2 / D_o + D_3 / D_o)$ en unidades métricas, mm

Varía entre 280 mm y 915 mm, para pavimentos débiles y rígidos, respectivamente, para estructuras de sección completa

Do: para pavimentos flexibles varía entre 76 a 1.778 micras

Factor de forma: $D_1 = D_3$ (el pavimento flexible es muy resistente); $F_2 = 0$.

$D_3 \ll D_1$ (pavimento débil); $F_2 > 1$

Índice de curvatura superficial: indicador de la rigidez relativa de las capas superiores del pavimento

Si: $D_o = D_r$ (pavimento resistente), $ICS = 0$

$D_r \ll D_o$ (pavimento débil); $ICS > D_o$

Relación de deflexiones: Cuando $D_r = D_o$ (Pavimento resistente); $Q_r = 1$

$D_r < D_o$ (Pavimento débil); $D_o > 0$

D_r, D_2, D_3 : deflexiones a 0.305 m, 0.61 m, y a 0.914 m (distancias contadas a partir del punto de impacto)

El AREA normalizada representa la mitad de una sección de la cuenca comprendida entre el eje que pasa por el punto de impacto y una línea vertical virtual que pasa a 0.914 m de tal punto, más o menos en el sensor D_3 .

Estos parámetros se asocian a los siguientes cuatro temas

- 1) La deflexión en la placa de carga realmente representa la deflexión total. De hecho fue la primera opción para diseñar las sobrecarpetas asfálticas, derivados de mediciones con viga Benkelman.
- 2) Las pendientes en las curvaturas cerca del punto de aplicación de las cargas, como el radio de curvatura, R, así como el factor de forma, F_1 y el Índice de curvatura superficial, ICS, representan a la rigidez de las capas superiores o de la misma capa de rodamiento.
- 3) Las diferencias de deflexiones, o pendientes en la mitad de la cuenca en el rango de 29.97 cm (12.8 pulgadas) a 89.92 cm (35.4 pulgadas) contada a partir del punto de carga. Estos parámetros tienden a representar a las rigideces en las capas base y hacia abajo en las secciones de pavimento.
- 4) Deflexiones al final de la cuenca. En esta zona las deflexiones representan a las rigideces del terreno de apoyo.

Y retomando la discusión iniciada en este inciso, las ecuaciones particulares para estructuras flexible, en particular para carpetas de diferente espesor, son:

b.1 Para carpetas asfálticas menores a 5 cm

$$1/B = 0.0362 - 0.3242 r_o + 10.2717 r_o^2 - 23.6609 r_o^3 - 0.0037 \text{ ICB} \quad \text{Ec.III.3}$$

$$R^2 = 0.98 \text{ (factor de correlación)} \quad \text{Ec. III.4}$$

b.2 Para carpetas asfálticas de 5 cm a 10 cm

$$1/B = 0.0065 + 0.1652 r_o^2 - 11.0026 r_o^3 - 0.0004 \text{ ICB} \quad \text{Ec. III.5}$$

$$R^2 = 0.98 \text{ (factor de correlación)}$$

b.3 Para carpetas asfálticas de 10 cm a 15 cm

$$1/B = 0.0413 + 0.9929 r_o - 0.0012 \text{ ICS} + 0.0063 \text{ IDB} - 0.0778 \text{ ICB} \quad \text{Ec. III.6}$$

$$R^2 = 0.94 \text{ (factor de correlación)}$$

b.4 Para carpetas asfálticas de 15 cm o mayores

$$1/B = 0.0409 + 0.5669 r_o + 3.0137 r_o^2 + 0.0033 \text{ ICB} - 0.0665 \text{ Log ICB} \quad \text{Ec.III.7}$$

$$R^2 = 0.97 \text{ (factor de correlación)}$$

Donde:

$R_o = 1/r$ (intersección (Extrapolación en la parte más inclinada de la gráfica $1/r$ vs D , en $1/\text{pies}$)

$\text{ICS} = D_o - D_{12}$ ($D_o - D_{305}$ mm). Índice de curvatura superficial

$\text{ICB} = D_{12} - D_{24}$ ($D_{305} - D_{610}$ mm). Índice de daño en la capa base

$\text{ICB} = D_{24} - D_{36}$ ($D_{610} - D_{914}$ mm). Índice de curvatura de la base

D_i = deflexiones en la superficie (milésimas de pulgadas) normalizada para una carga de 9,000 libras (40 KN), referidas a distancias "i" en pies o metros.

III.4 Valores iniciales y rangos de módulos

Los procesos de cálculo inverso se pueden hacer mediante el empleo de procedimientos basados en capas elásticas. Se usan para las dos opciones de pavimento, rígida o flexible.

La técnica de dicho cálculo también puede emplear otros tipos de cimentación, como las de líquido denso, LD, o bien los de elásticos sólidos, ES. Estas dos opciones aplican sobre todo en pavimentos rígidos.

Cada una de las capas que constituyen la estructura del pavimento puede presentar un valor de inicio del módulo. Incluyendo la capa de cimentación o terreno natural.

III.4.1. Valor inicial de modulo para carpeta asfáltica

Una de las formas más sencillas y aceptadas para proponer un primer valor de tanteo sería mediante una relación entre módulos y temperaturas, siempre que se conozca esta última al momento del ensaye. Ver Fig. III.6.

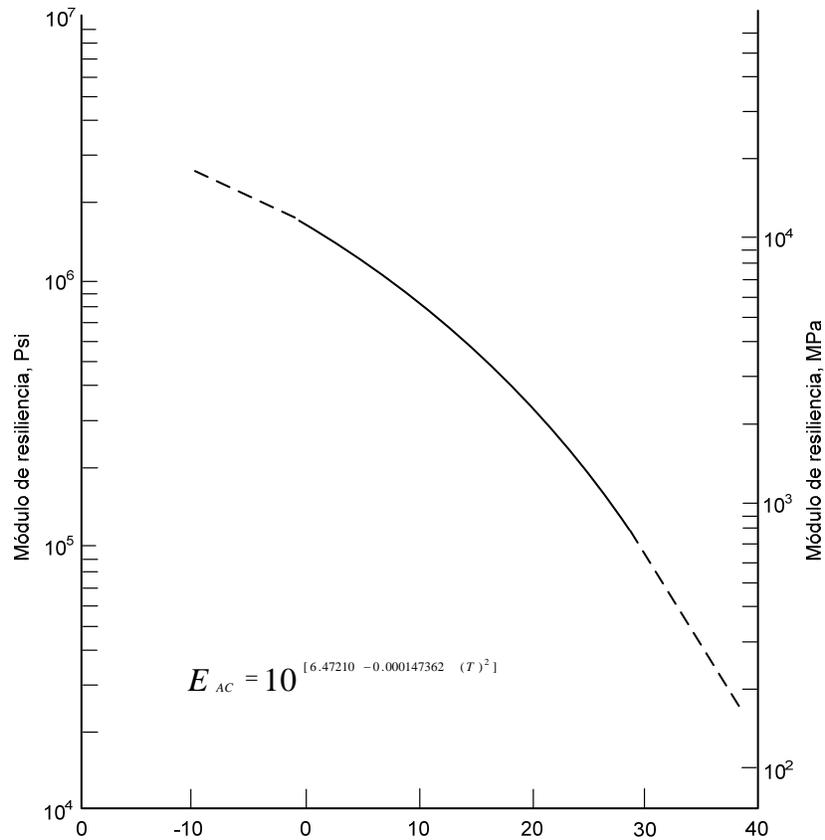


Figura III.6 Relación entre la temperatura – rigidez para algunos tipos de carpetas asfálticas densas.

Estos valores se basan en resultados de laboratorio del MR, para cargas de pulso = 100 msec.

Para superficie poco fatigadas (fisuras muy delgadas en la trayectoria de viaje), es común que se midan módulos en el rango de 700 a 1,400 MPa

III.4.2 Caso de bases y subbases

Tipo de material	Módulo inicial, MPa	Rango de valores del Módulo, MPa
Roca triturada o bases de grava	240	70 - 7,000
Roca triturada, o subbases de grava	210	70 - 700
Bases arenosas	140	25 - 550

Subbases arenosas	100	35 - 550
-------------------	-----	----------

Caso de bases y subbases estabilizadas

Tipo de Material	Resistencia no confinada (MPa)	Módulo inicial	Rango de módulos de resiliencia
Estabilizada con cal	< 1.7	200	35 a 690
	1.7 a 3.4	340	100 a 1,000
	> 3.4	480	140 a 1,400
Estabilizada con cemento	< 5.2	2,800	700 a 10,000
	5.2 a 8.6	7,000	1,400 a 20,000
	> 8.6	10,000	2,000 a 28,000

III.5 Módulo resiliente en el terreno de apoyo

Por tratarse de una evaluación del terreno en primer lugar, se ha privilegiado la caracterización del suelo de apoyo. En segundo orden de importancia se tratan los materiales de transición.

El modulo resiliente se puede medir mediante:

- Pruebas no destructivas y de cálculo inverso
- Ensayes de laboratorio
- Otras fuentes, incluyendo correlaciones, atendiendo al tipo de suelos

La primera opción sería mediante la técnica de deflectómetros de impacto (FWD por sus siglas en inglés). Este dispositivo se menciona en el capítulo II y su descripción detallada se puede consultar en otras fuentes, pues su uso ya es muy generalizado.

Cuando se disponga de mediciones de deflectómetro de impacto, será deseable utilizar deflexiones medidas en la superficie, y usar ecuaciones como las siguientes (Ref. 2)

$$M_R = \frac{P(1 - \mu^2)}{P r (dr)}$$

Ec. III.8

Si $\mu = 0.5$, la ecuación 8 se reduce a:

$$M_R = \frac{0.24 P}{r (dr)}$$

Ec. III.9

Donde:

MR = Módulo elástico de la capa de apoyo, kg/ cm² (psi),

P = carga, kg (lbs),

r = distancia radial desde el centro de la placa de carga, cm, (pulgadas) y

dr = deflexión en el pavimento a una distancia “r” desde la placa de carga, cm (pulgadas).

En la tabla III.2 se presentan algunos valores sugeridos para algunos tipos de suelos. Estos valores son únicamente una guía. También se presenta una discusión para cómo obtener los módulos de deformación Es (o el resiliente, MR):

Tabla No III.2: Módulos de resiliencia para algunos suelos (Ref. 2)

Material	Condición climática			
	Seco, psi (MPa)	Húmedo, sin congelamiento psi (MPa)	Húmedo y congelamiento	
			Sin congelamiento, psi (MPa)	Congelamiento, psi (MPa)
Arcilla	15,000 (103)	6,000 (41)	6,000 (41)	50,000 (345)
Limo	15,000 (103)	10,000 (69)	5,000 (34)	50,000 (345)
Arena arcillosa o limosa	20,000 (138)	10,000 (69)	5,000 (34)	50,000 (345)
Arena	25,000 (172)	25,000 (172)	25,000 (172)	50,000 (345)
Grava limosa o arcillosa	40,000 (276)	30,000 (207)	20,000 (138)	50,000 (345)
Grava	50,000 (345)	50,000 (345)	40,000 (276)	50,000 (345)

Existen varias ecuaciones de regresión para predecir los valores de MR de la capa de apoyo a partir de deflexiones medidas en distancias respecto al punto de aplicación de la carga en el rango de 60 cm a 120 cm. La Ref. 3 (Newcomb, D. E., 1986) propone algunas ecuaciones, orientadas en este caso para el desarrollo de un método mecanicista para el diseño de sobrecarpetas asfálticas. Para el caso de dos capas, el módulo de resiliencia de la capa de apoyo se puede estimar como:

$$M_{RSG} = -466 + 0.00762 (P/D3)$$

Ec. III.10

$$M_{RSG} = -198 + 0.00577 (P/D4)$$

Ec. III.11

$$M_{RSG} = -371 + 0.00671 (2P/(D3 + D4)) \quad \text{Ec. III.12}$$

Para el caso de tres capas:

$$M_{RSG} = -530 + 0.00877 (P/D3) \quad \text{Ec. III.13}$$

$$M_{RSG} = -111 + 0.00577 (P/D4) \quad \text{Ec. III.14}$$

$$M_{RSG} = -346 + 0.00676 (2P/(D3 + D4)) \quad \text{Ec. III.15}$$

Para el desarrollo de estas ecuaciones se empleo el programa de cómputo para cálculo inverso (ELSYM5 y se hizo variar el nivel de carga entre 22, 44 y 67 KN, para valores establecidos de espesores de carpeta asfáltica y capa granular, valores de módulos elásticos para estas capas, así como para la capa de terreno natural. En estas capas se utilizaron los mismos valores de módulos, para dos y tres capas.

En estos análisis se pueden definir ecuaciones de regresión para definir los módulos elásticos para capas de rodamiento, en este caso, de carpeta asfáltica. Es decir, las ecuaciones pueden servir para definir los módulos elásticos para cada una de las capas principales de un pavimento, derivadas de una medición directa, In Situ y con técnicas no destructivas, mediante deflectómetros de impacto, por ejemplo.

Finalmente, debe mencionarse que el cálculo inverso debe siempre mejorarse. Por ejemplo, en el caso de pavimentos rígidos el proceso se ve fuertemente influenciado por la configuración de sensores, capas de base, espaciamiento de juntas y condiciones de temperatura.

III.6 Relación de Poisson supuestas de inicio

Por tener interés al momento de evaluar los materiales in Situ, se presentan a continuación rangos típicos para alimentar a un programa de cálculo inverso:

Tabla No III.2^a : Relación de Poisson para algunos suelos (Ref. 2)

Tipo de material	Tipo	Relación de Poisson
Concreto asfáltico		0.35
Concreto de cemento Portland		0.15- 0.20
Base o subbase	Estabilizada	0.25 - 0.35
	No estabilizada	0.35
Suelo de terreno natural	Suelos finos (cohesivos)	0.45
	Suelos gruesos (Menos cohesivos)	0.35 - 0.40
Capa rígida		< 0.35

En el Anexo A se presentan resultados de análisis multicapas elásticas y en el B se presentan algunos ejemplos de análisis de cálculo inverso.

REFERENCIAS

1. Southgate, H. F., and Deen, R. C., "*Temperature Distributions in Asphalt Concrete Pavements*", Highway Research Record No. 549, Highway Research Board, Washington, D.C., 1975, pp. 39-46.
2. Darter, M.I., Elliott, R.P., and Hall, K.T., "*Revision of AASHTO Pavement Overlay Design Procedure*," Project 20-7/39, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., September 1991
3. Newcomb, D. E., "*Development and Evaluation of Regression Method to Interpret Dynamic Pavement Deflections*," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, 1986.

Capítulo IV

Algoritmos aplicables en el cálculo inverso

CAPÍTULO IV

Algoritmos aplicables en el cálculo inverso

IV.1 Introducción

En este capítulo se presentan criterios más actualizados y que intentan tomar en cuenta otros aspectos, tales como el tipo de suelo de apoyo, forma de distribución de esfuerzos al ser solicitados por cargas y efectos de deformación y plasticidad.

Recientemente se han venido utilizando formas más sofisticadas e integrales para abordar la caracterización de los suelos de apoyo y las mismas capas de transición de un pavimento. Ello para tomar en cuenta el cambio de esfuerzos generados por las cargas de tránsito y cambios en las condiciones geotécnicas del sitio.

IV.2 Caso de líquido denso

Existen dos formas básicas para evaluar los módulos en forma inversa, con base en la solución clásica de Westergaard para una carga interior de una placa compuesta de material elástico, isótropo y homogéneo que descansa sobre una cimentación simulando un líquido denso.

a) El método del mejor ajuste. Trata de ajustar y hacer converger las deflexiones medidas con las pronosticadas para un sensor dado, basándose en la teoría de placas, usando y combinando el radio de rigidez relativa, i , y el módulo de reacción, k .

b) Método del AREA. Se introdujo en el método AASHTO 1993, y en este concepto se estima el radio de rigidez relativa, l , como una función directa del AREA de la cuenca de deformaciones. La estimación se hace con las fórmulas relativamente sencillas de Westergaard. Al estimar "l" se hace una estimación también de "k" y el módulo elástico de una losa (caso de pavimentos rígidos).

Así, si se tiene una carga uniformemente repartida actuando en una placa circular de radio "a" la distribución de deflexiones, $w(r)$ se puede escribir como:

$$w(r) = \frac{p}{k} f(r, l) \quad \text{Ec. IV.1}$$

$$f(r) = 1 - C_1(a_l)ber(s) - C_2(a_l)bei(s) \quad \text{Para } 0 < r < a \quad \text{Ec. IV.2}$$

$$f(r) = C_3(a_l)ker(s)C_4(a_l)kei(s) \quad \text{Para } r > a \quad \text{Ec. IV.3}$$

$a_l = (a/l)$

= radio adimensional de la carga aplicada

r = distancia radial medida desde el centro de la carga

$s = (r/l)$
 = distancia radial normalizada
 $l = (D/k)^{1/4}$
 = radio de rigidez relativa del sistema de carga- superficie de apoyo para la cimentación de líquido denso
 $D = Eh^3/12(1-\mu^2)$
 = rigidez a la flexión de la placa
 $E =$ modulo elástico de la placa
 $\mu =$ relación de Poisson de la placa
 $h =$ espesor de la placa
 $k =$ módulo de reacción del sistema de apoyo
 $p =$ intensidad de presión (carga) = $P/(\pi a^2)$
 $P =$ carga total aplicada (concentrada)

En las ecuaciones anteriores ber , bei , ker , y kei son funciones Kelvin Bessel que se pueden solucionar mediante series que se encuentran disponibles en la literatura Ref. 9).

Para las constantes C_1 y C_4 se han propuesto formas razonables (ver por ejemplo Ref. 10, Korenev) que sugieren que dichas constantes tienen los valores siguientes, para cualquier radio de carga:

$$C_1 = -a_\lambda ker' a_\lambda \quad \text{Ec. IV.4}$$

$$C_2 = a_\lambda kei' a_\lambda \quad \text{Ec. IV.5}$$

$$C_3 = -a_\lambda ber' a_\lambda \quad \text{Ec. IV.6}$$

$$C_4 = -a_\lambda bei' a_\lambda \quad \text{Ec. IV.7}$$

Donde:

ker' , kei' , ber' , y bei' = son las primeras derivadas de ker , kei , ber , and bei , respectivamente

a.1) Algoritmo para el método del Mejor Ajuste

Básicamente se trata de buscar la combinación del módulo de reacción del terreno y del módulo elástico de la losa para la cual las deflexiones calculadas se asemejen con las medidas en las cuencas -de campo-. De esta manera, se busca minimizar el error involucrado, el cual se estima mediante:

$$F(E, k) = \sum_{i=0}^n \alpha_i (w(r_i) - W_i)^2 \quad \text{Ec. IV.8}$$

Donde:

$\alpha_i =$ factor correctivo (1, o $(1/W_i)^2$ o cualquier otro número

$w(r_i) =$ deflexión calculada

$W_i =$ es la deflexión medida

El valor α_i da cierta flexibilidad al proceso de mejor ajuste, en cuanto a al peso que se le da a ciertas deflexiones medidas.

El factor de error se puede escribir, usando la Ec. 1, de la forma siguiente:

$$F(E, k) \equiv F(l, k) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \left(\frac{p}{k} f_i(l) - W_i \right)^2$$

Ec. IV.9

Para obtener un valor mínimo de la función de error, F, se deben cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{\partial F}{\partial k} = 0$$

Ec. IV.10

$$\frac{\partial F}{\partial l} = 0$$

Ec. IV.11

El valor de k se puede obtener sustituyendo la función de error dentro de la primera condición:

$$k = p \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i (f_i(l_k))^2}{\sum_{i=0}^n \alpha_i W_i f_i(l_k)}$$

Ec. IV.12

A su vez, el radio de rigidez relativa se puede estimar sustituyendo la función de error dentro de la segunda condición:

$$\frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i f_i(l_k) \hat{f}_i(l_k)}{\sum_{i=0}^n \alpha_i (f_i(l_k))^2} = \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i W_i \hat{f}_i(l_k)}{\sum_{i=0}^n \alpha_i W_i f_i(l_k)}$$

Ec. IV.13

La principal ventaja de este método, el del mejor ajuste, es que hace converger muy bien las deflexiones medidas con las previstas, para cualquier configuración de sensores. La Ec. Por ejemplo se resuelve de forma muy sencilla con programas de cómputo.

De acuerdo al método del mejor ajuste, la determinación del k del sistema de apoyo en forma de cálculo inverso, se hace lo siguiente:

1. Se asigna un factor correctivo o de peso, conforme la Ec. IV.8 (puede ser 0 o 1) dependiendo si se utiliza algún sensor para el cálculo inverso.
2. Se determina el radio de rigidez relativa que satisfaga "i", conforme a la Ec. IV.13.
3. Se determina el valor de k, usando la Ec. IV.12

Una vez conociendo k y lk, se puede determinar el valor del módulo elástico de la placa de rodamiento, EPL, conforme a la ecuación siguiente:

$$E_{PL} = \frac{12(1 - \mu_{PL}^2) l^4 k}{h_{PL}^3}$$

Ec. IV.14

Aquí:

hPL = espesor de la placa (losa)
 k = valor de "k" del sistema de apoyo
 μPL = relación de Poisson de la losa (De concreto hidráulico, en este caso)

b) Algoritmo usando el método AREA

Para el caso de pavimentos flexible, se han hecho propuestas para interpretar el efecto de la configuración de la cuenca de deformaciones, mediante la introducción de un parámetro conocido como AREA. (Ref. 11, Hoffman, 1981.). Dicho parámetro se define como:

$$AREA = \frac{1}{2wW_o} \left[W_o r_1 + \left(\sum_{i=1}^{n-1} W_i (r_{i+1} - r_i) \right) + W_n (r_n - r_{n-1}) \right]$$

Ec. IV.15

Wi = deflexiones medidas (i = 0, n)
 n = número de sensores en el FWD, menos uno
 ri = distancias individuales entre el punto de carga del FWD a cada uno de los sensores

El parámetro AREA tiene dimensiones de longitud o de desplazamiento, no de área, ya que es una medida normalizada respecto al desplazamiento del punto de carga, justamente para remover el efecto de la magnitud de esta última. De forma convencional se puede determinar el AREA usando la regla trapezoidal para cualquier configuración de sensores.

El método del AREA se puede considerar en las tres formas conocidas:

Configuración utilizada por la SHRP (0, 203, 305, 457, 610, 914, y 1524 mm)

$$A7 = 4 + 6 \left(\frac{d_8}{d_0} \right) + 5 \left(\frac{d_{12}}{d_8} \right) + 6 \left(\frac{d_{18}}{d_0} \right) + 9 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + 18 \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) + 12 \left(\frac{d_{60}}{d_0} \right)$$

Ec. IV.16

Donde:

A7 = parámetro AREA para sensores a 0, 203, 305, 457, 610, 914, y 1524 mm

Método A5 de la SHRP: configuración externa (localizados a 305, 457, 610, 914, and 1524 mm):

$$A5 = 3 + 6 \left(\frac{d_{18}}{d_{12}} \right) + 9 \left(\frac{d_{24}}{d_{12}} \right) + 18 \left(\frac{d_{36}}{d_{12}} \right) + 12 \left(\frac{d_{60}}{d_{12}} \right)$$

Ec. IV.17

Aquí A₅ = parámetro AREA para los sensores a 305, 457, 610, 914, y 1524 mm

Método A₄ de la AASHTO: configuración de sensores a 0, 0.305, 610, y 914 mm:

$$A4 = 6 + 12 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 12 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + 6 \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right)$$

Ec. IV.18

Donde A₄ = parámetro AREA para sensores a 0, 305, 610, and 914 mm

Método A₃ de la AASHTO: configuración de sensores a 0.305, 610, y 914 mm:

$$A3 = 6 + 12 \left(\frac{d_{24}}{d_{12}} \right) + 6 \left(\frac{d_{36}}{d_{12}} \right)$$

Ec. IV.19

Donde A₃ = parámetro AREA para sensores a 305, 610, and 914 mm

Se recomienda usar los modelos A₄ y A₇ para cálculo inverso en pavimentos rígidos, mientras que los del tipo A₃ y A₅ se pueden emplear para pavimentos compuestos.

Comparativa entre los dos métodos

Tabla IV.1: Configuración de sensores y su denominación

No de configuración	Procedimiento	Posición de sensores
B7	Mejor ajuste	0.203, 305, 457, 610, 914, y 1524
B4	Mejor ajuste	0. 305, 610, y 914
A7	AREA	0, 203, 305, 457, 610, 914, y 1524
A4	AREA	0, 305, 610, y 914

La mejor correlación entre resultados de "k" se obtiene en las configuraciones A7 y B4. Diversos

A pesar de que se usa la teoría de placas en ambas determinaciones, en las diferentes configuraciones de sensores se obtienen ligeras discrepancias. Quizás se deban a las hipótesis involucradas, de que no se presenta compresión en la capa superior, y que todas las deflexiones se deben a la capa de terreno natural y a la flexión de la placa superior. Se determinó que las mayores discrepancias se presentan cuando se involucran en los análisis las deflexiones máximas, D₀. En este caso la deflexión pronosticada de la placa se desvía de la teoría elástica.

De cualquier manera, definida la configuración de los sensores, el radio de rigidez relativa se puede definir mediante la ecuación IV.20 siguiente, usando también los coeficientes asociados que se presentan en la tabla IV.2:

$$l = \left[\frac{\ln \left(\frac{X_1 - AREA}{X_2} \right)}{X_3} \right]^{X_4}$$

Ec. IV.20

Tabla IV.2: Coeficientes para la ecuación del parámetro AREA vs l

AREA	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
A7	60	289.708	-0.698	2.566

A5	48	158.40	-0.476	2.220
A4	36	1812.279	-2.559	4.387
A3	24	662.272	-2.122	4.001

Una vez que se conozca el radio de rigidez relativa, se puede estimar el valor del “K” dinámico a partir de la deflexión medida a una distancia d_r usando la ecuación IV.21:

$$k = \frac{P d_r^*}{d_r \ell^2}$$

Ec. IV.21

Donde P = Magnitud de carga

d_r = Deflexión medida a una distancia radial r

d_r^* = Coeficiente adimensional de deflexión para una distancia r

$$d_r^* = a e^{-b e^{-c \ell}}$$

Ec. IV.22

Tabla IV.3: Coeficiente para coeficientes de deflexión adimensionales (Ref. 14)

Distancia radial (cm)	a	b	c
0	0.12450	0.14707	0.07565
15	0.12323	0.46911	0.07209
30	0.12188	0.79432	0.07074
45	0.11933	1.38363	0.06909
60	0.11634	2.06115	0.06775
91	0.10960	3.62187	0.06568
158	0.09521	7.41241	0.06255

Estas ecuaciones son válidas para placas de carga cuyo radio sean de 15 cm (5.9 pulgadas). Para estimar “I” (radio de rigidez relativa) se deben emplear los coeficientes para la deflexión que se usa para determinar la ecuación de la AREA normalizada. O sea, do para A/ y A4, y d12 para A5 y A3.

La ventaja de usar el criterio de AREA es su sencillez para su empleo. Las desventajas de este algoritmo es que son muy sensibles a la deflexión normalizada do y d12. También se hace la hipótesis de que la losa y el terreno de apoyo es infinito en la dirección horizontal como una placa sencilla.

IV.3 Caso de sólido elástico

IV.3.1 Método del mejor ajuste

Para el estudio de una cimentación del tipo de sólido elástico (tipo Boussinesq) se puede usar el criterio de Losberg para placas apoyadas en una placa sobre un sólido elástico. La distribución de

deflexiones $w(r)$ de una placa de radio a , cuando se sujeta a una carga uniforme se puede expresar como:

$$w(r) = \frac{p}{E_s} f(r)$$

Ec. IV.23

Donde:

$$f(r) = 2a(1 - \mu_s^2) \int_0^\infty \frac{J_0(\alpha r) J_1(\alpha a)}{\alpha(1 + \alpha^3 l_e^3)} d\alpha$$

Ec IV.24

Aquí:

a = radio del área cargada

p = presión aplicada

r = distancia radial medida a partir del punto de carga

$l_e = (D/C)^{1/3}$

= relación entre la rigidez relativa de la placa - modulo de reacción del sistema de cimentación del líquido denso

$D = Eh^3/12(1 - \mu_s^2)$

$C = E_s/(1 - \mu_s^2)$

E_s = modulo de elasticidad del terreno o apoyo

μ_s = relación de Poisson de la capa de apoyo (suelo)

J_0 = función de Bessel de orden cero

J_1 = función de Bessel de primer orden

De la Ec. IV.8 y usando la ecuación IV.23, la función de error es ahora:

$$F(E, E_s) \equiv F(E, E_s) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \left(\frac{p}{E_s} f_i(l_e) - W_i \right)^2$$

Ec. IV.25

Para el error mínimo se debe cumplir que:

$$\frac{\partial F}{\partial E_s} = 0$$

Ec. IV.26

$$\frac{\partial F}{\partial l_e} = 0$$

Ec. IV.27

Ahora, sustituyendo la Ec. De error dentro de la primera condición para obtener el módulo de elasticidad del terreno:

$$E_s = p \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i (f_i(l_e))^2}{\sum_{i=0}^n \alpha_i W_i f_i(l_e)}$$

Ec. IV.28

Ahora, si se introduce la Ec. De error dentro de la segunda condición, se obtiene el radio de rigidez relativa:

$$\frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i f_i(l_e) \dot{f}_i(l_e)}{\sum_{i=0}^n \alpha_i (f_i(l_e))^2} = \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i W_i \dot{f}_i(l_e)}{\sum_{i=0}^n \alpha_i W_i f_i(l_e)}$$

Ec. IV.29

Siguiendo el mismo procedimiento e hipótesis como para el caso de cimentación en líquido denso, y empleando los valores ya determinados de l_e y de k se puede determinar el módulo elástico de la losa, E_{PCC} (de la losa de concreto hidráulico):

$$E_{PCC} = \frac{6(1 - \mu_{PCC}^2) l_e^3 E_s}{h_{PCC}^3 (1 - \mu_s^2)}$$

Ec. IV.30

Donde:

h_{PCC} = espesor de losa

E_s = módulo de elasticidad del terreno

μ_s = relación de Poisson del terreno o sistema de apoyo

μ_{PCC} = relación de Poisson de la losa de concreto (caso de pavimentos rígidos)

Finalmente, para un adecuado cálculo inverso en las diferentes estructuras de los pavimentos se debe considerar, desde luego, la estructuración de cada uno de ellos. En efecto, tanto para los del tipo flexible como para los del tipo rígido se deben considerar que las estructuras de rodamiento no están apoyadas directamente sobre el terreno natural. Por ello, se deben estudiar los efectos rigidizantes de las capas de transición. Estas últimas a veces modifican las respuestas elásticas de manera sustantiva.

Para el caso de los pavimentos rígidos se debe considerar:

- 1) Efecto de las capas bases: Dependiendo de si existe o no adhesión en su interfaz con la losa de rodamiento será el nivel de esfuerzos, y por ende la afectación de los módulos elásticos, de rigidez y de resiliencia. Existen soluciones para determinar cálculos inversos en los casos de adhesión completa en la interfaz, y para el caso opuesto, cuando no haya nada de restricciones entre la losa y el sistema de apoyo.
- 2) Efectos de la relación de módulos capa de rodamiento/ base. Al inicio del proceso de cálculo inverso se debe proponer una relación de módulos, a manera de procedimiento de prueba y

error. Esta propuesta debe ser a juicio del analista, y cuando es un valor razonable no habrá cambios sustantivos en la determinación del módulo elástico de la capa de rodamiento.

- 3) Efecto de la configuración de sensores: los valores de módulos elásticos presentan mayor congruencia o mejor correlación para ciertos arreglos de sensores, sobre todo en el método del mejor ajuste, que es ligeramente mejor que el propuesto por la AASHTO. La correlación más confiable es la que corresponde, como ya se mencionó, a los arreglos de sensores k_{B7} y K_{B4} , y se relacionan como:

$$k_{B7} = 0.864 k_{B4}$$

Ec.IV.31

- 4) Efecto del tamaño de las losas (caso de pavimentos rígidos)

Las consideraciones discutidas hasta aquí consideran la solución de Westergaard o de Losberg para cargas interiores en placas infinitas. Se deben hacer correcciones para el caso de pavimentos rígidos reales, pues sus modulaciones son finitas. Algunos investigadores han propuesto una corrección para losas cuadradas (Crovetti, programa ILLI-Slab) :

- 5) Se estima el valor $lest$ a partir del procedimiento de cálculo inverso para una losa infinita
- 6) Luego se obtiene $L/lest$, en donde L = tamaño de la losa cuadrada
- 7) Se calcula el factor de ajuste para el caso de la deflexión máxima (do) y “ l ” a partir de la ecuación siguiente:

$$AF_{do} = 1 - 1.15085 e^{-0.71878 \left(\frac{L}{\lambda Est} \right)^{1.04831}}$$

Ec. IV,32

$$AF_{\lambda Est} = 1 - 0.8943 e^{-0.61662 \left(\frac{L}{\lambda Est} \right)^{0.80151}}$$

Ec. IV.33

- 8) Se calcula el valor ajustado $do =$ valor medido $do \times AF_{do}$
- 9) Se obtiene el valor ajustado de “ l ” = $lest \times AF_{\lambda Est}$
- 10) Finalmente se realiza el cálculo inverso de k y del “ E ” del concreto empleando los valores ajustados de “ do ” y “ l ”.

IV.4 Comparativa entre el valor de k a partir del cálculo inverso y otros parámetros de suelo

Para afinar los valores de k en cálculo inverso se deben hacer correcciones por tamaño de losas así como por niveles de esfuerzo aplicados en la superficie. A continuación se discute el papel que tienen los diferentes tipos de suelo en el análisis.

Mediante ensayos de placa en campo se pueden ajustar los valores de k dinámico -o a partir de cálculo inverso-. Se puede usar el método de AREA, ajustado por tamaño de losas, para estimar un valor de “k” más real. El valor estático de “k” se puede estimar dividiendo el dinámicos entre 1.97, es decir, aproximadamente 2. Al final se compara este valor con otros parámetros de resistencia como el CBR y el valor de R.

a) El valor k respecto a tipos de suelo: La Fig. muestra una comparación entre diferentes tipos de suelos, y los valores k dinámicos medidos en ellos; se compara con los rangos de valores que normalmente se recomiendan atendiendo exclusivamente al tipo de suelos.

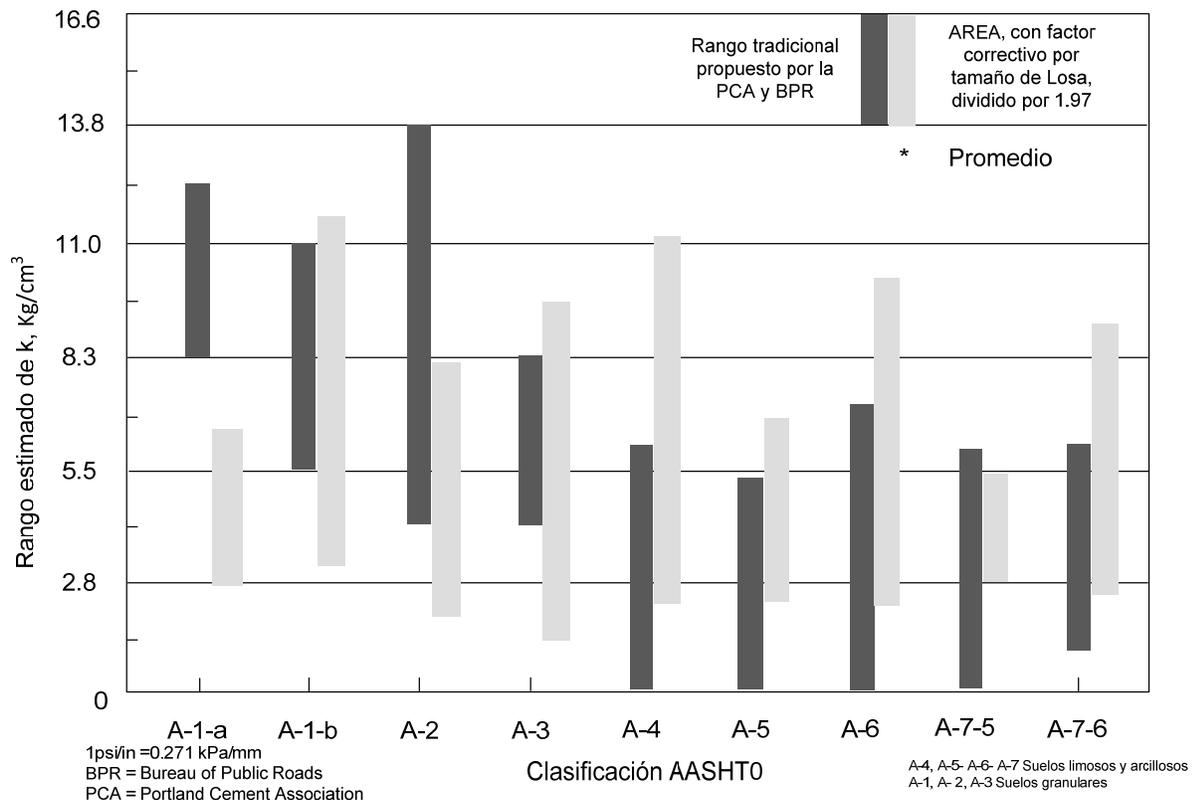


Figura.IV.1: Valor estimado del k estático a partir de cálculo inverso comparado con los valores tradicionales recomendados (Experimento de secciones selectas del programa LTPP, 1997. (Ref. 14)

Tal como sugiere esta gráfica, para suelos granulares gruesos el valor de k -estático a partir de cálculo inverso tienden a ser algo menores que los que se recomiendan en la literatura. En general no se recomienda usar los valores recomendados en los rangos superiores. Ello se explica porque en la literatura se recomiendan valores con base en la descripción de los suelos superficiales, sin considerar hasta donde se extienden. Así, se podrán recomendar los valores superiores solamente si se conoce con precisión los espesores de los suelos con base al cual se hace la asignación de los “ k ” recomendados. Ver las Figs. Al final

Para el caso de los suelos cohesivos si hay una congruencia razonable entre los valores recomendados y los determinados con cálculo inverso.

b) Valor k estático respecto al CBR. La Fig. 21 muestra la relación entre CBR y el valor estático a partir de cálculos inversos (Programa LTPP de E.U.A., 1997). Los valores de K concuerdan razonablemente bien con los recomendados. Se aprecian sin embargo, que algunas secciones medidas en donde se obtuvieron valores altos de CBR se derivaron valores relativamente bajos del valor k respecto a los recomendados. Se infiere que estos materiales no se extienden más allá de una cierta profundidad; es decir, son suelos granulares de poco espesor.

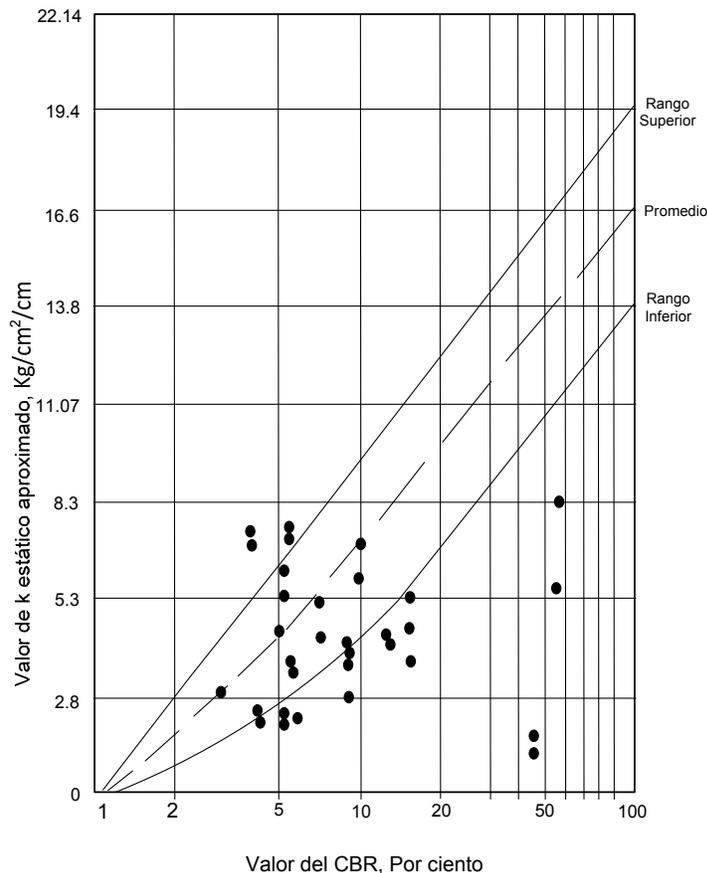


Figura IV.2: Comparación del valor estático de k estimado a partir de análisis de cálculo inverso y CBR

Caso del Método de diseño propuesto por la AASHTO

Este método acepta que el dato de entrada para el módulo de reacción sea un promedio. Esto es, se acepta que se de cómo dato de entrada para diseño un valor promedio, que incluso acepte una deformación permanente en el terreno de apoyo. Se sabe que los datos de los ensayos In Situ que dieron lugar a las formulaciones para diferentes tipos de pavimento previeron grados de deterioro que sustentan los diferentes niveles de k. Sin embargo, en estudios reciente ya se sabe que solamente la componente elástica del suelo es la que mejor representa al comportamiento del pavimento cuando este se sujeta a tráfico. Mediciones de deflexiones así lo demuestran, ya que los resultados con cálculo inverso determinan que los valores de k en los rangos elásticos derivan en mejores desempeños pronosticados. Es decir, existe una mayor congruencia entre lo medido y lo pronosticado usando la componente elástica de los suelos (Ref. 14) . Por ello, en lo que sigue se proponen los valores ajustados de k

Existen varias formas de medir o proponer los valores de k elástico del terreno de apoyo. Al menos son tres los principales conocidos: métodos por correlaciones, métodos de cálculo inverso y aquellos que se basan en prueba de placa.

IV.5 Correlaciones de k con suelos finos (CH, ML, A-4 a los del tipo A-7)

La capacidad portante del terreno, en caso de pavimentos, también depende del grado de saturación, G_r , la cual a su vez depende de los contenidos de agua, w , y de los pesos volumétricos secos, γ_d , y de la densidad de sólidos, S_s :

$$G_r = \frac{w}{\left(\frac{62.4}{\gamma_d}\right) - \left(\frac{1}{S_s}\right)}$$

Ec. IV.34

La Fig. IV.3 presenta algunos valores recomendados atendiendo a los grados de saturación. En ella se presentan rangos promedio; y se acepta que exista un rango de desviación del orden de 1.1 kg/cm²/cm.

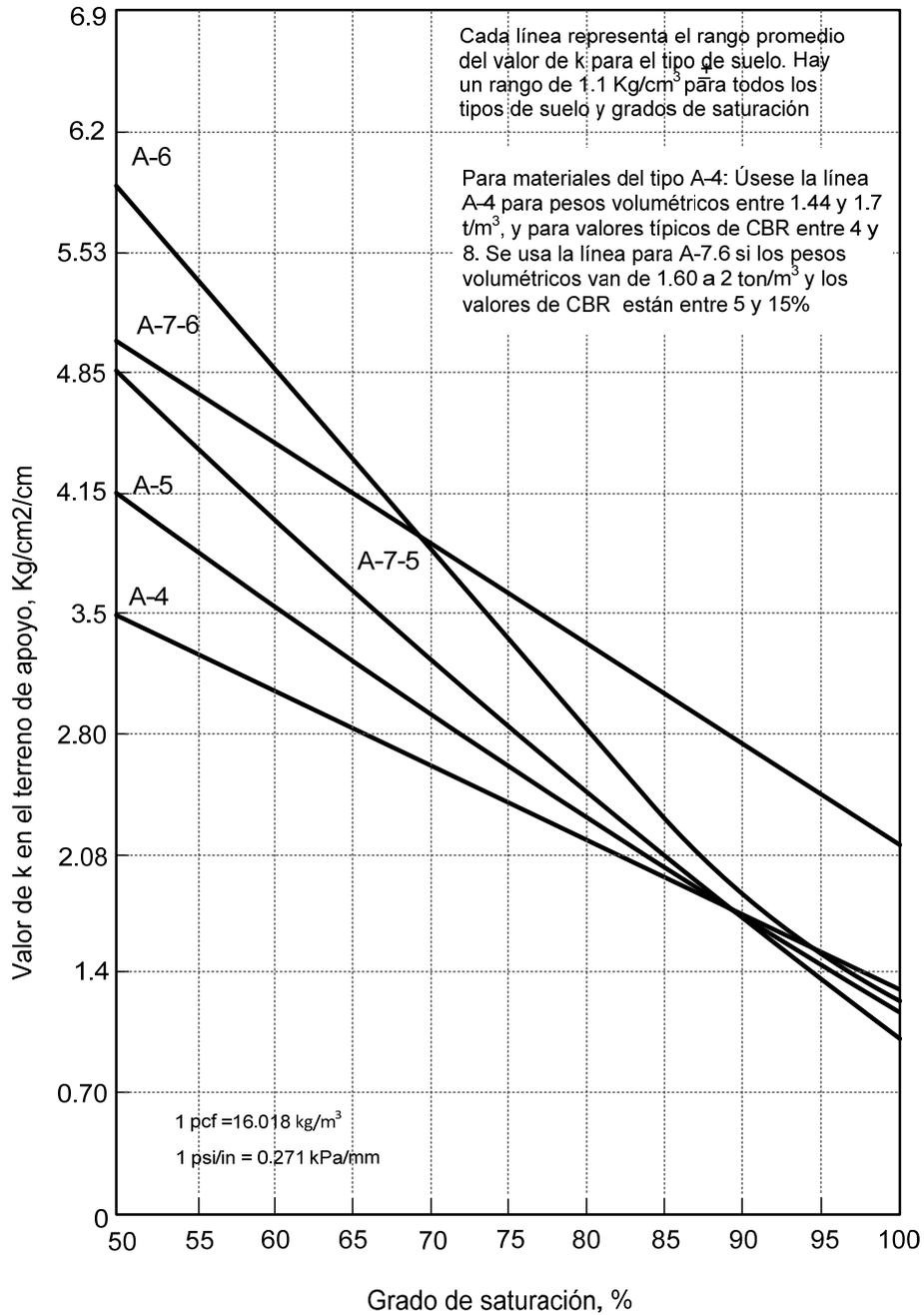


Figura IV.3: Valor de k , para diferentes grados de saturación, caso de suelos cohesivos.

También se presentan en la tabla IV.4 los valores de k para suelos finos, y también rangos típicos de pesos volumétricos secos y CBR para cada tipo de suelo:

Tabla No IV.4: Valores recomendados de rangos de k para varios tipos de suelo

Clasificación AASHTO	Descripción	SUCS	Peso vol. Seco ton/m ³	CBR (Por ciento)	Valor k
Suelos Gruesos					
A-1-a, bien graduado	Grava	GW,GP	2.00 – 2.24	60 – 80	8.3 – 12.5
A-1-a, mal graduado			1.92 – 2.08	35 – 60	8.3 – 11.07
A-1-b	Arena Gruesa	SW	1.76 – 2.08	20 – 40	5.53 – 11.07
A-3	Arena fina	SP	1.68 – 1.92	15 – 25	4.15 – 8.3
Suelos granulares con alto contenido en puros					
A-2-4, gravas	Grava limosa	GM	2.00 – 2.32	40 – 80	8.3 – 13.8
A-2-5, gravas	Grava arena – limosa				
A-2-4, arenosos	Arena limosa	SM	1.92 – 2.16	20 – 40	8.3 – 11.07
A-2-5, arenosos	Arena con gravas limosas				
A-2-6, gravas	Gravas arcillosas	GC	1.92 – 2.24	20 – 40	5.53 – 12.45
A-2-7, gravas	Gravas arena arcillosas				
A-2-6, arenosos	Arena arcillosa	SC	1.68 – 2.08	10 – 20	4.15 – 9.7
A-2-7, arenosos	Arena con gravas arcillosas				
Suelos finos					
A-4	Limos	ML, OL	1.44 – 1.68	4 – 8	0.70 – 4.57*
	Mezcla de grava, limo y arena		1.60- 2.00	5 – 15	1.1 – 6.09*
A-5	Limos mal graduados	MH	1.26 – 1.60	4 – 8	0.70 – 5.26*
A-6	Arcilla elástica	CL	1.60 – 2.00	5 – 15	0.70 – 6.00*
A-7-5	Arcillas elasticas de plasticidad moderada	CL, OL	1.44 – 2.00	4 – 15	0.70 – 6.00*
A-7-6	Arcilla elástica de alta plasticidad	CH, OH	1.28 – 1.76	3 – 5	1.1 – 6.09*

* El valor de k en suelos finos depende de su grado de saturación de agua

Correlaciones entre k y suelos granulares (A-1 y A-3)

Para el caso de suelos gruesos los contenidos no tienen mucha influencia, y como se sabe, su comportamiento se ve más influenciado por la relación de vacíos y su estado d esfuerzos. También en la ya citada tabla IV.4 se sugieren algunos valores.

Correlaciones con el CBR

La Fig. IV.4 muestra la relación entre el valor de k que presenta resistencias en la modalidad de CBR.

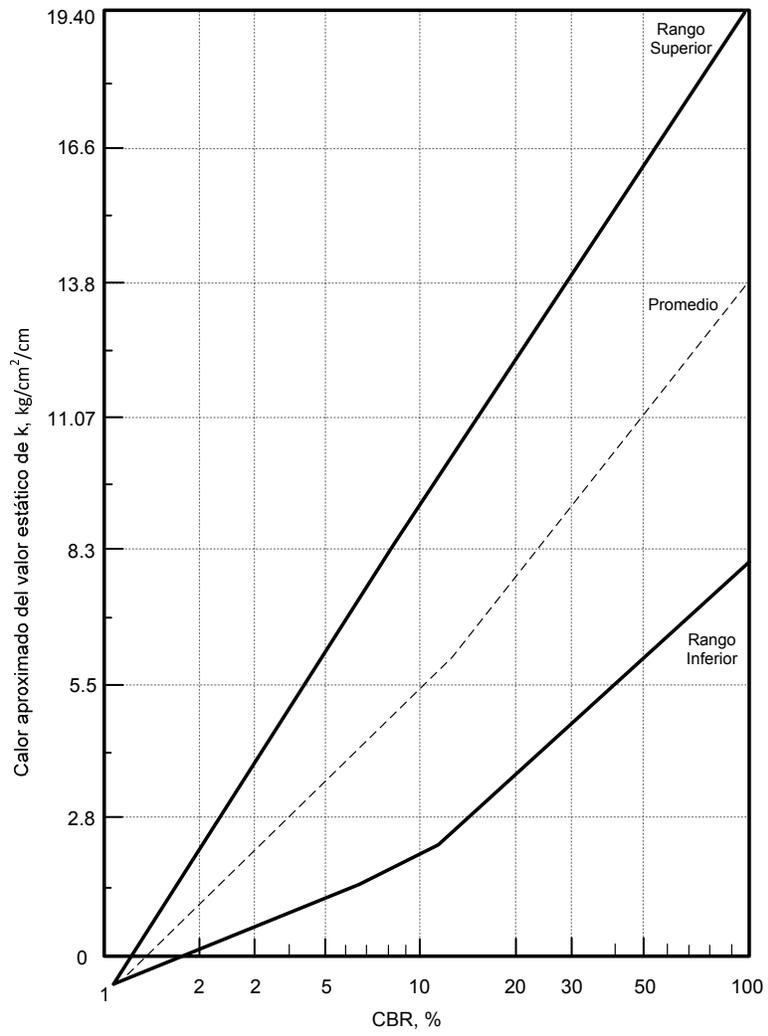


Figura IV.4: Relación aproximada entre los valores de k y CBR

Referencias

1. Rhode, G. T. And Scullion, T., "MODULUS 4.0: Expansion and Validation of the Modulus Backcalculation System," Research Report 1123-3, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Texas, November 1990.
2. Hossain, A.S.M., and Zaniewski, J.P., "Detection and Determination of Depth of Rigid Bottom in Backcalculation of Layer Moduli from Falling Weight Deflectometer Data," Transportation Research Record No. 1293, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1991.
3. Southgate, H. F., and Deen, R. C., "Temperature Distributions in Asphalt Concrete Pavements", Highway Research Record No. 549, Highway Research Board, Washington, D.C., 1975, pp. 39-46.
4. Minkwan Kim, Erol Tutumuer, "Modelling Nonlinear, Stress- Depenent Pavement Foundation Behavior Using a General - Purpose Finite Elelment Program". Pavement Mechanics and Performance, Geotechnical Special Publication No 154. Edited by Baoshan Huang, Roger Meier, Jorge Prozzi, Erol Tutumluer. Geo Institute, ASCE. June 6-8, 2006
6. Uzan, J. "Characterization of granular material" Transportation Research Record 1022, TRB, National research Council, Washington, D.C., 52-59. 1985
7. Darter, M.I., Elliott, R.P., and Hall, K.T., "Revision of AASHTO Pavement Overlay Design Procedure," Project 20-7/39, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., September 1991
8. Newcomb, D. E., "Development and Evaluation of Regression Method to Interpret Dynamic Pavement Deflections," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, 1986.
9. Ioannides, A.M. (1990). "Dimensional Analysis in NDT Rigid Pavement Evaluation." Journal of Transportation Engineering. ASCE. Vol. 116, No. 1. New York, NY.
10. Korenev, B.G. (1954). "Problems of Analysis of Beams and Plates on Elastic Foundation." Gosudarstvennoe Izdatel'stvo Literatry po Stroitel'stvu i Arkhitekture. Moscow, USSR (en Ruso).
11. Hoffman, M.S., and M.R. Thompson. (1981). "Mechanistic Interpretation of Nondestructive Testing Deflections." Civil Engineering Studies. Transportation Engineering Series No. 32. Illinois Cooperative Highway and Transportation Research Program Series No. 190. University of Illinois, Urbana, IL.
12. Losberg, A. (1960). "Structurally Reinforced Concrete Pavements." Doktorsavhandlingar Vid Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sweden
13. Ioannides, A.M., M.R. Thompson, and E.J. Barenberg. (1985). "A Finite Element Analysis of Slabs on-Grade Using a Variety of Support Models." Proceedings, Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, W. Lafayette, IN, April 23-25, pp. 309-324
14. K.T. Hall, M.I. Darter, T.E., Hoerner, and L. Khazanovich, "LTPP Data Analysis, Phase I: Validation of Guidelines for k- value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction" Publication No FHWA- RD-96-198, January 199

Capítulo V

Enfoque de capas elásticas

CAPÍTULO V

Enfoque de capas elásticas

V.1 Introducción

Muchas veces resulta de interés conocer el potencial de deterioro que puede sufrir un conjunto de capas, en función de sus características elásticas, espesor, geometría, tipo de cargas y distribución. La teoría de capas elásticas ofrece una herramienta para cálculos preliminares que permiten evaluar o pronosticar el desempeño de una estructura de pavimento. En estos cálculos se puede involucrar la posible adhesión entre las capas, esto es, qué tan bien se desarrolla la fricción o deslizamiento entre las capas en contacto, o bien, condiciones de cero desarrollo de fricción, y en consecuencia el comportamiento íntimo entre capas adyacentes.

Existen soluciones teóricas que permiten calcular los esfuerzos, deformaciones y deflexiones cuando en la superficie se colocan cargas circulares de diámetro conocido. Muchas formulaciones consideran incluso el comportamiento de las capas cuando se considera el estado de esfuerzo que prevalece dentro de las mismas. Esto último por ejemplo se involucra al momento de considerar las características de rigidez individual y de conjunto.

Existen programas (véase por ejemplo Ref. 1) que estiman esfuerzos, deformaciones y desplazamientos debido a cargas estáticas. Para hacer estos análisis se deben conocer parámetros elásticos tales como los módulos, relación de Poisson y espesor por cada capa. Los cálculos se hacen fijando la posición de las cargas -o el radio de carga equivalente-. Muchos programas ya consideran el efecto del estado de esfuerzos dentro de cada capa para el pronóstico de su desempeño.

Para el caso de materiales granulares la consideración de comportamiento dependiente del estado de esfuerzos se expresa ajustando el módulo de capa en forma iterativa mediante el empleo de la relación esfuerzo -módulo según:

$$\begin{array}{lll} M_{Rb} = K_1 \Theta K_2 & \text{Para suelos granulares} & \text{Ec. V.1} \\ M_{Rs} = K_3 \sigma_d K_4 & \text{Para suelos finos} & \text{Ec. V.2} \end{array}$$

M_{Rb} = módulo resiliente de los suelos granulares (MPa)

M_{Rs} = módulo resiliente de los suelos finos, MPa

Θ = Esfuerzos totales ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), MPa

σ_d = esfuerzo desviador, MPa

K_1, K_2, K_3, K_4 = constantes de regresión

Los valores de K_1 y K_3 dependen del contenido de agua, y consecuentemente hacen que el valor de MR presente variaciones estacionales. K_2 y K_4 se relacionan con los tipos de suelos, finos o gruesos. K_2 siempre es positivo y K_4 es casi siempre negativo, y permanece prácticamente constante durante todas las estaciones de año.

Para cada iteración del programa cuando se usa capas dependientes del estado de esfuerzo se ejecuta un análisis, cálculo y comparación de módulos usados y calculados en la nueva iteración y se efectúa el ajuste correspondiente. Durante el análisis se producen determinaciones de esfuerzos, deformaciones y las deflexiones asociadas. Se obtienen así esfuerzos y deformaciones críticas en el 'paño superior e inferior de las carpetas asfálticas, y normalmente se analiza la parte media de las capas base y subbase y la parte superior del terreno de apoyo.

Se calculan los esfuerzos totales, θ , para las capas suelos granulares, y para el caso decapas compuestas por suelos finos se determinan los esfuerzos desviadores. De esta manera, el módulo de resiliencia requerido se obtiene mediante la conciliación de la relación entre los módulos - esfuerzos definidas por las Ecs. V.1 y V.2 y se compara con el módulo usado en el diseño del pavimento. La solución se establece cuando el proceso iterativo termina, que es cuando se cumplen las tolerancias de error que el proyectista fije entre una iteración y otra.

V.2 Módulo resiliente, modelo no lineal para capas granulares

Para el caso de materiales para la base y subbase se deben considerar la influencia del estado de esfuerzos para determinar el MR. Este modelo de alguna manera debe toma en cuenta el incremento de MR para el caso de incrementar el estado de esfuerzos. El modelo ya conocido por Uzan (Uzan, 1985) propone una ecuación para definir MR en función de los esfuerzos desviadores y confinantes en una cámara triaxial para su determinación en el laboratorio.

Una manera especial de escribir la fórmula propuesta por Uzan es:

$$M_R = K_1 \left(\frac{\theta}{p_o} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_o} \right)^{k_3}$$

Ec. V.3

En esta ecuación:

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

p_o = presión unitaria, 1 KPa

k_1, k_2, k_3 = parámetros del modelo obtenidos mediante regresión múltiple a partir de los datos obtenidos de la prueba de laboratorio de M_R

Como se sabe, los suelos finos son los más susceptibles al estado de esfuerzos. Para el caso del MR en el terreno natural, el factor más importante es el esfuerzo desviador, sobre todo tomando en cuenta la posición y tipo de suelo. El modelo bilineal es ampliamente conocido para caracterizar la dependencia del MR del esfuerzo desviador. Tal relación se ilustra en la Fig. V.1

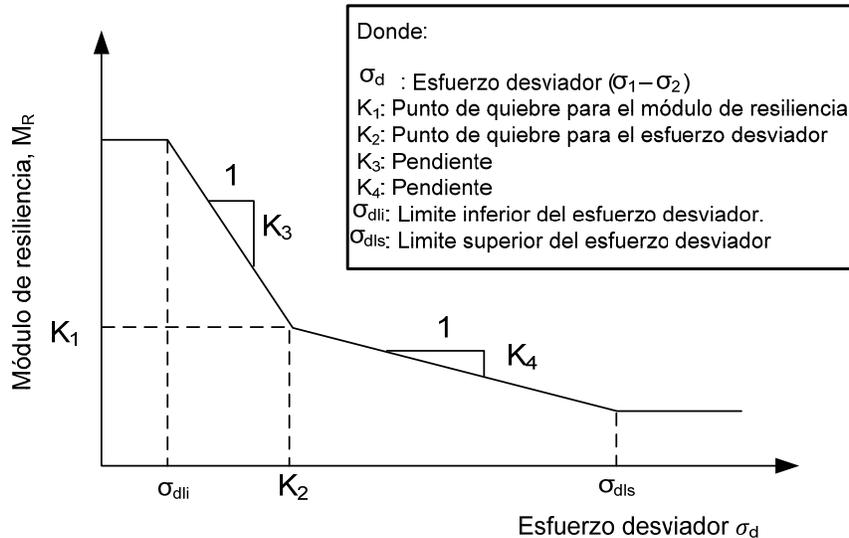


Fig. V.1 Curva mostrando la dependencia del estado de esfuerzos en suelos finos, comportamiento bi - lineal (Ref. Thompson and Robnett, 1979).

A esta figura la complementan las ecuaciones:

$$M_R = K_1 + K_3 \times (K_2 - \sigma_d) \quad \text{Cuando } \sigma_d \leq K_2 \quad \text{Ec. V.4}$$

$$M_R = K_1 - K_4 \times (\sigma_d - K_2) \quad \text{Cuando } \sigma_d \geq K_2 \quad \text{Ec. V.5}$$

Los valores k_1 , K_2 , K_3 y K_4 son coeficientes de regresión múltiple, a partir de las pruebas de tipo triaxial. Y σ_d es el esfuerzo desviador.

Ejemplos de aplicación

Análisis de multicapas elásticas

En el Anexo A se presentan algunos ejemplos de aplicación y resultados obtenidos. En él primeramente se presentan cálculos de esfuerzos y deformaciones, para diferentes cargas. Y en la segunda parte se hacen cálculos inversos a partir de un registro de deflexiones obtenido en campo.

Estos ejemplos corresponden ahora a un pavimento flexible. En ellos aparecen esfuerzos y deformaciones en diferentes planos de las capas, incluyendo la carpeta asfáltica.

V.3 Análisis de esfuerzos y deformaciones

De los cuatro casos analizados, en todo se aplica un comportamiento elástico, y se hace la hipótesis gruesa de que las capas se comportan independientes del estado de esfuerzos. Esto no es estrictamente válido para las capas de la base al terreno de apoyo. Esta consideración se involucra en la segunda pare, en donde ya se miden las deflexiones en el campo.

De los cuatro casos, en los dos primeros se supone que las carpetas asfálticas nunca se despegan de las capas de apoyo. Esta hipótesis no es tan gruesa, si se piensa que los pavimentos flexibles casi siempre siguen la configuración de las deformaciones de las capas inferiores, por la misma naturaleza de estas capas; a lo anterior se suma el efecto viscoso que se suma por la influencia de la temperatura. En la práctica se observa poco que la carpeta asfáltica se desprenda o se presenten oquedades entre la superficie de rodamiento y la base.

De las características que más interesan evaluar, aparte de los esfuerzos principales generados por las cargas externas, son las deformaciones normales y los desplazamientos. Ellas son función directa de los espesores, carga y propiedades elásticas de las capas analizadas. La cuantificación de las deformaciones normales sobre los ejes x, y, y z (las horizontales E_{xx} y E_{yy} y en la dirección vertical E_{zz}) darán la pauta para valuar la pertinencia de engrosar o no las carpetas. Des este tipo de análisis se pueden cuantificar de manera razonable el potencial de fracturas, pero sobre todo, de la presencia de roderas.

La carga que se utilizó en estos análisis fue de 40,000 N (9,000 libras), que es el rango usual en pavimentos en aeropuertos. Se utilizaron cuatro capas, en ellas se incluye el terreno natural.

La estructura fue:

Espesor	Relación de Poisson, μ	Módulo elástico, MPa
10 cm Capa base	0.35	5,038
20 cm Capa base granular	0.35	1,259
30 cm Capa subrasante	0.40	105
Terreno natural	0.45	70.3

Es decir, las capas de subrasante y de terreno natural son relativamente débiles. Se analizaron dos posiciones de carga y se valuaron las respuestas en dos puntos, para comparar el efecto de concentración de cargas.

La tabla EV.1 presenta únicamente las deformaciones normales, en forma resumida:

Ejemplo EV.1: Resultados parciales, análisis de esfuerzos elásticos. Deformaciones normales

Capas	μ	Espesor cm			Módulo MPa		
Carpeta asfáltica (CA)	0.35	10			5,038		
Carpeta base (B)	0.35	20			1,259		
Carpeta subbase (SB)	0.40	30			105		
Terreno Natural (T.N)	0.45				70.3		
Carga = 39,970 N Caso 1							
Posición de carga = X = -15 cm y = 0.0 X = 20 x= 20.0							
Condición de adhesión: Contacto completo entre capas							
Posición de Evaluación x= 0.00 Y = 0.00	Profundidad cm	Deformaciones Normales 10^{-6}			Desplazamientos micras		
		Exx	Eyy	Ezz	Ux	Uy	Uz
0.00	CA	-26.6	-221.02	133.33	0.631	0.00	656.718
9.98	CA	-70.69	114.25	-47.74	1.896	0.00	661.597
28.00	B	157.94	243.48	-248.68	-3.937	0.00	628.67
61.011	T.N	156.72	176.02	-380.91	-3.92	0.00	489.379
Carga = 39,970 N Caso 1							
Posición de carga= X = -15 cm Y =0.00 X = 20 y = 0.0							
Condición de adhesión: Contacto completo entre capas							
Posición de Evaluación X = 20 Y =0.00	Profundidad cm	Deformaciones Normales 10^{-6}			Desplazamientos micras		
		Exx	Eyy	Ezz	Ux	Uy	Uz
0.00	CA	-195.42	-254.2	71.67	-19.191	0.00	670.968
9.98	CA	130.23	163.00	-225.57	3.998	0.00	660.388
28.00	B	160.35	229.64	-243.34	28.331	0.00	610.973
61.011	TN	141.59	169.11	-357.35	26.576	0.00	479.573
Carga = 39,970 N Caso 2							
Posición de carga= X = -15 cm Y =0.00 X = 20 Y =0.00							
Condición de adhesión: Caso 2 Contacto completo entre capas							
Posición de Evaluación X = 0.0 Y = 0.0	Profundidad cm	Deformaciones Normales 10^{-6}			Desplazamientos micras		
		Exx	Eyy	Ezz	Ux	Uy	Uz
0.00	CA	-25.72	-219.36	131.96	0.61	0.00	661.09
9.98	CA	-71.02	112.55	-46.28	1.93	0.00	666.0
28.00	B	165.07	256.96	-258.06	-4.19	0.00	630.86
61.011	TN	157.62	177.70	-383.85	-4.01	0.00	496.54

Carga = 39,970 N							
Posición de carga=							
		X = -15 cm		Y = 0.00			
		X = 20		Y = 0.00			
Condición de adhesión: Caso 2 Contacto completo entre capas							
Posición de Evaluación	Profundidad cm	Deformaciones Normales 10^{-6}			Desplazamientos micras		
		Exx	Eyy	Ezz	Ux	Uy	Uz
0.00	CA	-196.17	-254.47	68.73	-19.33	0.00	676.33
9.98	CA	130.64	162.87	-226.27	3.94	0.00	665.30
28.00	B	168.71	242.34	-251.93	10.18	0.00	612.93
61.011	TN	142.23	170.58	-359.79	27.15	0.00	486.41
Carga = 39,970 N							
Posición de carga =							
		X = -15 cm		Y = 0.00			
		X = 20		Y = 0.00			
Condición de adhesión: Caso 3 No adhesión en carpeta asfáltica-base							
Posición de Evaluación X= 0.0 y = 0.0	Profundidad cm	Deformaciones Normales 10^{-6}			Desplazamientos micras		
		Exx	Eyy	Ezz	Ux	Uy	Uz
0.00	CA	-38.54	-291.69	177.82	0.902	0.00	982.280
9.98	CA	19.48	350.58	-225.78	-0.295	0.00	980.555
28.00	B	213.08	368.91	-368.04	-5.300	0.00	965.050
61.011	T.N	234.26	291.48	-685.77	-5.868	0.00	791.235
Carga = 39,970 N							
Posición de carga =							
		X = -15 cm		Y = 0.00			
		X = 20		Y = 0.00			
Condición de adhesión: Caso 3 No adhesión en carpeta asfáltica-base							
Posición de Evaluación x = 20.0 y = 0.0	Profundidad cm	Deformaciones Normales 10^{-6}			Desplazamientos micras		
		Exx	Eyy	Ezz	Ux	Uy	Uz
0.00	CA	-238.42	-326.11	133.55	-23.931	0.00	976.628
9.98	CA	303.02	407.03	-450.04	26.930	0.00	959.551
28.00	B	228.58	346.96	-365.97	39.318	0.00	925.003
61.011	T.N	200.83	273.33	-624.59	39.148	0.00	761.964

Capas	M	Espesor cm			Módulo MPa		
Carpeta asfáltica (CA)	0.35	10			5,038		
Carpeta base (B)	0.35	20			1,259		
Carpeta subbase (SB)	0.40	30			105		
Terreno Natural (T.N)	0.45				70.3		
Carga = 39,970 N							
Posición de carga =		X = -15 cm		Y = 0.00			
		X = 20		Y = 0.00			
Condición de adhesión: Caso 4 Adhesión parcial en carpeta asfáltica-base							
Posición de Evaluación X = 0.0 Y = 0.0	Profundidad cm	Deformaciones Normales 10 ⁻⁶			Desplazamientos micras		
		Exx	Eyy	Ezz	Ux	Uy	Uz
0.00	CA	-5.86	-202.72	112.31	0.00	0.00	650.998
9.98	CA	-98.09	109.24	-21.20	0.00	0.00	655.689
28.00	B	127.55	243.04	-230.22	0.00	0.00	630.676
61.011	T.N	155.08	183.03	-387.18	0.00	0.00	492.519
Carga = 39,970 N							
Posición de carga =		X = -20 cm		Y = 0.00			
		X = 20		Y = 0.00			
Condición de adhesión: Caso 4							
Posición de Evaluación x = 20 y = 0.0	Profundidad cm	Deformaciones Normales 10 ⁻⁶			Desplazamientos micras		
		Exx	Eyy	Ezz	Ux	Uy	Uz
0.00	CA	-205.52	-260.71	80.99	-19.362	0.00	672.382
9.98	CA	163.75	194.47	-260.14	3.891	0.00	661.088
28.00	B	160.68	233.86	-247.97	29.240	0.00	613.207
61.011	T.N	138.35	173.99	-359.38	29.927	0.00	479.759

Para fines ilustrativos, en los cuatro casos, se obtiene los siguientes niveles de deformaciones normales sobre el eje x:

		Exx, x 10 ⁻⁶
Caso 1		
0.0	Carpeta	-26.6
9.98	Lecho inferior de carpeta	-70.69
28.0	Lecho medio de la base	157.94
61.01	Lecho superior del Terreno natural	156.72

		Exx, x 10 ⁻⁶
Caso 2		
0.0	Carpeta	-25.72
9.98	Lecho inferior de carpeta	-71.02
28.0	Lecho medio de la base	165.07
61.01	Lecho superior del Terreno natural	157.62

		Exx, x 10 ⁻⁶
Caso 3*		
0.0	Carpeta	-38.54
9.98	Lecho inferior de carpeta	19.48

28.0	Lecho medio de la base	213.08
61.01	Lecho superior del Terreno natural	234.26
*No adhesión de la carpeta a la capa base		

Caso 4*		Exx, x 10 ⁻⁶
0.0	Carpeta	-5.86
9.98	Lecho inferior de carpeta	-98.09
28.0	Lecho medio de la base	127.55
61.01	Lecho superior del Terreno natural	155.08
*Adhesión parcial		

Nota: en todos los casos el punto de evaluación estuvo en x= 0.0 y y= 0.0

Nótese el efecto tan pronunciado que tiene la posible adhesión en la carpeta asfáltica y la capa base en el desarrollo de deformaciones normales horizontales. Nótese que el caso 4, por ser solo de adhesión parcial, se asemeja a los valores de Exx obtenidos en los dos primeros casos.

Nótese además que las deformaciones normales en la dirección vertical, Ezz, son sustancialmente diferentes, prácticamente del doble en el caso 3 respecto a las del caso 1. Ello indica que al menos en la capa del terreno natural, tiene mucha incidencia la falta de contacto o de apoyo de la capa de rodamiento (carpeta). Como es de esperarse, se promueve la plastificación.

De lo anterior es fácil entender el problema de falla plástica o de roderas en algunas secciones de pavimentos, Ello se debe, en variaciones del módulo elástico y de resiliencia en diferentes épocas del año, sobre todo en zonas lluviosas y con deficiencias en el drenaje superficial y subterráneo.

V.4 Análisis de deflexiones

En el anexo B se presentan ejemplos de datos de salida de un programa para el cálculo inverso (Ref. 1). Tal como se aprecia, para diferentes capas en estudio de una estructura de pavimento se proporcionan como datos de entrada los consignados en la tabla EV.2:

Tabla No EV.2: Datos de entrada parciales, cálculo inverso

Capa No	Condición de MR*	μ	M _R inicial	M _R mínimo, MPa	M _R máximo, MPa
1	0	0.35	2,800	700	14,000
2	0	0.40	180	35	3,500
3	0	0.45	100	35	3,500
4	1	0.35	350		

* Este valor es 0 cuando el valor de MR será determinado mediante cálculo inverso; y 1 si se proporciona como un valor fijo, por ejemplo en el caso de una capa muy rígida e indeformable.

Capa No	Condición de MR*	μ	M _R inicial	M _R mínimo, MPa	M _R máximo, MPa
1	0	0.35	2,700	600	13,525
2	0	0.38	150	28	1,500
3	0	0.42	95	25	1,500
4	1	0.35	350		

Capa No	Condición de MR*	μ	M _R inicial	M _R mínimo, MPa	M _R máximo, MPa
1	0	0.35	3,000	600	13,525
2	0	0.38	120	28	1,500
3	0	0.42	80	25	1,500
4	1	0.35	80		

A continuación se presenta un ejemplo de las deflexiones medida, y que posteriormente fueron procesadas para obtener los módulos elásticos.

Tabla No EV.3 : Ejemplo de análisis de deflexiones

No de caída de carga	Carga, en KN	No de sensor					
		1	2	3	4	5	6
1	40	945	820	735	532	370	295
2	35	889	675	605	480	380	285
3	42	705	580	580	395	280	195
4	29.1	403	335	335	196	135	98

Espesor de carpeta asfáltica = 10 cm, Espesor de base= 20 cm, Espesor de terraplén = 200 cm
 Temperatura de carpeta asfáltica = 20 °C

Se aprecia como las deflexiones se van desvaneciendo conforme se aleja el sensor. El diagrama de estas mediciones son justamente los que produce las cuencas de deformaciones

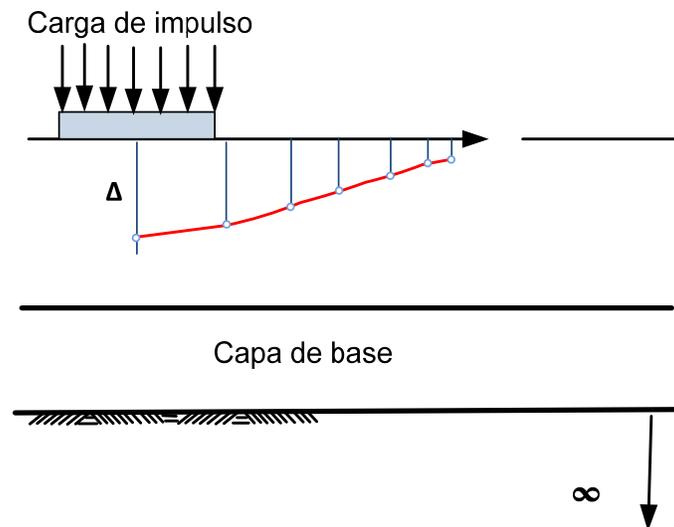


Fig. V.2 Esquema de una cuenca de deformaciones

En este caso particular, el programa puede simular la presencia de una capa muy rígida a cierta distancia del lecho inferior de la capa de subbase o del terreno natural. También puede hacer determinaciones por proceso iterativo de MR considerando que no haya presencia de una capa dura o muy rígida por debajo o en las cercanías del pavimento. En ambos casos el proceso iterativo entre los MR iniciales y los cálculos subsecuentes se suceden hasta que haya convergencia

En cada caso existen cuatro condiciones de carga. Para de alguna manera calibrar la influencia que cada nivel de esta última tiene. Para cada caso se debe proporcionar, como dato de campo, la deflexión medida, para posteriormente iniciar el algoritmo de cálculo y determinar el valor M_R y confrontarlo con el inicial proporcionado, tal como se aprecia en el organigrama de la Fig. III.3 del capítulo III. En todos los casos aparece la información siguiente:

Sensor No 1	1	2	3	4	5	6
Deflexión medida, micras						
Deflexión calculada						
Diferencia entre deflexiones, %						
Capa No	1	2	3	4	En este caso se analizan cuatro capas	
Módulo inicial, MPa						
Módulo calculado, MPa						
Capa No	1	2		3		
Distancia radial, cm	0.0	0.18		45.0		
Posición	Fondo	Lecho medio		Lecho superior		
Esfuerzo vertical, KPa						
Esfuerzo radial, KPa						
Esfuerzo total, KPa						
Esfuerzo desviador, KPa						
Esfuerzo vertical, KPa						
Deformación vertical, 10^{-6}						
Deformación radial, 10^{-6}						

Y finalmente se obtienen, por cada una de las capas, los valores resultantes de M_R y los coeficientes de regresión que rigen la ecuación constitutiva para obtener a este último.

Capa No:	1	2	3	4
Módulo medio, MPa				
Módulo normalizado, MPa				
K_1 , MPa				
K_2 :				
Raíz cuadrada (calidad de ajuste)				
Tipo de suelo				

Es decir, los valores finales se pueden obtener para diferentes rangos de esfuerzo, atendiendo a los coeficientes K_1 , y K_2 , en este caso.

V.6 Observaciones

Los valores de M_R , y consecuentemente los coeficientes de correlación, K_1 y K_2 se basan en el modelo de separación empleado. Como se sabe, dependiendo de si se emplea el método del AREA y sus variantes, será el valor de M_R . El diseñador debe estar consciente de esta consideración.

Una de las grandes limitaciones de este enfoque es que se apoya mucho en respuestas elásticas. Aún en el modelo de comportamiento no lineal, que aunque se basa en niveles de esfuerzo en el interior de cada cuerpo, no hay recomendaciones específicas en cuanto a su variación respecto al tiempo. Esto es, el valor de K , al igual que los de M_R , son altamente dependientes de los contenidos de agua, variaciones volumétricas y deformaciones verticales en particular.

También se debe considerar con mucha precisión la modalidad de arreglos en sensores, y cuales mediciones de estos últimos se usaron, principalmente con el criterio de AREA, como se menciona en el inciso IV.2 del capítulo IV.

En este caso particular del programa empleado, se presentan cuatro condiciones de espesor de carpeta asfáltica. Es decir, existen en este enfoque particular cuatro ecuaciones de regresión para obtener el inverso de B (profundidad de la capa rígida considerada). El valor de B se puede inferior también del cálculo inverso. Sin embargo, este valor en la práctica se debe calibrar mediante la ejecución en campo de sondeos exploratorios de tipo directo.

Las ecuaciones para determinar 1/B que corresponda a cada espesor de carpeta depende de:

SCI = $D_o - D_{12}''$ (D_o - D305 mm). Índice de curvatura

BDI = $D_{12}'' - D_{24}''$ (D305 mm- D610 mm). Índice de daño en la base

BCI = $D_{24}'' - D_{36}''$ (D610- D914 mm), Índice de curvatura de la capa base

D_i = deflexiones en la superficie (micras). Normalizadas a una carga de 40 KN (9,000 libras) situada a una separación de "i"

Véase también la Tabla No EV.6 más adelante para el resumen de parámetros derivados de una cuenca de deformaciones de este Capítulo.)

Tabla No EV.4: Resumen de información del cálculo de módulos de resiliencia, mediante cálculo inverso

Parámetro	AuAgo22				Auago23			
	1	2	3	4	1	2	3	4
K_1 , MPa			71.18				88.2	
K_2			0.29				1.25	
R^2			93.24				10	
T. suelo			Granular				Granular	
Módulo medio, M_R , MPa	6,239	190.26	62.38	350	7,212.99	168.24	35.3	350

Tabla No EV.5: Resumen de información del cálculo de módulos de resiliencia, mediante cálculo inverso

Parámetro	AuAgo23B				Auago23C			
	1	2	3	4	1	2	3	4
K_1 , MPa							60	
K_2							-2.08	
R^2							18.39	
T. suelo							Fino	
Módulo medio, M_R , MPa	8,481.8	175.8	36.38	80	1,487.5	720.12	44.68	70

Tabla No EV.6: Resumen de información del cálculo de módulos de resiliencia, mediante cálculo inverso

Parámetro	AuAgo25				Aure1			
	1	2	3	4	1	2	3	4
K ₁ , MPa		38.23					66.84	
K ₂		0.15					-0.04	
R ²		64.4					59.47	
T. suelo		Granular					Granular	
Módulo medio, M _R , MPa	12,681.25	36.23	75.43	350	7,855.97	137.97	69.86	350

Tabla No EV.6: Resumen de información del cálculo de módulos de resiliencia, mediante cálculo inverso

Parámetro	Aurepru			
	1	2	3	4
K ₁ , MPa		147.97	66.65	
K ₂		0.31	-0.04	
R ²		88.92	58.48	
T. suelo		Granular	Finos	
Módulo medio, M _R , MPa	7,746.94	138.86	69.81	350

Notas:

Distancias a puntos de carga de los sensores: 0, 20.3, 30.5, 61.0, 91.5, 122.00

En las tablas EV.a a EV.6 anteriores se aprecia la variación de K_i y K, necesarios para determinar el valor correcto de M_R, para el nivel de esfuerzos esperado durante la vida útil del pavimento.

Además, el algoritmo de cálculo permite obtener las deformaciones axiales directamente debajo del punto de carga, en los tres lechos de las carpetas de rodamiento, inferior, medio y superior. En tal punto también se obtiene el esfuerzo total, el esfuerzo y deformaciones radiales, y el esfuerzo desviador.

Tabla No EV.7: Espesores y cuadro de datos de entrada previo al cálculo inverso, por cadenamiento o punto de investigación

Medición	E ₁ , cm	E ₂ , cm	E ₃ , cm	No de aplicaciones	Temperatura, °C
Auago22*	10	35		4	20
AuAgo23*	10	35		4	20
AuAgo23B	10	20	50	4	20
AuAgo23C*	10	20	200	4	20
AuAgo25	10	20	200	4	20
Aupru*	10	40		4	20
Aure1*	10	40	798	4	20

* Existe capa rígida, cuando el módulo es de 350 MPa. En los otros dos caso no se registra capa rígida

Finalmente, esta herramienta es muy efectiva para de manera rápida evaluar en forma racional y eficiente la respuesta elástica, espesores y módulos de reacción aproximados en cada una de las capas que componen el sistema de pavimento. Existen soluciones en el mercado para estructuras flexibles y rígidas.

El método de las deflexiones sirve también para cuantificar la transferencia de carga -cortante - entre juntas transversales y grietas transversales, necesarias para un comportamiento adecuado de los pavimentos rígidos. Este tema, el de transferencia de carga, no fue tratado en este trabajo.

REFERENCIAS

1. *EVERSERIES® USER'S GUIDE*, Pavement Analysis , Computer Software and Case Studies. Environmental and Engineering Programs Washington State Department of Transportation . Agosto de 2005

Capítulo VI

PROPIEDADES ELÁSTICAS, MÓDULO DE RESILIENCIA

CAPÍTULO VI

PROPIEDADES ELÁSTICAS, MÓDULO DE RESILIENCIA

VI.1 Introducción

En el caso de pavimentos flexibles, y en menor grado en el caso de pavimentos compuesto y rígidos, tiene importancia significativa el módulo elástico obtenido mediante cargas repetitivas, pues con él se trata de simular la respuesta que tenga la estructura y el suelo natural cuando se someten a cargas transitorias.

Se acepta que en lo general la mayoría de los materiales involucrados en los pavimentos experimentan comportamiento plástico a un cierto nivel. Sin embargo, cuando su resistencia es muy superior comparada con las cargas aplicadas, y cuando estas últimas son muy repetitivas, se generan deformaciones que en su gran mayoría se recuperan al ser removidas las cargas; lo que es más, la deformación recuperada se puede considerar proporcional a las cargas, suponiendo así un comportamiento más o menos elástico.

La Fig. VI.1 esquematiza este concepto:

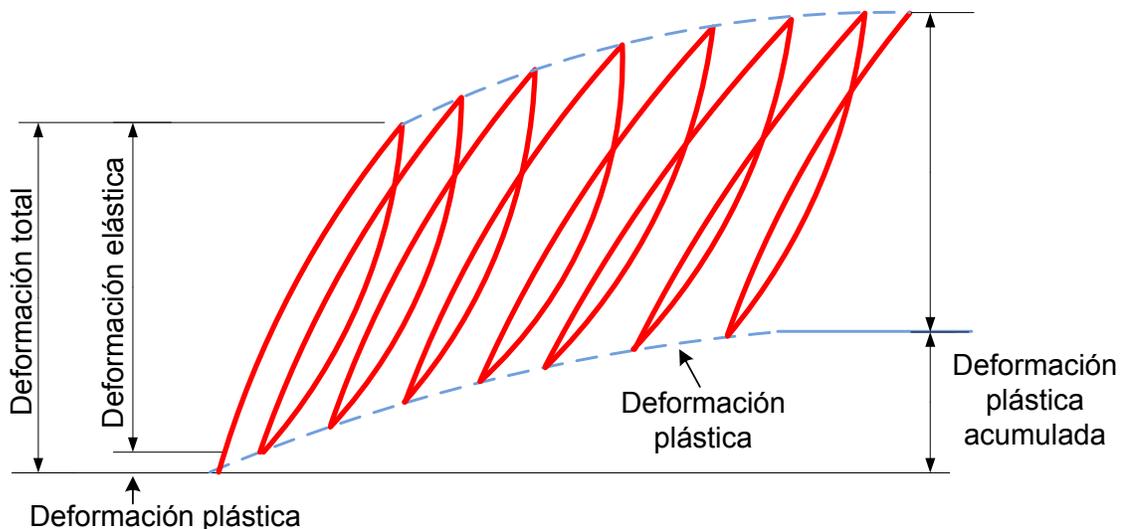


Fig. VI.1 Deformaciones bajo cargas repetidas

Según se aprecia, al inicio de la prueba se pueden generar deformaciones permanentes considerables -porción de la deformación plástica en la figura-. Pero conforme se aplican más repeticiones de carga, las deformaciones permanentes para cada repetición tienden a disminuir, según se desprende de la pendiente de la curva inferior. Después de entre 100 y 200 repeticiones prácticamente toda la deformación es recuperable.

El módulo elástico bajo cargas repetitivas con base a deformaciones recuperadas, o también conocido como de resiliencia, se define como la relación:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Ec. VI. 1

En donde como se sabe, σ_d es el esfuerzo desviador en una prueba triaxial, y ϵ_r la deformación elástica o recuperable. Dado que los niveles de carga que se utilizan en esta prueba son muy bajos, se le considera prueba no destructiva. Es por ello que la probeta de ensaye puede ser usada para varios escenarios de carga y para simular varias condiciones de ambiente. En los siguientes incisos se describe a detalle la prueba.

VI.2 Comportamientos de capas granulares

Por su naturaleza predominantemente granular, cuando se someten a cargas de tráfico las capas de base y subbase exhiben comportamiento elasto –plástico. Cuando se descargan, estos materiales presentan una componente de deformación elástica, y otra componente plástica. Este comportamiento se puede ilustrar mediante la Figura VI.2. En niveles bajos de esfuerzo se manifiestan solamente deformaciones elásticas, una vez que se remueven las cargas. En este estado las rutas de carga y descarga, en términos de deformaciones, son las mismas, y no hay cambios en la dirección horizontal. Ello indica que la entrada de energía requerida para deformar a los sólidos se disipa una vez que se retira la carga (o esfuerzos desviadores en general). Sin embargo, una vez que se incrementan los niveles de esfuerzos, empezarán a manifestarse deformaciones permanentes una vez que se retiren las cargas y después de unos cuantos ciclos histeréticos. En este nivel de esfuerzos, y manteniendo ciclos histeréticos para el mismo nivel de deformaciones ya no producirá deformaciones permanentes. Este es el comportamiento predominantemente elástico. Las deformaciones permanentes en este estado son pequeñas, y se deben a pequeños ajustes, y reacomodos de las partículas sólidas ante la aplicación de las cargas. Estos pequeños corrimientos incluso pueden obedecer al reacomodo del mismo aparato de ensaye en el laboratorio, una vez que se da inicio a la aplicación de cargas. Este comportamiento se esquematiza por la relación lineal esfuerzo – deformación, en donde coinciden en trayectoria las etapas de carga y de descarga. Cuando se incrementa el nivel de esfuerzos entonces se empiezan a desarrollar deformaciones permanentes. Después de un cierto número de ciclos también cesa la generación de este tipo de deformaciones. A este nivel de esfuerzos se le denomina límite de equilibrio plástico. Incluso muchos materiales granulares pueden presentar deformaciones plásticas después del límite de equilibrio plástico; a esta región a veces se le denomina región plástica tipo Creep. Los suelos en el estado plástico y en regiones de creep manifiestan un nivel constante de resiliencia (deformación elástica). En la porción final de la figura se muestra la respuesta del suelo ante deformaciones plásticas de distinta magnitud hasta su falla. En este último estado los agregados sufren fuerte abrasión, trituración y desajustes estructurales dentro de su masa.

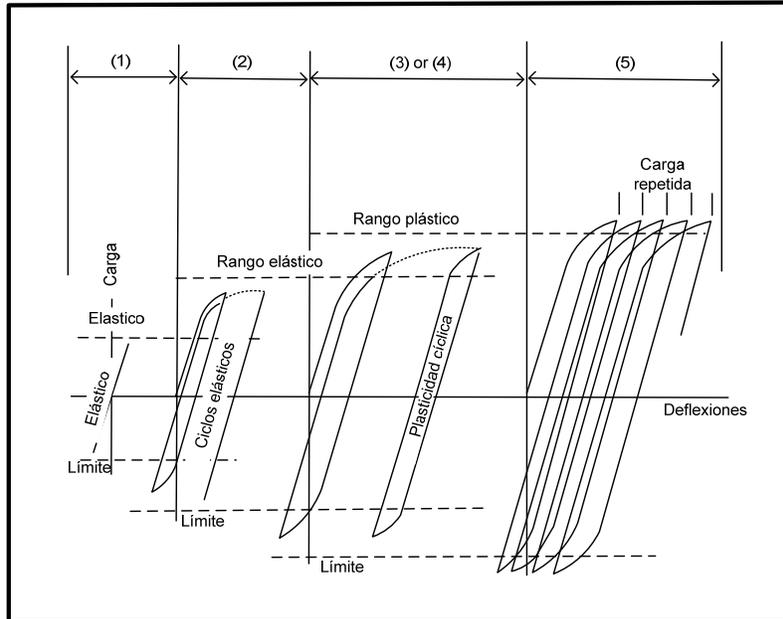


Fig. VI.2: Esquema ilustrativo del comportamiento de bases granulares ante cargas cíclicas (Wermeister, Ref. 9)

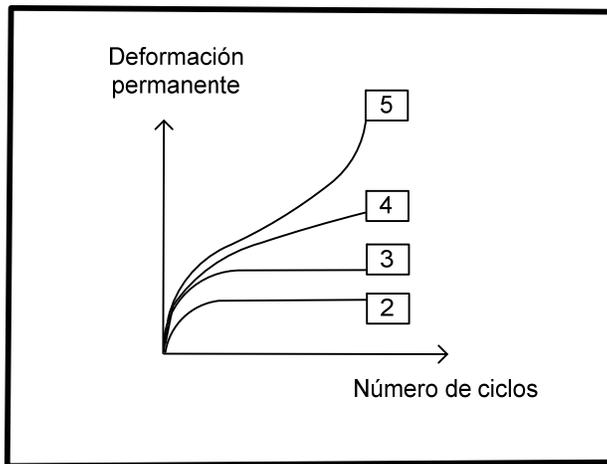


Fig. VI.3: Desarrollo de las deformaciones plásticas para las diferentes regiones de la Fig. VI.2

La Fig. VI.3 muestra en forma esquemática también los diferentes estados de generación de deformaciones plásticas como función de los ciclos de carga, para las regiones 2 a 5.

VI.3 Respuesta elástica

En la ingeniería de pavimentos generalmente se acepta que los rangos de esfuerzos aplicados a las capas granulares de base y subbases son lo suficientemente pequeños como para ser representados por las ramas 2 y 3 de las figuras I.1 y I.2. De esta manera, su comportamiento lo pueden definir

solamente los módulos elásticos, que en este caso se asocian al comportamiento resiliente, o sea, mediante un módulo resiliente, M_R . Algunos métodos de diseño de pavimentos presuponen un comportamiento elástico puro; es decir, suponen un módulo resiliente constante- comportamiento esfuerzo – deformación lineal-. Otros lo suponen variable conforme al nivel de esfuerzos aplicados. En materiales granulares sin cementar incluso se supone un comportamiento isótropo, en donde las propiedades mecánicas de la masa granular son independientes de la dirección considerada. Bajo estas circunstancias estos suelos se pueden caracterizar mediante un módulo resiliente, M_R , y una relación de Poisson. Estos valores se definen más adelante en las ecuaciones VI.3 a VI.4.

El valor M_R se requiere para el cálculo estructural de pavimentos flexibles. Se usa como datos de entradas en análisis multicapas, en métodos mecanicistas de diseño, y en los del tipo semi empíricos como se discute enseguida.

VI.4 Módulo de resiliencia, M_R

El módulo elástico ante cargas cíclicas – o de resiliencia - representativo de cada uno de los materiales que componen a un pavimento, en particular de los del tipo flexible, es un parámetro imprescindible para ser tomado en cuenta en los métodos de análisis o de diseño del tipo mecanicista o formas rigurosas de análisis. Se toma en cuenta tanto en métodos empíricos –por ejemplo la American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, de Estados Unidos de América -. También se introduce en el método del tipo mecanicista que se está ajustando para el método de la Guía de Diseño del 2002 preparada por National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 1-37 A, para pavimentos nuevos y para proyectos de rehabilitación. También en los proyectos de investigación de la Administración de carreteras del mismo país, FHWA por sus siglas en idioma inglés, también utiliza los mismos protocolos de ensaye. El valor de M^R es en sí un valor del módulo elástico para un estado de esfuerzos dados en cada una de las capas que componen al pavimento, así como a cualquier material no cementado. Se define como la relación entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación recuperable o elástica, una vez que dicho esfuerzo se retira del espécimen de prueba.

$$M_R = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_{1,r}} \quad \text{Ec. VI.2}$$

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad \text{Ec. VI.3}$$

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{3,r}}{\varepsilon_{3,r}} \quad \text{Ec. VI.4}$$

Donde:

- σ_d = esfuerzo desviador aplicado
- ε_r = deformación elástica
- σ_1, σ_3 = Esfuerzos principales, mayor y menor, respectivamente

$\epsilon_{1,r}$, $\epsilon_{3,r}$ = Deformación axial mayor y menor, respectivamente

La Fig. VI.4 Muestra un esquema general:

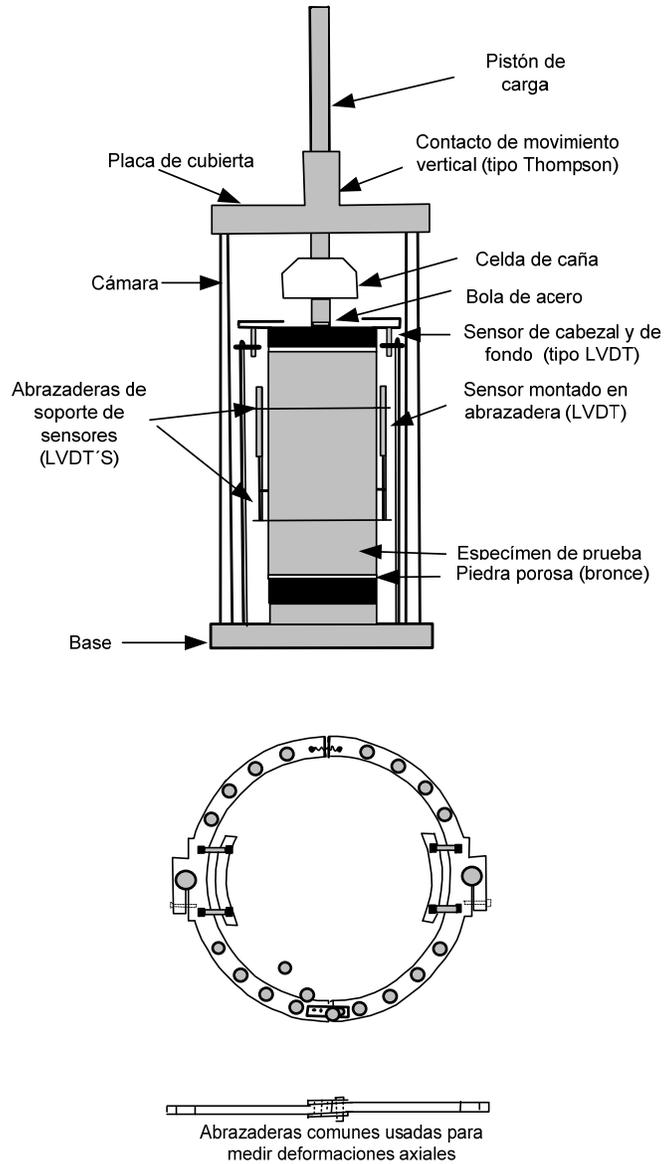


Fig. VI.4 Esquema de la cámara triaxial

Resultados de laboratorios muestran que los valores de M_R se ven influenciados de manera importante por errores de prueba, metodología de la misma y sobre todo en el tipo de muestreo de los materiales. Como se verá más adelante, existen características de las mismas pruebas que promueven el error humano: un mal acondicionamiento de los especímenes, mala aplicación de los esfuerzos, filtraciones en las membranas, niveles de esfuerzo inadecuados, sistemas de medición mediante transductores mal colocados o inestables, excedencia de los límites de rango en los transductores, así como un remoldeo muy severo a niveles de esfuerzo altos.

VI.4.1 La selección de especímenes para los módulos de resiliencia

Una vez en el laboratorio, se pueden seleccionar muestras para el ensaye para determinar el módulo de resiliencia. Se pueden realizar de dos formas: en probetas inalteradas o en muestras representativas. En la primera, como su nombre indica, se ejecutan en muestras libres de remoldeo, en donde se conserva el contenido natural de agua y densidad original del suelo explorado. Para el caso de las probetas representativas, será necesario reproducir probetas para los ensayes. Así, se toma material preparado y previamente cuarteado para compactarlo a diferentes condiciones de compacidad y de humedad, tan cercano como sea posible a las condiciones naturales del terreno detectado en sitio.

Número de especímenes: El número de especímenes de prueba depende de las características del subsuelo explorado, de la complejidad que este último muestre. Las muestras deben tomarse tan cerca de la superficie como sea posible, de preferencia a no más de 0.60 m respecto al nivel del terreno natural. También se deben explorar y ensayar estratos más profundos, y típicos, que puedan incidir en el futuro desempeño del pavimento, sobre todo los suelos del tipo cohesivo. En el caso de que no se cuente con muestras inalteradas en las inmediaciones de la superficie, se procederá a reproducir probetas en el laboratorio de buena calidad, suelos que se parezcan a los suelos naturales y originales de apoyo.

Otro aspecto que se debe considerar en el establecimiento del número de pruebas para módulos de resiliencia. Con base en mediciones ante carga repetidas, es la variabilidad tan alta de los resultados. Se han reportado coeficientes de variación mayores a 25 % para niveles de esfuerzos similares. Esta variación tan alta hace que se requiera que para un proyecto dado hasta dos o tres determinaciones. Como una recomendación mínima se pide que para cada estrato importante que cruce el trazo de la vialidad se ejecuten tres pruebas de módulos de resiliencia. En caso de que estas determinaciones superen un coeficiente de variación de 25 %, para un mismo nivel de esfuerzos, entonces se debe proceder a realizar pruebas adicionales, para lograr un nivel de confianza aceptable.

VI.4.2 Condición de los ensayos de prueba

Se refiere a las características de humedad y de grados de compactación que tienen las muestras a ensayar. La variación de muestras inalteradas de un mismo material a lo largo del eje de trazo, en contenidos de agua y compacidad, hace que se requieran más ensayos de laboratorio. Esta variación puede ser horizontal y vertical. Por otro lado, es común que los contenidos de agua cambien entre la etapa de diseño, la construcción y la vida útil del proyecto. O sea, esto hace que los resultados que se obtengan en una primera etapa, por ejemplo en la etapa de preparación del proyecto, difieran sustancialmente a los que se obtendrían en las primeras etapas de vida útil del pavimento, una vez

que el agua cambia el régimen hidráulico de las capas de apoyo. Esto se debe considerar en la etapa de programación de pruebas.

Los especímenes de prueba se pueden compactar a iguales niveles de peso volumétrico seco, pero con diferentes contenidos de agua. Así, los módulos de resiliencia se pueden obtener para las diferentes condiciones de humedad. En estas pruebas se debe considerar el hecho de que probetas hechas con arcilla, del tipo inalterado, para iguales contenidos de agua y niveles de peso volumétrico seco reproducidos se pueden obtener valores del módulo de resiliencia diferentes; ello se debe al efecto del remezclado y recompactado. Se sabe, por otro lado, el contenido de agua, a partir de ensayos de laboratorio una vez que se recupera la muestra. Sin embargo, la pregunta clave es en qué cuantía cambia tal contenido para los diferentes tiempos o estaciones del año; porque al cambiar tal parámetro también lo hace el citado módulo.

El peso volumétrico seco que se debe utilizar en el espécimen debe ser el mismo que se obtendrá de la capa en cuestión una vez construida en el campo. El tema del contenido de agua a utilizar en el espécimen de prueba es más crítico. Se sabe por ejemplo que para el caso de suelos granulares, tal contenido puede variar de manera estacional, dependiendo la posición de los depósitos granulares, del ingreso del agua vía infiltración superficial, y condiciones de drenaje subterráneo propias de la estructura del pavimento, y régimen de lluvias. En el caso de suelos cohesivos es diferente. El agua incluso puede ascender por capilaridad y aumentar su contenido dentro del depósito, haciendo a este último más débil, e incluso aumentando la humedad por encima de su óptima. Lo anterior conduce al dilema de cuál contenido de agua se debe usar en la preparación de los especímenes. De alguna manera se deben introducir los valores más críticos en el año de los contenidos de agua. Alternativamente se puede optar por el empleo de tales contenidos con base en la experiencia local y conocimiento de la zona.

VI.4.3 Pruebas de laboratorio para el modulo de resiliencia

Relaciones constitutivas

Como ya se mencionó anteriormente, para valuar la resiliencia de los suelos de apoyo se utilizan pruebas del tipo triaxial en donde se aplican cargas repetitivas a compresión. Con este método se busca evaluar la respuesta lineal y no lineal de los especímenes cuando se sujetan a presiones confinantes y desviadoras variables. Así, es posible afirmar que no hay un valor único del módulo a partir de estas prueba; existe una gran variedad de resultados, dependiendo del estado de esfuerzos, o la relación de los mismos – esfuerzos desviadores y confinantes -. Se han presentado varias correlaciones entre esfuerzos y valores del módulo de resiliencia; ellas dependen del tipo de suelos encontrados en el eje de trazo, esto es, si son predominantemente arenas o si se trata de materiales finos. A manera de ejemplo, la Guía de Diseño de la AASHTO acepta las siguientes correlaciones:

Para suelos gruesos:

$$M_R = K_1 (\theta)^{K_2} \quad \text{Ec. VI.5}$$

Donde:

Q = esfuerzo combinado

K₁ y K₂ = constantes de regresión

Para suelos finos:

$$M_R = K_1 (\sigma_d)^{K_3}$$

Ec. VI.6

Donde:

σ_d = Esfuerzo desviador

K₁ y K₃ = constantes de regresión

Más recientemente se han propuesto correlaciones que se utilizan resultados de laboratorio para materiales sin estabilizar y para suelos naturales de apoyo. Algunas de ellas son:

$$M_R = K_1 (\sigma_d)^{K_2} (1 + \sigma_3)^{K_3} \quad \text{Ec. VI.7}$$

Donde:

σ_3 = Esfuerzo confinante

K₁, K₂, K₃ = constantes de regresión

$$M_R = K_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{K_2} \left[\frac{\sigma_d}{P_a} \right]^{K_3} \quad \text{Ec. VI.8} \quad 1.7$$

Donde:

p_a = presión atmosférica

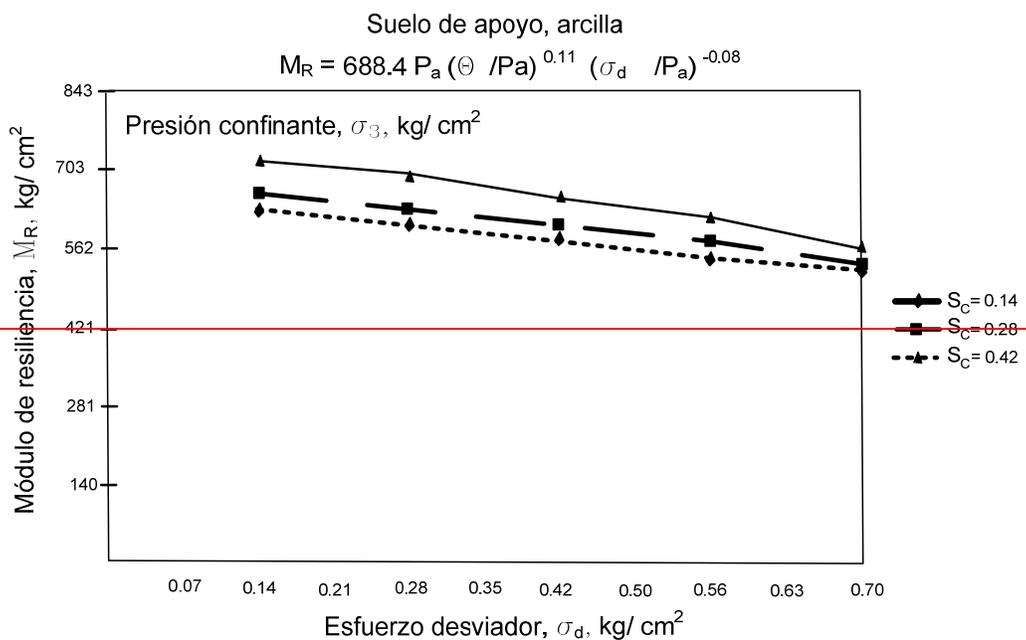
K₁, K₂, y K₃ = constantes y coeficientes elásticos no lineales

Se recomienda el uso de la ecuación VI.8 para representar a datos de laboratorio, ya que ha mostrado coeficientes de correlación muy altos, y se ha aplicado tanto a suelos granulares de pavimentos como a suelos naturales de apoyo.

VI.4.4 Procedimiento de prueba y análisis de resultados

Existen varias fuentes en donde se discute y describe a detalle los procedimientos de prueba para este parámetro. Uno de ellos, de los más completos, es el de la Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long Term Pavement Performance (LTPP) program, SHRP, de Estados Unidos de América. El procedimiento de prueba de esta agencia denominado P- 46 (procedimiento de prueba para determinar el Módulo de Resiliencia para capas granulares para bases/ subbases y para suelos de apoyo) especifica las presiones verticales y confinantes aplicables para representar el estado de esfuerzos representativos en un suelo de apoyo y capas de terracerías provocados por cargas de tráfico en una vialidad.

La Fig. VI.5 presenta un ejemplo de resultados de una muestra de arcillas ante cargas repetidas, mostrando la relación del módulo de resiliencia para varios valores de estados esfuerzos. De la configuración de las curvas mostradas, y mediante análisis de regresión, se pueden obtener las constantes de variación no lineal K1, K2 y K3 de la ecuación VI.8 ya referida.



$$(\text{Kg/cm}^2) \times 484.77 = P_a$$

Fig. VI.5: Ejemplo de carga repetida para módulo de resiliencia, suelo arcilloso

Para cada ensaye se deben investigar los valores elásticos no lineales de los coeficientes y exponentes, de manera que los factores de correlación múltiple (de confianza) sean siempre superiores a 0.90, y de esta manera los resultados sean confiables al aplicar la ecuación VI.8. Todos los valores obtenidos de M_R para suelos y condiciones de especímenes similares se pueden entonces combinar, para proponer valores de K_1 , K_2 y K_3 para estratos principales y a lo largo del eje de trazo, para una caracterización confiable del subsuelo desde el punto de vista geotécnico. Cuando no se obtengan coeficientes de correlación múltiple confiables para un espécimen, esto es, cuando tales valores sean inferiores a 0.90, entonces se deberán revisar los procedimientos de ensayes, y la calidad de las muestras; esto es, verificar la no existencias de remoldeos en muestras. Se revisará

que las membranas con que se preparan los especímenes dentro de la cámara triaxial no presenten fugas de aire que alteren resultados. Si aún persisten errores significativos, entonces se podrá incluso cambiar de correlación constitutiva.

En un caso práctico, se pueden considerar dos escenarios: el primero sería cuando las condiciones del subsuelo son razonablemente uniformes, se puede utilizar un conjunto de valores de los coeficientes K_1 , K_2 y K_3 para todo el tramo de diseño. Por el caso contrario, un segundo escenario sería que hubiese mucha irregularidad. En este caso conviene utilizar para todo el tramo los valores de tales coeficientes que arrojen los valores menores de M_R . Rigurosamente el tramo de diseño podría dividirse en subtramos, en los cuales se caractericen por valores de coeficientes específicos de cada uno de ellos. Ello representaría la asignación de secciones de pavimento diferenciadas, conforme a la naturaleza y resistencia de los suelos apoyos. Lamentablemente este enfoque no siempre es posible seguir, por cuestiones prácticas de construcción, sobre todo. Quizás este enfoque sea más adecuado para el caso de pavimentos flexibles, en donde la construcción puede realizarse por etapas, y de manera programada con el tiempo o vida útil del proyecto. De alguna manera este criterio puede también ligarse con el programa de mantenimiento que se haya también proyectado.

En el laboratorio los parámetros necesarios en la prueba son los siguientes:

Tabla VI.1: Parámetros principales para ensayos de módulo de resiliencia

PARAMETRO	DESCRIPCION	PARAMETRO	DESCRIPCION
Módulo resiliente, M_R	Se determina haciendo varias pruebas con cargas a compresión en suelos sin cementar. M_R es igual al cociente de dividir el esfuerzo desviador máximo axial repetido entre la deformación axial máxima recuperada en el espécimen de prueba	Carga de contacto, P_{contacto}	Carga que se coloca sobre el vástago de carga para que haya un acomodo efectivo entre el cabezal de carga y la muestra
Forma de la onda de carga	La carga por pulso aplicada al espécimen es del tipo casi triangular. Ver Fig. VI.6.	Carga axial cíclica	Es la carga repetida que se aplica al espécimen de prueba $P_{\text{cíclica}} = P_{\text{máx.}} + P_{\text{contacto}}$
Carga aplicada máxima, $P_{\text{máx.}}$	Es la suma de la carga de contacto y la carga cíclica $P_{\text{máx.}} = P_{\text{contacto}} + P_{\text{cíclica}}$	Esfuerzo axial máximo, $S_{\text{máx.}}$	El esfuerzo que representa a la carga máxima aplicado al espécimen: carga cíclica más la de contacto. $S_{\text{máx.}} = P_{\text{máx.}} / A$
Esfuerzo axial cíclico	Esfuerzo axial cíclico (o resiliente) aplicado al espécimen de prueba $S_{\text{cíclico}} = P_{\text{cíclico}} / A$	Esfuerzo de contacto, S_{contacto}	El esfuerzo para mantener un contacto efectivo entre el cabezal de prueba y la muestra $S_{\text{contacto}} = P/A$
S_3	Presión de confinamiento en la cámara triaxial (σ_3)	e_r	Es la deformación axial recuperable, debido a la acción de $P_{\text{cíclica}}$
ϵ_r	Es la deformación axial volumétrica recuperable, por la acción de $P_{\text{cíclica}}$ $\epsilon_r = e_r / L$	L	La distancia entre los dos puntos de medición para determinar la deformación resiliente axial, ϵ_r
Módulo resiliente	$S_{\text{cíclica}} / \epsilon_r$	Duración de carga	Es el lapso en que actúan en la muestra los pulsos por esfuerzos cíclicos

La presión de contacto se debe aplicar de forma que siempre se mantenga una relación de esfuerzos confinantes anisotrópica constante: $(S_{\text{contacto}} + S_3) / S_3 = 1.2$. en esta ecuación $S_3 =$ presión confinante. Los términos fundamentales para obtener el M_R quedan definidos según la Fig. VI.4:

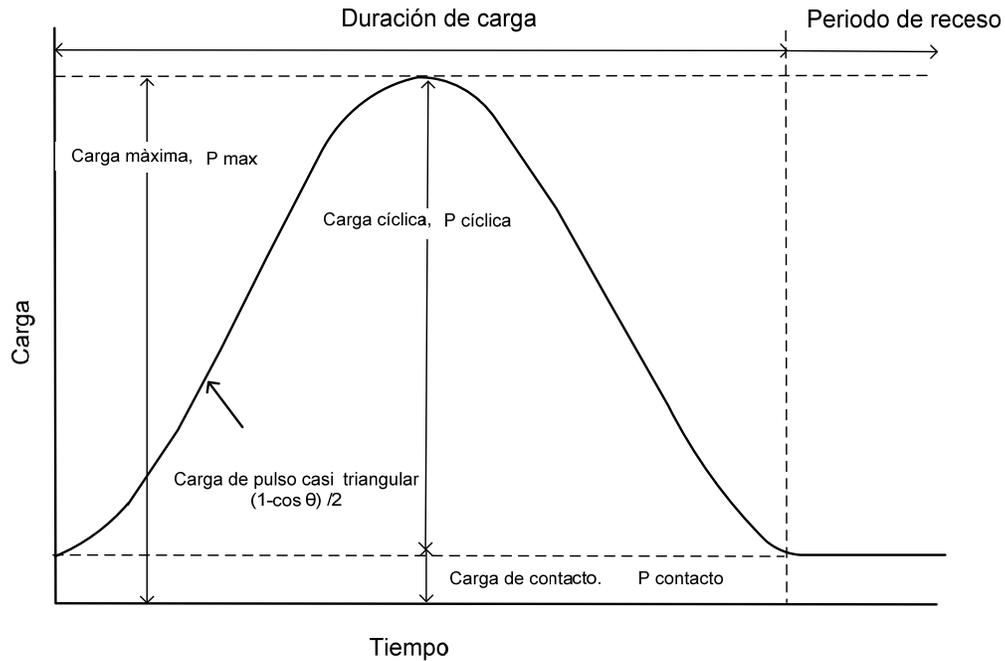


Fig. VI.6 Definición de los términos del módulo de resiliencia (Ref. 3)

Metodología en laboratorio: El detalle de la ejecución de prueba está fuera del alcance de esta publicación. Sin embargo, con el afán de que tener una idea de cómo se realiza este ensaye, y que ello de alguna manera contribuya a la comprensión de esta prueba, y así se pueda justificar su realización para un proyecto muy importante, o bien para poder con juicio un valor con base a correlaciones existentes, tal como se ha presentado por ejemplo como las presentadas en la tabla III.2 del capítulo III.

Esencialmente la prueba consiste en aplicar un esfuerzo axial repetitivo (carga cíclica), de magnitud y duración conocida y uniforme, en una muestra cilíndrica. Se ejecuta en cámara triaxial; en ella se introduce una presión confinante mediante aire. Después de aplicada la carga cíclica se registra la deformación volumétrica recuperada (resiliente). Esta deformación se usa entonces para determinar el módulo de resiliencia.

Las cargas de pulso, triangulares, las aplica un equipo electro- hidráulico, el cual deberá calibrarse continuamente para que la configuración o forma de la carga aplicada sea más o menos la misma durante las operaciones de acondicionamiento y la etapa real del ensaye. La medición de cargas se

hace normalmente con celdas electrónicas, y el registro de deformaciones se hace con transductores electrónicos que se colocan en el interior de las cámaras triaxiales.

Los deformímetros para el registro de las respuestas elásticas, o deformaciones resilientes, se hace con transductores convencionales que rodean al espécimen, o bien extensores ópticos, o sensores sin contacto con la muestra. La selección de los equipos, o aún más, las tolerancias aplicables a cada uno de ellos serán función del tipo de material a ensayar, así como del diámetro de la probeta. 10 cm o 15 cm.

Todo material que presente partículas mayores a 19 mm (3/4") se ensaya en probetas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Las partículas mayores a 25 mm deben removerse. Al contrario, cuando el tamaño máximo de las partículas sea menor a 19 mm, se utilizan especímenes de 10 cm de diámetro y la altura de 20 cm.

Una vez realizadas todas las preparaciones en cuanto a montaje de muestra. Ello incluye el montaje de los dispositivos de medición de deformaciones y de cargas cíclicas dentro de la cámara de ensaye. Se supone que ya la muestra estará correctamente compactada, en el caso de suelos granulares. Luego se procederá a alinear el vástago de carga con la cámara triaxial. Este aspecto es crucial, ya que se deben eliminar excentricidades y fricciones en el dispositivo de aplicación de carga.

Se abren todas las válvulas de drenaje que van conectadas hacia el interior del espécimen. Ello se requiere para poder aplicar en este último las presiones de confinamiento. En esta etapa es cuando se conectan las tuberías de aire para aplicar el confinamiento a la cámara.

Una vez montada y preparada la muestra, se aplica la presión confinante para acondicionar la probeta, de 0.28 kg/cm^2 . Luego se aplica un esfuerzo vertical del 20 % de la presión confinantes, para garantizar que hay buen contacto entre pistón de carga y placa de apoyo en la probeta.

Luego se acondiciona la probeta. Mediante la aplicación de cargas repetidas, del orden de 1,000 repeticiones con un máximo de esfuerzo de 0.60 kg/cm^2 , y que le corresponde una carga cíclica del orden de 0.55 kg/cm^2 , usando pulsos en forma triangular, cada uno de ellos con duraciones de 0.2 seg, y recesos de 0.8 seg. En el proceso de acondicionamiento se cuida que las deformaciones verticales, para estos niveles de carga, no sobrepasen el 5 %. Con ello se pretende cuidar que los ajustes sean los correctos, y que no haya malos ajustes en las áreas de contacto o excentricidades en el vástago o mal alineamiento del espécimen.

La prueba propiamente dicha se realiza mediante la secuencia de cargas que aparece en la tabla No VI.2. Primeramente se abate el esfuerzo axial aplicado a 0.097 kg/cm^2 , y se ajusta la presión de confinamiento a 0.138 kg/cm^2 , según se aprecia en la secuencia 1.

Luego se aplican las 100 repeticiones de carga (pulsos de forma triangular) verificando que la duración de cada aplicación sea de 0.2 seg seguidos de recesos de 0.80 seg. En los formatos de prueba se anotan las respuestas de deformación en cada transductor electrónico montado para los últimos cinco ciclos.

Después se incrementa el esfuerzo axial máximo a 0.193 kg/cm², para una presión de confinamiento de 0.276 kg/cm² (secuencia 2), y se repite el mismo procedimiento y se hacen los mismos registros para este nuevo nivel de esfuerzos.

Se continúa la prueba para cada secuencia, hasta completar la número veinte, anotando las recuperaciones en deformación. Si en un tiempo dado la deformación permanente total excede el 5 %, la prueba se interrumpe, y se prepara el reporte en el formato apropiado.

Tabla No VI.2: Secuencia de prueba para suelos granulares

Procedimiento para suelos de apoyo de tipo granular (35 % < malla No 200)					
Secuencia	Presión de confinamiento Kg/cm ²	Esfuerzo de contacto Kg/cm ²	Esfuerzo cíclico Kg/cm ²	Esfuerzo máximo Kg/cm ²	Número de repeticiones
0	0.28	0.055	0.552	0.607	1,000
1	0.138	0.028	0.089	0.097	100
2	0.273	0.055	0.138	0.193	100
3	0.414	0.083	0.207	0.29	100
4	0.552	0.11	0.276	0.386	100
5	0.828	0.166	0.414	0.58	100
6	0.138	0.028	0.14	0.166	100
7	0.276	0.055	0.276	0.331	100
8	0.414	0.083	0.414	0.497	100
9	0.552	0.11	0.552	0.6621	100
10	0.83	0.155	0.828	0.994	100
11	0.138	0.028	0.276	0.304	100
12	0.276	0.055	0.552	0.607	100
13	0.414	0.083	0.828	0.911	100
14	0.552	0.11	1.104	1.214	100
15	0.828	0.166	1.656	1.822	100
16	0.138	0.028	0.414	0.442	100

17	0.276	0.055	0.828	0.883	100
18	0.414	0.083	1.242	1.325	100
19	0.552	0.11	1.656	1.765	100
20	0.83	0.166	2.484	2.65	100

Cuando se complete la prueba se reduce hasta cero la presión de confinamiento, y se procede a remover la probeta de la cámara. Posteriormente se le determina su contenido de agua.

Método de prueba caso de suelos finos

Para los casos de suelos finos, ya sea en probetas elaboradas mediante compactación o bien muestras inalteradas obtenidas en tubos de pared delgada se procede con otra secuencia y nivel de cargas.

En materiales cohesivos de consistencia rígida a muy rígida (resistencia no drenada, S_u , mayor a 0.36 kg/cm^2) el módulo de resiliencia es mayor a 690 kg/cm^2 . Cuando se ejecuta la prueba las deformaciones axiales se pueden medir directamente en la probeta de ensaye. Estas mediciones se pueden hacer aún cuando los cabezales de los especímenes no sean reforzados con lechada. En algunos casos, dependiendo de la rigidez resultante de las probetas de ensaye, se procede en el laboratorio a corregir los módulos de resiliencia, para tomar en cuenta efectos adversos por un cabeceo no reforzado en las probetas. La corrección se hace mediante un factor correctivo empírico. En arcillas de rigidez baja a moderada ($S_u < 0.36 \text{ kg/cm}^2$) no se requiere la corrección, y se puede reportar el módulo medido directamente de la prueba. El refuerzo por cabeceo, en ambos extremos, se hace con una pasta con cemento especial para este propósito; el cabeceo no debe tener un espesor mayor a 3 mm. La pasta elimina cualquier desperfecto en el recorte o fabricación de los extremos de la probeta. También ayuda a distribuir mejor los esfuerzos repetidos y las deformaciones axiales. El cemento usado requiere un tiempo mínimo de curado de dos horas, para garantizar cierta dureza.

Los detalles de la preparación de la probeta previo al inicio del proceso de carga son muy similares al montaje de una prueba triaxial, haciendo hincapié en que los cuidados se extreman porque es crítica la puesta a punto de los dispositivos de medición y de aplicación de carga atendiendo al tipo de suelo (vástago de aplicación de esfuerzos axiales, y celdas de medición, uso o no de cabeceo, y la adopción de factores de corrección al final).

Acondicionamiento de prueba: Una vez que se abrieron todas las válvulas conectadas a las líneas directas a la muestra, se procede a acondicionar a la probeta de material fino: aplicación de una presión confinante de 0.276 kg/cm^2 , y una presión de contacto en los cabezales de un 20 % de la presión anterior. Ello con el fin de que el pistón de carga siempre esté en contacto con el cabezal de la probeta.

Se inicia el ensaye aplicando 1,000 repeticiones de carga para que represente un esfuerzo axial máximo de 0.538 kg/cm^2 , y un esfuerzo cíclico correspondiente de 0.483 kg/cm^2 , utilizando la carga triangular de pulso con una duración de 0.2 seg, mientras que se aplicarán períodos de receso de carga de 0.8 seg.

Si se alcanza 5 % en la deformación axial permanente en esta etapa de acondicionamiento, la prueba se suspende. Este exceso de deformación puede deberse a una compactación o acomodo de probeta no adecuado, por lo que se deberá repetir el proceso.

Antes de iniciar la secuencia de cargas se debe comprobar que no haya excentricidades Para ello se debe comprobar que las salidas de mediciones de deformaciones sean más o menos las mismas; cualquier desviación se debe corregir en esta etapa.

Se pueden utilizar micrómetros ópticos, y transductores electrónicos en ambos extremos del espécimen: ello contribuirá a comprobar que las deformaciones se manifiesten razonablemente uniformes.

Ahora se aplica la secuencia de carga que aparece en la ya citada tabla VI.3. Se inicia reduciendo el esfuerzo axial a 0.386 kg/cm^2 (Ver secuencia 1 de la ya citada tabla VI.3), y al mismo tiempo situando la presión confinante a 0.552 kg/cm^2 .

Luego se aplican las 1,000 repeticiones de los esfuerzos cíclicos, consistentes en las cargas de pulso, forma aproximadamente triangular, de 0.2 seg de duración seguidos de un lapso de receso de carga de 0.80 seg. Se registran las deformaciones axiales en los transductores de desplazamiento de muestra, en forma separada, en al menos los últimos cinco ciclos.

Siguiendo con la prueba, ahora se reduce el esfuerzo axial máximo a 0.356 kg/cm^2 y se fija la presión confinante a 0.414 kg/cm^2 (secuencia 2 de la tabla No VI.3) y se repite el paso anterior para este nuevo nivel de esfuerzos.

Se continúa para cada una de las secuencias de carga. Se registran las deformaciones axiales que se recuperan. Como en el caso de suelos granulares, si las deformaciones acumuladas permanentes supera el 5 %, entonces la prueba se debe suspender y registrarse en los formatos adecuados.

Al final se desmonta la probeta de la cámara y se determina el contenido de agua a toda la muestra, tal como se describe en la norma AASHTO T 265.

Tabla No VI.3: Secuencia de prueba para suelos finos

Procedimiento para suelos de apoyo de tipo granular (35 % < malla No 200)					
Secuencia	Presión de confinamiento Kg/cm ²	Esfuerzo de contacto Kg/cm ²	Esfuerzo cíclico Kg/cm ²	Esfuerzo máximo Kg/cm ²	Número de repeticiones
0	0.276	0.05	0.483	0.54	1,000
1	0.552	0.11	0.276	0.386	100
2	0.414	0.083	0.276	0.359	100
3	0.276	0.055	0.276	0.331	100
4	0.138	0.028	0.276	0.304	100
5	0.552	0.11	0.483	0.593	100
6	0.414	0.083	0.483	0.566	100
7	0.276	0.055	0.483	0.538	100
8	0.138	0.028	0.483	0.511	100
9	0.552	0.11	0.69	0.80	100
10	0.414	0.083	0.69	0.773	100
11	0.276	0.055	0.69	0.745	100
12	0.13	0.0258	0.69	0.718	100
13	0.552	0.11	0.966	1.076	100
14	0.414	0.083	0.966	1.049	100
15	0.276	0.055	0.966	1.021	100

16	0.138	0.028	0.966	0.994	100
----	-------	-------	-------	-------	-----

Existe una secuencia de carga y descarga particular para el caso de suelos que conforman las capas base y subbase. Estos procedimientos son similares a los hasta aquí descritos. La idea es mostrar al lector, mediante esta descripción, el tipo de ensayos, que puede ser laborioso, para determinar el módulo de resiliencia, M_R .

La captura de información, sobre todo en el laboratorio, de preferencia debe ser automatizado, con equipo computarizado para captura y procesamiento de datos y diseñado para tal propósito. Ello se justifica si se piensa en que las últimas deformaciones axiales, correspondiente a los últimos cinco ciclos de carga en cada secuencia, servirán para calcular en tales ciclos el M_R , para después promediar resultados.

El cálculo del módulo de resiliencia para cada etapa será como sigue:

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta - 3k_6}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + k_7 \right)^{k_3} \quad \text{Ec. VI.9}$$

Donde: $k_1, k_2 \geq 0$

$k_3, k_6 \leq 0$

$k_7 \geq 1$

M_R = módulo de resiliencia

Θ = Esfuerzo total = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

τ_{oct} = esfuerzo cortante octaédrico

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

En donde: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Esfuerzos principales

K_i = constantes de regresión

P_a = presión atmosférica,

En esta ecuación de forma inicial se asignan valores de 0 y 1 para k_6 y k_7 , respectivamente, En el reporte se deben indicar los valores de las constantes de regresión k_1, k_2, k_3, k_6 y k_7 . Dentro de los formatos de laboratorio se incluyen estas constantes y se valúan para cada secuencia de carga, y siguiendo el modelo de cálculo. También se debe reportar el cociente del error estándar estimado entre la desviación estándar, así como los cuadrados de los coeficientes de correlación. Estos valores normalmente se obtienen de programas de cómputo diseñados para este propósito, y se encuentran en forma comercial.

Es interesante hacer notar que por ejemplo para el caso de arcillas, cuando se varían los esfuerzos actuantes, la variación de la presión de poro o del agua en el interior de la masa de suelo es función también de los esfuerzos octaédricos (Ref. 7). En efecto, la presión de poro, Δu , es función del promedio de la variación de los esfuerzos normales y de la variación de los esfuerzos cortantes, de la siguiente forma:

$$\Delta u = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} + a/3 \Delta[\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}] \quad \text{Ec. VI.10}$$

En la ecuación VI.10 “a” es un parámetro que depende del grado de consolidación de la arcilla, y mide la contribución de los esfuerzos cortantes al desarrollo de la presión de poro o de agua dentro de la masa de suelo. En estas expresiones los esfuerzos cortantes son los octaédricos.

VI.4.5 Medición en el Lugar del Módulo de Resiliencia

Para determinar el módulo de resiliencia (o elástico) en el lugar, a partir de la prueba de cargas repetidas en triaxial de laboratorio, se debe conocer las presiones reales tanto vertical como horizontal, incluyendo la presión de tierras en reposo. Para tener idea de estos valores, a su vez se deben suponer o estimar de manera inicial los pesos volumétricos y los espesores de las capas de la estructura del pavimento. En lo que sigue se proporciona una secuencia para obtener el módulo de resiliencia que representa al estado de esfuerzos propio del lugar motivo de estudio.

VI.4.5.a Se determina el coeficiente de tierras en reposo, para materiales cohesivos (tales como limos muy plásticos y arcillas), el coeficiente de tierras en reposo, K_0 normalmente se considera función de la relación de Poisson, ν , como:

$$K_0 = \frac{\nu}{(1-\nu)} \quad \text{Ec. VI.11}$$

Para materiales no cohesivos (gravas y arenas) el valor del coeficiente de tierras en reposo, K_0 , es función del ángulo de fricción interna, Φ .

$$K_0 = 1 - \text{Sen } \Phi \quad \text{Ec. VI.12}$$

Cuando la carga de prueba o la carga que representa la llanta se aplica al pavimento, este último tiende a deformarse, y la presión resultante en el suelo se aproxima a una máxima, que se conoce como presión pasiva de tierras. El coeficiente de tierras en este estado límite de equilibrio dentro de la masa de suelos es:

$$Kp = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + \frac{2c}{\sigma_z} \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{Ec. VI.13}$$

Donde: σ_z = esfuerzo vertical total
C = cohesión del suelo, kg/ cm²

Dado que en ingeniería de pavimentos las acciones son moderadas y aún ligeras, se utiliza más bien el coeficiente de empuje de tierras en reposo, K_0 . Ello se debe a que las deformaciones a nivel de terreno natural son moderadas, por la naturaleza del nivel de carga que representa a las llantas móviles. En los casos en que haya evidencias de que las cargas por eje sencillo son muy grandes, superiores a 8 ton, aplicadas en estructuras de pavimento muy ligeras (bases de materiales granulares sin estabilizar menores a 20 cm de espesor, y superficies de rodamiento menores a 2.5 cm de espesor, todo apoyado en terrenos de apoyo sin estabilizar) se podrían utilizar en los análisis estructurales de pavimentos los valores del coeficientes pasivos de tierra, que propiamente refleja un estado de falla plástico, esto es, refleja a condiciones últimas.

VI.4.5.b Se procede a calcular la presión lateral de tierras, σ_3 :

$$\sigma_3 = \sigma'_3 + P_o \quad \text{Ec. VI.14}$$

Donde:

$$P_o = K_0 (E_s \gamma_s + E_p \gamma_p)$$

σ'_3 = Esfuerzo lateral calculado con la teoría elástica, cuando se aplica una carga sobre la superficie del pavimento.

P_o = Presión de tierras en reposo a 0.50 m dentro de la capa de apoyo. Para condiciones uniformes es común utilizar 0.50 m. Sin embargo, si existen condiciones variables de estratigrafía, y esta última se puede considerar formada de dos estratos, se debe considerar la profundidad media entre la capa superior y 0.50 m ya dentro del estrato inferior.

K_0 = coeficiente de tierras en reposo

E_s = espesor dentro del suelo de apoyo

γ_s = peso unitario del suelo de apoyo

E_p = Espesor total de la estructura del pavimento, incluyendo espesor estabilizado de terreno de apoyo, caso de que haya.

γ_p = peso unitario promedio bruto de toda la estructura del pavimento incluyendo espesor estabilizado de terreno de apoyo, caso de que haya.

VI.4.5.c Cálculo del esfuerzo desviador In Situ, σ_d :

$$\sigma_d = \sigma'_d + P_o (k_o^{-1} - 1) \quad \text{Ec. VI.15}$$

Donde:

σ'_d = Esfuerzo desviador calculado a través de la teoría elástica en la condición de aplicar la carga de una llanta en la superficie del pavimento

VI.4.5.d Cálculo del esfuerzo total In Situ, Θ :

$$\theta = \sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z + \llbracket 1 + 2 k_o \rrbracket [E_s \gamma_s + E_p \gamma_p] \quad \text{Ec. VI.16}$$

Donde: s_1, s_2, s_3 = Esfuerzos normales calculados mediante la teoría elástica en las direcciones horizontal (transversal y longitudinal) y vertical, para cuando se aplica una carga de llanta sobre la superficie del pavimento.

VI.4.5.e Se determina el módulo de resiliencia In Situ.

Si se sustituyen las ecuaciones VI.15 y VI.15 dentro de la ecuación VI.8 se obtiene el módulo de resiliencia para un suelo de apoyo en particular. De esta manera, es posible calcular un módulo de resiliencia para cada uno de los estratos principales. Par el caso en donde haya fuerte variación en la estratigrafía en la dirección vertical, entonces el citado módulo puede valorarse para cada depósito principal. Si por ejemplo se estima un módulo pequeño cercano a la superficie, entonces se puede utilizar tal valor para el diseño, para usar un criterio conservador. Por otro lado, si se obtiene un valor algo grande en la superficie, comparado con otras profundidades, entonces se puede considerar tal valor de manera separada, al igual que el otro valor pequeño. Teniendo los dos valores extremos, se puede utilizar el criterio de rigidez equivalente, de manera que se disminuya el valor máximo, hasta un valor razonable que pueda ser representativo de todos los estratos explorados importantes. Se pondera de la siguiente manera:

$$M_R(\text{equivalente}) = \frac{D_{s1}^3 M_{R1} + D_{s2}^3 M_{R2}}{(D_{s1})^3 + (D_{s2})^3} \quad \text{Ec. VI.17}$$

VI.4.5.f Determinación del M_R de diseño

Aspectos climáticos (estacionales)

Tal como se ha mencionado en párrafos anteriores, el valor del módulo de resiliencia es muy sensible al contenido de agua. En términos generales se puede afirmar que el contenido de agua puede variar de manera importante durante la vida útil del pavimento; así, en zonas bajas, con pocos dispositivos para el desalojo de agua, o drenaje deficiente en general, es muy probable que ahí se manifiesten efectos nocivos por agua excesiva. En zonas sujetas a congelamiento este aspecto adquiere mayor relevancia, pues en el deshielo durante primavera el contenido de agua libre entre los poros de la estructura del pavimento, con las consecuencias negativas que ello conlleva. Las variaciones del

contenido de agua serán más o menos pronunciadas, para unas mismas condiciones climáticas, dependiendo también de la naturaleza de los suelos originales de apoyo. El aspecto de varianza en el valor de M_R se toma en cuenta dentro de la metodología de la AASHTO con un valor adecuado y promedio pesado dentro de la ecuación de diseño para cada tipo de pavimento. Se debe tener claro, sin embargo, que durante el año se pueden tener variaciones sustanciales del referido módulo, por las condiciones climáticas que pueden manifestarse.

La referencia de la AASHTO permite dos formas de considerar la variación del MR. En uno se permite que en el laboratorio se establezca la correlación entre el MR para diferentes contenidos de agua. Así, para diferentes estaciones del año, y supuestamente conociendo la variación de tal contenido, se puede proponer un valor del módulo. Desde luego, otra vez, el problema principal de este enfoque es que no se puede predecir con certeza o con mucha confianza la variación del contenido de agua para las diferentes estaciones o meses del año. Para establecer una correlación confiable, pues, se requiere un programa muy extenso de laboratorio. Una segunda alternativa para estimar el valor del MR es mediante una derivación a partir de medición de deflexiones obtenidas en la superficie, con dispositivos para tal propósito. Con estos métodos se obtienen cuencas de deflexiones, y mediante algoritmos matemáticos es posible inferir, de manera indirecta, espesores y parámetros elásticos de las capas de apoyo. Las técnicas de cálculo inverso, que es en lo que consiste ésta última alternativa, ofrece las ventajas de que se pueden realizar con facilidad y con frecuencias satisfactorias; de esta manera se pueden estimar valores para diferentes estaciones del año. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las ecuaciones de la metodología de la AASHTO contemplan valores de dicho módulo obtenidos directamente del laboratorio. Es por ello que se requiere ajustar de alguna manera los valores de MR obtenidos mediante mediciones In Situ a través de deflexiones o cálculo inverso. Los cálculos de MR de campo se deben afectar por un factor correctivo $[(MR \text{ laboratorio} / E (FWD))]$. Se intenta, mediante esta medida, trasladar el valor de campo a un valor aproximado de laboratorio. Si se utilizara dentro de la ecuación de la AASHTO el valor obtenido en campo mediante cálculo inverso y sin afectarlo por el factor de ajuste, se obtendrían valores deficientes de la estructura del pavimento. La deficiencia sería más que nada para criterios de niveles de servicio.

La correlación o factor de ajuste para el valor calculado del módulo elástico equivalente para las terracerías o terraplenes, con base a mediciones de deflexiones con FWD, depende del tipo de suelos por encima del terreno de apoyo. En la tabla VI.4 se muestran valores de correlación “C” para convertir los módulos elásticos calculados de campo, de cuencas de deflexiones, a módulos de resiliencia, MR, como si hayan sido medidos en laboratorio. Estos últimos en la modalidad de cámara de compresión triaxial con cargas repetidas, para un estado de esfuerzos equivalentes In Situ.

Tabla VI.4: Valores de conversión “C”, módulo de resiliencia

Tipo de materiales en el pavimento	Valor medio de C	Coefficiente de variación, %
Suelos naturales por debajo de suelos de apoyo ya	0.75	13

estabilizados		
Suelos naturales bajo un pavimento sin base granular, sin subbase ni estabilización en capa de apoyo	0.52	37
Suelos de apoyo bajo un pavimento que cuenta con base granular y /o subbase, pero sin una capa de terreno natural estabilizada	0.35	49

Los valores de C (ajustes para los módulos de capa elásticos de los suelos naturales inferidos mediante cálculo inverso) se determinaron utilizando espaciamientos de sensores propuestos de forma estandarizada por la SHRP de Estados Unidos de América, (0, 0.20, 0.30, 0.50, 0.60, 0.90, 1.50 m). Se supone que cualquier desviación respecto a este arreglo necesariamente introducirá un efecto en los valores de “C” . Sin embargo, en diferentes aplicaciones prácticas se ha encontrado una variación moderada, del orden de 15 %, para otro arreglo que se utiliza también comúnmente, esto es, sensores con espaciamientos iguales de 0.30 m.

VI.4.6 Módulo de resiliencia efectivo en capa de apoyo – Criterio de servicio

A diferencia de otros métodos de diseño, la metodología propuesta por la AASHTO sugiere el empleo de un valor de promedio pesado a ser usado en el módulo de resiliencia para diseño. En este método se introduce el concepto de daño relativo, U_f , para cada uno de los módulos estacionales. Las correlaciones propuestas por la guía de diseño de la misma Asociación:

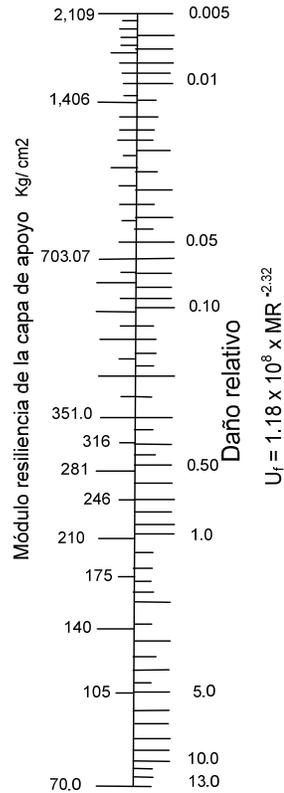
$$U_f = 1.18 \times 10^8 \times M_R^{-2.32} \quad \text{Ec. VI.18}$$

Donde: U_f = daño relativo con base en el criterio de diseño por Servicio

M_R = Módulo de resiliencia de la capa de apoyo

En la Fig. VI.7 se presenta el cálculo del MR efectivo para un suelo de apoyo propuesto por la AASHTO, que se basa exclusivamente en el criterio de nivel de servicio. Sin embargo, el diseño se debe apoyar siempre en una caracterización racional para introducir los parámetros correctos dentro de la ecuación VI.18, basada en condiciones de nivel de servicio, o sea, siempre se trata de representar las condiciones más débiles del terreno. El solo uso de la Fig. VI.7 puede conducir a secciones estructurales insuficientes del pavimento, independientemente del tipo de este último, flexible o rígido.

Mes	Módulo del suelo de apoyo M_R (kg/cm ²)	Daño relativo U_f
Enero		
Febrero		
Mayo		
Abril		
Mayo		
Junio		
Julio		
Agosto		
Septiembre		
Octubre		
Noviembre		
Diciembre		
Suma	$\sum U_f$	



$$\bar{U}_f = \frac{\sum U_f}{n}$$

MR = Módulo resiliente efectivo (psi) = 5,000 (352 kg/cm²), corresponde a \bar{U}_f
 En la ecuación del eje vertical, ecuación para u_f , M_R se debe introducir en psi)
 PSI: libras entre pulgada cuadrada

Fig. VI.7: Carta para estimar el módulo de resiliencia efectiva para pavimentos flexibles diseñados utilizando criterio de servicio.*

VI.4.7 Módulo de resiliencia de diseño del terreno de apoyo. Criterio de roderas

Con objeto de proteger a la capa de apoyo de la formación de roderas plastificaciones, se pueden utilizar factores de daño por deformaciones permanentes. Las roderas pueden formarse en el terreno natural debido a cambios fuertes en los contenidos de agua a lo largo del eje de trazo de la vialidad.

Se pueden utilizar ecuación VI.19, para definir un módulo de resiliencia equivalente por año o de diseño de la capa de apoyo que se base en deformaciones plásticas.

$$U_{rz} = 4.022 \times 10^7 [M_R]^{-1.962} \quad \text{Ec- VI.19}$$

$$M_R (\text{diseño}) = \sum_{i=1}^j \frac{(M_{Ri})(U_{RSi})}{(U_{RSi})} \quad \text{Ec. VI.20}$$

Donde: U_{RSi} = factor de daño basado en criterio de deformación vertical a compresión durante la estación "i"
 M_{Ri} = Módulo de resiliencia para el terreno natural en la estación "i"
 J = número de estaciones en el año

Las ecuaciones VI.19 y VI.20, que sirven para evaluar el valor del módulo de resiliencia para minimizar roderas en suelo de apoyo, normalmente arrojan valores menores que los módulos MR obtenido con la Fig. VI.7, para obtener el citado módulo resiliente efectivo del terreno de apoyo, que como ya se dijo, considera condiciones de servicio. De esta manera, el diseño de pavimentos flexibles con base a criterios de niveles de servicio se debe verificar utilizando el criterio de deformaciones verticales por compresión. Ver la ecuación VI.21:

$$\text{Log } N = 0.955 (\text{Log } M_{R \text{ diseño}}) - 4.082 (\text{Log } \epsilon_v) - 10.90 \quad \text{Ec. VI.21}$$

Donde: N = número de repeticiones de carga para un peso por eje determinado, configuración y presión en la llanta
 ϵ_v = Deformación a compresión vertical en la superficie de la capa de apoyo

Esta ecuación se desarrolló para limitar las roderas en la superficie a 13 mm. Se supone además que las capas del pavimento contarán con capas cuyo espesor limitarán las deformaciones verticales, definidas estas últimas según la prueba triaxial en donde se aplican cargas repetidas. Los pesos específicos secos y contenidos de agua que se utilicen en las pruebas deben ser aquellos esperados a lo largo de la vida del proyecto, y no durante la construcción.

Ejemplo VI.1:

Para determinar el módulo de resiliencia de diseño

A continuación se ilustra una forma de determinar el módulo de resiliencia de diseño para un caso práctico. Se trata de mostrarlo paso a paso, de manera que se esquematice la secuencia dada anteriormente.

Como un criterio general, se debe realizar una investigación geotécnica para definir los estratos principales en el eje de trazo. Se obtendrán muestras para medir la resiliencia en el laboratorio. Una vez investigado el subsuelo, se puede entonces calificar diferentes tramos, atendiendo a sus

características definidas. Para fines del ejemplo, se supondrá que existe una capa uniforme de 5.50 m de una arcilla expansiva, que se encuentra subyugada por una toba rígida. El peso volumétrico representativo de este material es de 1.68 ton/m³.

Enseguida se seleccionan especímenes de prueba de cada estrato principal en donde se determinarán los valores de MR.

Se ejecutan los ensayos de laboratorio para determinar los MR. Supóngase que se realizaron siete ensayos en muestras inalteradas obtenidas mediante tubos de pared delgada dentro de los primeros 2.50 m de profundidad; luego se realizaron un total de tres pruebas en probetas obtenidas a profundidades comprendidas entre 3 y 7 m. Los resultados de las constantes determinadas se resumen en la tabla No EVI.1:

Tabla EVI.1: Resumen de resultados en cámara de compresión triaxial, cargas repetidas.

Número de probeta	Profundidad de probeta (m)	Constantes elásticas no lineales (Ecuación VI.5)			Coeficiente de correlación múltiple
		K ₁	K ₂	K ₃	
1	0.15 - 0.30	298	0.12	-0.30	0.98
2	1.2 - 1.4	321	0.18	-0.39	0.91
3	0.9 - 1.1	350	0.10	-0.41	0.95
4	1.8 - 2.0	289	0.15	-0.32	0.92
5	0.6 - 0.8	316	0.20	-0.42	0.95
6	1.4 - 1.5	331	0.14	-0.38	0.97
7	0.3 - 0.45	283	0.23	-0.35	0.91
8	4.4 - 4.6	363	0.11	-0.40	0.94
9	1.2 - 3.4	311	0.14	-0.31	0.98
10	3.7-3.8	324	0.17	-0.32	0.93
Resultados ponderados		329	0.16	-0.38	0.81

a) En esta etapa se determina el módulo de resiliencia In Situ.

a.1) Antes que nada se determina el coeficiente de presión de tierras en reposo para el material de apoyo, que como ya se dijo, es de naturaleza cohesiva. Se supone además que la relación de Poisson es de 0.45.

$$\begin{aligned}k_o &= \nu / (1 - \nu) \\ &= 0.45 / (1 - 0.45) \\ k_o &= 0.818\end{aligned}$$

a.2) Se procede a calcular el esfuerzo lateral In Situ para una estructura de pavimento dada. En el ejemplo supóngase que se tiene un espesor de carpeta asfáltica de 15 cm con un MR de 17,576 kg/cm² (1724 Mpa) en los meses más calientes, y 25 cm de una base granular con un MR de 2,460 kg/cm² (241 Mpa).

El peso volumétrico del concreto asfáltico es de 2.37 ton/ m³, mientras que el de la capa granular es de 2.11 ton/ m³. El promedio pesado del peso volumétrico es de:

$$\gamma = \frac{(2.37 \times 0.15) + (2.11 \times 0.25)}{0.15 + 0.25, m}$$

$$\gamma = 2.21 \text{ ton/m}^3$$

La presión lateral de tierras en condición de reposo es:

$$P_o = k_o (E_s \gamma_s + E_p \gamma_p)$$

$$P_o = 0.818 (0.458 (2.114 \text{ ton/m}^3) + 0.4 (2.37 \text{ ton/m}^3))$$

$$P_o = 0.818 (1.916 \text{ ton/m}^2) = 1.567 \text{ ton/ m}^2$$

El esfuerzo lateral mínimo se calcula mediante la teoría elástica de capas para un eje sencillo cuya carga sea de 80 KN para una profundidad de 0.50 m dentro de la capa de apoyo, esto es, en la capa que subyace a la estructura del pavimento:

$$\sigma'_3 = 2.5 \text{ ton/m}^2$$

De esta manera, el esfuerzo lateral total In Situ es de:

$$\sigma_3 = \sigma'_3 + P_o$$

$$\sigma_3 = 4.067 \text{ ton/ m}^2$$

a.3) Cálculo del esfuerzo desviador In Situ para la estructura de pavimento supuesta. Antes que nada se determina el esfuerzo desviador con la teoría de capas elásticas para una carga de eje sencillo de 80 KN y a 0.50 m de profundidad dentro de la capa de apoyo:

$$\sigma'_d = \sigma_z - \sigma_x$$

Los valores de los esfuerzos principales mayor y menor σ_z y σ_x una vez determinados arrojan:

$$\sigma'_z = 0.583 - 0.33, \text{ kg/cm}^2$$

También, el esfuerzo desviador:

$$\sigma_d = \sigma'_d + P_o (k_o^{-1} - 1)$$

$$\sigma_d = 0.33 + 0.156 (0.818^{-1} - 1)$$

$$\sigma_d = 0.36 \text{ kg/ cm}^2$$

a.4) Cálculo del módulo grueso o total In Situ:

$$Q = \sigma'_x + \sigma_y + \sigma'_z + [1+ K_o] [E_s g_s + E_p g_p]$$

$$Q = (- 0.25) + 0.0984 + 0.583 + [1+ 2 (0.818)] [0.1645]$$

$$Q = 0.4314 + [0.4336] = 0.864 \text{ kg/ cm}^2$$

Determinación del M_R In Situ:

$$M_R = K_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\sigma_d}{P_a} \right]^{K_3}$$

$$M_R = 329 (1.033) \left[\frac{0.864}{1.033} \right]^{0.16} \left[\frac{0.36}{1.033} \right]^{-0.38}$$

$$M_R = 339.857 (0.97182) (1.492) = 492.84 \text{ kg/ cm}^2$$

a.5) Finalmente se calcula el módulo de resiliencia de diseño

a.5.1) Para ilustrar el efecto de los cambios en los módulos atendiendo a los cambios climáticos y ambientales de forma estacional durante un año, se supone que se conocen los módulos derivados de medición de deflexiones. Una manera rigurosa de analizar los valores de M_R es mediante la calificación de los valores de M_R por cada mes. Sin embargo, por simplicidad se supone que durante un mes el terreno estará muy saturado, de manera que solamente el 60 % del valor original medido

de MR. Y se supone además en dos de los meses del año el material algo se secó, y alcanza ya el 80 % del valor determinado del MR. De esta manera, la distribución de valores durante el año es de:

Tabla EVI.2: Valores de M_R del ejemplo

CONDICIÓN DEL TERRENO	PERÍODO, meses	VALOR DE M_R Kg/ cm ² (lb/pulgada cuadrada)
Saturado	1	296.48 (4,217)
Algo seco	2	395.26 (5,622)
Condición normal	9	492.84 (7,028)

a.5.2) Para el cálculo del módulo de resiliencia efectivo de la vialidad conforme a la metodología de diseño propuesta por la AASHTO se emplea el criterio de nivel de servicio:

(Ver figura de nomograma, Fig. VI.7)

$$U_f = 1.18 \times 10^8 (M_R)^{-2.32}$$

Sustituyendo valores de M_R , se obtiene lo siguiente:

Tabla EVI.3: Valores de U_f

M_R , kg/cm ²	U_f
492.84	66.80
395.26	111.458
296.48	217.196

$$U_f = \frac{\sum U_f}{n} = \frac{9(66.804) + 2(111.458) + 1(217.19)}{12}$$

$$U_f = 86.77$$

De esta manera, la desigualdad quedaría:

$$\frac{86.77}{1.18 \times 10^8} = M_R^{-2.32}$$

$$M_R = (7.35 \times 10^{-7})^{-0.431034}, \text{ en kg/cm}^2$$

$$M_R = 440.4 \text{ kg/cm}^2$$

Este valor es únicamente atendiendo al criterio de nivel de servicio, y es el que se utilizaría en el método de diseño de la AASHTO para pavimentos flexibles.

a.5.3) Ahora se determina el módulo de resiliencia de diseño, pero empleando el criterio de roderas.

$$U_{rz} = 4.022 \times 10^7 [M_R]^{-1.962}$$

Así, estos valores serían:

$M_R, \text{ kg/cm}^2$	U_{rs}
492.84	209.58
395.26	323.11
296.48	568.05

$$M_R(\text{diseño}) = \sum \frac{(M_R)(U_{rs})}{U_{rs}}$$

Sustituyendo valores:

$$M_R(\text{diseño}) = \frac{9(492.84)(209.58) + 2(323.11)(395.26) + (1)(296.48)(568.05)}{(9)(209.58) + (2)(323.11) + (1)(568.05)}$$

$$M_R(\text{diseño, por roderas}) = 436.52 \text{ kg/cm}^2 \quad (6,208.77 \text{ lb/pulgada}^2)$$

Al final se calcula, mediante la teoría elásticas por capas, la deformación vertical en el plano superior de la capa de apoyo inducida por una carga por eje sencillo de 80 KN.

$$vv = 4.28 \times 10^{-4} \text{ cm/cm}$$

El número de aplicaciones permisibles de cargas por eje sencillo de 80 KN es entonces:

$$\text{Log } N = 0.955 (\text{Log } M_R \text{ diseño}) - 4.082 (\text{Log } vv) - 10.90$$

$$\text{Log } N = 0.955 [\text{Log } (6,208.77) - 4.082 \text{ Log } (4.28 \times 10^{-4}) - 10.90]$$

$$\text{Log } N = 6.4723$$

$$N = 2,966,880$$

Por ejemplo, si el número de ejes sencillos equivalentes de 80 KN es menor al de N, entonces se puede presumir que las deformaciones plásticas en el pavimento serán tolerables; no así cuando el número previsto en el proyecto de aplicaciones de tales ejes es mayor, entonces en teoría la estructura sería deficiente. En esta última circunstancia, conforme a la metodología de diseño de la AASHTO se requiere aumentar la sección estructural.

VI.5 Influencia de la humedad

El contenido de agua presente en las muestras para obtener el valor de MR tiene de alguna manera incidencia en los resultados. En algunas investigaciones se ha encontrado que algunas variaciones en dicho contenido implica que los grados de saturación, en el caso particular de capas granulares base y subbase, sean moderados. Dichos grados están casi siempre entre 3 % y 10 %, lo cual representa que sea incluso más del 50 % por debajo de del grado de saturación que corresponde al contenido de agua óptimo (Ref. 6, Witczak et al). Algunas instituciones (ASSHTO guide, 2002) proponen de manera preliminar han el grado de saturación como un modelo de predicción del módulo de resiliencia. El cambio en MR y en los contenidos de agua, según estos enfoques tendría la forma siguiente:

$$\text{Log } \frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b-a}{1+\text{Exp } (\beta+k_s - (S-S_{opt}))} \quad \text{Ec. VI.22}$$

M_R = modulo resiliente para un grado de saturación S (en decimales). Es el valor que se pronostica)

M_{Ropt} = módulo resiliente a su PVSM y humedad óptima

PVSM = peso volumétrico seco máximo

Los valores de VRS se estiman a partir de la ecuación:

$$M_{Ropt} = 2555 \cdot (\text{VRS})^{0.64}$$

Y también usando la tabla No EVI.1 :

S_{opt} = grado de saturación en su PVSM y humedad óptima

a = mínimo de la relación $\text{Log } (M_R / M_{Ropt})$

b = máximo de la relación $\text{Log } (M_R / M_{Ropt})$

β = parámetro de localización, obtenido como una función de a y b, imponiendo una condición de intercepción cero o nula en una escala semilogarítmica.

$$\beta = \ln \left(-\frac{b}{a} \right)$$

K_s = parámetro de regresión

Mediante el uso de información disponible y suponiendo relaciones de módulos de 2.5 y de 2.0 para suelos finos y granulares, respectivamente, se pueden proponer valores de a, b y β para cada uno de los tipos de suelos antes referidos. Estos valores se presentan en la tabla No VI.5:

Tabla No VI.5: Parámetros usados en el modelo para M_R como función del grado de saturación

PARÁMETRO	SUELOS GRANULARES	SUELOS FINOS	COMENTARIOS
a	-0.3123	-0.5934	Parámetro de regresión
b	0.3	0.4	Este valor está supuesto en forma conservadora. Corresponden a valores de relación de módulos de 2 a 2.5)
β	-0.0401	-0.3944	$\beta = \ln (-b/ a)$
ks	6.8157	6.1324	Parámetro de regresión

VI.6 Pruebas en asfaltos, consideraciones generales

El método de prueba involucra aplicaciones de carga repetitivas a lo largo del diámetro del núcleo, y luego a lo largo de una sección diametral perpendicular. Estas pruebas comúnmente se realizan a tres temperaturas, por ejemplo a ($5 \pm 1^\circ\text{C}$, $25 \pm 1^\circ\text{C}$, and $40 \pm 1^\circ\text{C}$), Cada una para una o más frecuencias de carga, por ejemplo 0.33, 0.5, y 10 Hz.

El módulo de resiliencia de la C.A. se calcula como función de la carga aplicada, el espesor del espécimen, la deformación horizontal recuperada medida, y de la relación de Poisson (determinada a partir de las deformaciones verticales u horizontales recuperadas medidas, o bien se supone igual 0.35). Se reporta el MR promedio para cada temperatura, duración y frecuencia de carga usadas

REFERENCIAS

1. "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1993.
2. "Analysis Relating to Pavement Material Characterizations and their Effects on Pavement Performance" . Von Quintus, Harold L. and Brian Killingsworth, , Publication Number FHWA-RD-97-085, Federal Highway Administration, May 1997.
3. "Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design", Research Results Digest, National Cooperative Highway Research Program. January 2004—Number 285
4. "Design Pamphlet for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide For the Design of Pavement Structures". Publication No. FHWA-RD-97-083. September 1997
5. "Guide for Mechanistic –Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report", NCHRP, Appendix DD-2. E-U.A. June 2000
6. "Resilient Modulus as Function of Soil Moisture – A Study of the Expected Changes in Resilient Modulus of the Unbound Layers with Changes in Moisture for 10 LTPP Sites", Witczak M.W., Houston W.N. and Andrei D. Development of the 2002 Guide for the Development of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37 A, Inter Team Technical Report (Seasonal 2), June 2000.
7. "Mecánica de suelos Tomo I, Fundamentos de Mecánica de suelos", E. Juárez Badillo, A. Rico Rodríguez. Tercera Edición. Editorial Limusa. 1974.
8. "Principles of Pavement Design" , Yoder E.J. and Witczak M.W.. 2nd edition, New York, John Wiley and Sons Inc., 1975.
9. "Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept", Werkmeister, S., Dawson, A. and Wellner, F. Transportation Research Record 1757, Journal of the Transportation Research Board, pp. 75-81, 2001

Capítulo VII

MODELO ESTRUCTURAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Capítulo VII

MODELO ESTRUCTURAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

VII.1 Introducción

A lo largo de este trabajo se ha subrayado la importancia que tienen las propiedades elásticas-mecánicas que tienen las capas que componen a un pavimento en la respuesta de este último ante cargas y agentes erosivos. Tal como se analizó en el Capítulo V para la respuesta de las capas elásticas, los módulos elásticos, incluyendo el de resiliencia, inciden de manera directa en los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos resultantes en las capas de transición y de apoyo. La evolución a largo plazo de los asentamientos en esta última es un problema que todavía sigue sin resolverse de forma completa, ya que en los modelos se siguen involucrando valores fijos de deformación de resiliencia y sobre todo del de reacción combinado. Este valor puede ser altamente evolutivo con el tiempo, pues depende de la geometría de las capas, de la deformabilidad del terreno de cimentación, posición y duración de las cargas.

En lo que sigue se estudia ahora la respuesta de un pavimento rígido, sujeto a varias posiciones y niveles de carga. Se hará uso de una herramienta de análisis más sofisticada, como lo es una basada en el método del elementos finitos. Lo interesante de este análisis será el mencionar la forma en que se define y se involucra cada variante de comportamiento y de respuesta, para luego proceder hacer un análisis de tipo paramétrico, y analizar la incidencia de los componentes y propiedades de las estructuras analizadas, de las dificultades que se tienen para arribar a veces a un valor razonable en los citados parámetros.

Con objeto de entender un poco mejor los resultados de análisis, limitaciones y alcances en la forma de tomar en cuenta a cada parte de la estructura del pavimento, a continuación se hace un bosquejo de la herramienta de análisis que usa elementos finitos.

VII.2 Descripción del método

Cuando se trata de describir el desempeño y respuesta ante sollicitaciones externas y ambientales el modelo de análisis debe cubrir los siguientes requerimientos:

1. El modelo debe describir correctamente la estructura del pavimento (capas del pavimento y el terreno de apoyo)
2. El modelo debe considerar discontinuidades, sean grietas o juntas programadas o de construcción,
3. El modelo debe poder analizar sistemas múltiples de carga, con diferentes presiones de contacto, incluyendo su no uniformidad.
4. El modelo debe considerar consideraciones ambientales: humedad y gradientes térmicos, que puedan inducir alabeo o pandeo de capas de rodamiento

A diferencia de otros modelos de elemento finito adaptados para una aplicación específica, el modelo de análisis que se emplea en este trabajo pertenece a la familia de aquellos que fueron particularmente diseñados para pavimentos, y no para uso general.

El programa EVERFE que se utiliza es capaz de analizar pavimentos con multi capa, usando elementos sólidos continuos en tres dimensiones para losas y caspas granulares, en este caso. Es el programa de análisis en tres dimensiones para pavimentos rígidos más sofisticado a la fecha, a la vez de uso más sencillo. Emplea una interfaz gráfica para el usuario que es sencilla e intuitiva, que a su vez facilita la creación de modelos. Una de las características más importantes es que modela la transferencia del cortante en losas mediante la trabazón de agregados, e incorpora comportamiento no lineal en forma racional, así como formas rigurosas de incorporar las transferencias de carga por pasajuntas.

Algunas características principales:

- Modela hasta tres losas y/o unidades de acotamiento en la dirección longitudinal y/o en la dirección transversal. (O sea hasta 9 unidades de losa- acotamiento en configuraciones de 3 x 3. Se pueden analizar de manera explícita la presencia de varillas de sujeción en losas-acotamientos adyacentes.
- Se pueden modelar hasta tres capas de base elásticas con capas granulares de contacto adheridas o no adheridas. La transferencia de cortante se puede incluir mediante una rigidez distribuida horizontalmente de tipo elasto - plástica, entre la base y la losa. El apoyo del sistema, o cimentación, se simula mediante un líquido denso sujeto o no a esfuerzos de tensión.
- La trabazón de agregados en juntas transversales puede presentar comportamiento lineal o no lineal.
- Las pasajuntas se pueden localizar con precisión en las secciones transversales y se puede modelar la adherencia o grados de contacto de las barras. Se puede representar la rigidez de las pasajuntas mediante un módulo de soporte para simular la interacción entre la losa y la pasajunta.
- Se puede analizar la desviación de pasajuntas y el efecto de su mala colocación.
- Se puede colocar sobre las losas una gran variedad de configuraciones de carga
- Se pueden analizar gradientes térmicos lineales, bilineales y en trilineales a lo largo de los espesores de losa. Mediante ello se simula el efecto de gradientes térmicos, así como los problemas de contracción.
- Se pueden visualizar niveles de esfuerzo, desplazamientos y fuerzas internas y sus momentos asociados.

VII.3 Modelo de la cimentación, líquido denso

La cimentación de líquido denso puede estar sujeta o no a tensión. Cuando la cimentación de líquido denso no cuenta con tensión no considera ningún tipo de pre compresión debido a una historia de cargas previa, o sea la debida a carga vertical. Así, antes de que el esfuerzo en la cimentación de líquido denso y la rigidez sean cero primero tienen que desaparecer la deflexión vertical total incluso cualquier efecto por carga vertical.

Se usaron los elementos de 8 nodos de la Fig VII.1 (Ref. manual de usuario) para discretizar a la capa base. El elemento incorpora funciones de forma cuadráticas estándar para interpolar desplazamientos verticales dentro de un elemento (Zienkiewicz and Taylor 1994) para asegurar que sus desplazamientos sean compatibles con el elemento prismático de 20 nodos. Se usa una formulación paramétrica de elemento y todas las integraciones necesarias en elementos se realizan numéricamente empleando cuadraturas de Gauss de 9 puntos (3x3) para asegurar buenas aproximaciones en los resultados en caso de seleccionar la opción de análisis de cimentación sin tensión.

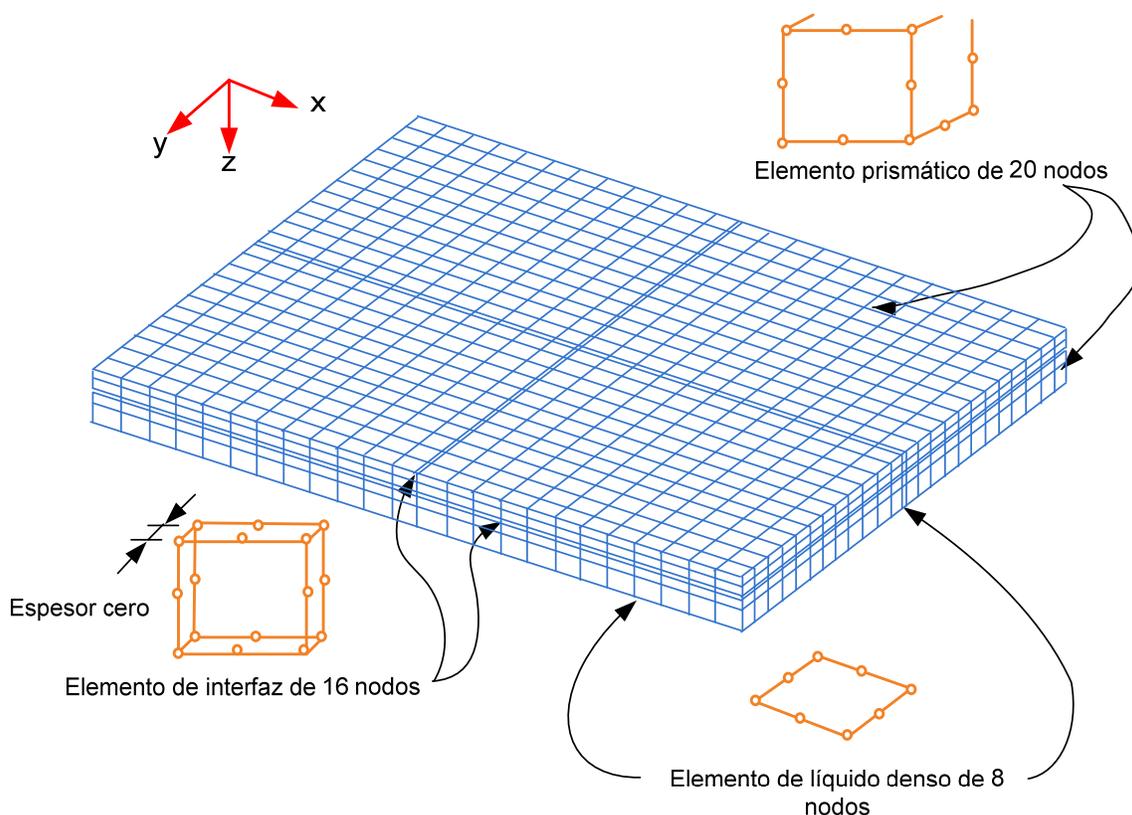


Fig.VII.1 : Arreglo y disposición básicos en de los elementos finitos en los componentes del pavimento

Se requiere solamente un parámetro constitutivo para este elemento, la rigidez distribuida de la cimentación de líquido denso, CLD (fuerza/ volumen). Para una cimentación sin tensión, si se presenta tensión en un punto de integración del elemento durante el proceso de solución, el esfuerzo

y la rigidez se hacen cero durante la integración de la matriz del elemento del vector de fuerzas equivalente. Para el caso convencional del líquido denso sujeto a tensión, la rigidez permanece constante en todos los puntos.

VII.4 La interfaz losa -base

Para simular la respuesta de las losas ante efectos de temperatura- alabeo y fuerzas de arrastre en la interfaz losa y el suelo - el programa contempla la adherencia total de las dos capas referidas, o bien la generación de esfuerzos de tensión en la base. Se modelan nodos restringidos, en lugar de que en dicha interfaz se compartan nodos. La solución se basa en formulaciones de Lagrange en condición modificada en esquemas de actualización de de restricciones nodales basadas en el esfuerzo normal existente entre la base y la losa.

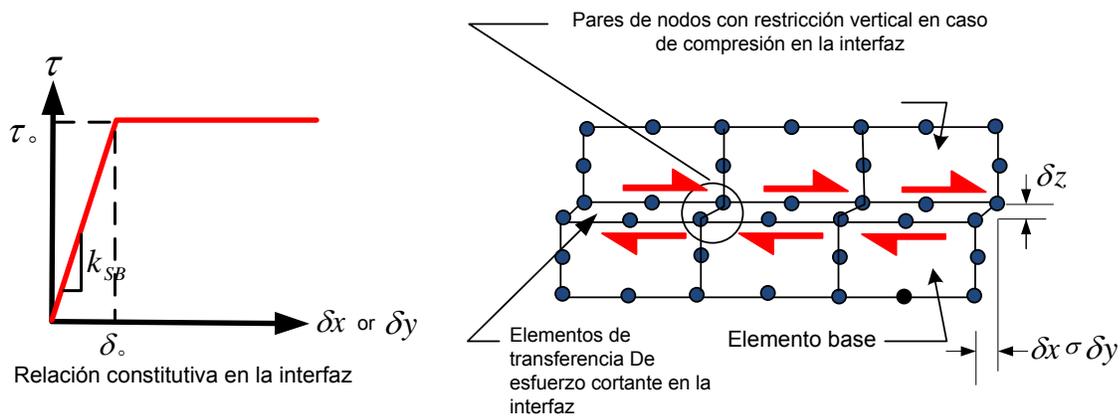


Fig. VII.2: Modelado de la separación y la transferencia de cortante en la interfaz losa -base

Para poder caracterizar la fricción desarrollada entre las losas y las capas base cuando se presentan gradientes térmicos y deformaciones por contracción, algunos autores han propuesto modelos razonables en cuanto a cómo se distribuyen los esfuerzos cortantes (Rozycki, D.K., y Zhang, J. and Li, 2001). En estos modelos se consideran la influencia de la contribución de trabazón de agregados y presencia de pasajuntas; además este tipo de estudios calibraron modelos a partir de ensayos de empujes de losas sobre la capa base, para valuar los modelos transferencia de cortante bilineales y del tipo elato plástico.

En las Figs. VII.1 y VII.2 se presentan elementos de interfaz cuadráticos de espesor cero con 16 nodos. En el elemento básico se lleva seguimiento de los desplazamientos relativos entre las losas y las bases en la dirección vertical (z) y en ambas direcciones horizontales (sobre x y en y) se emplea una formulación isoparamétrica por elemento y se emplean cuadrantes Gauss (3 x 3) para resolver las integraciones de elemento necesarias.

La Fig. VII.2 presenta la relación constitutiva, esquematizada por una rigidez inicial k_{SP} (fuerza/volumen) y un desplazamiento δ_0 inicial. Aunque el valor k_{SP} tiene unidades iguales que las del

módulo de reacción (en este caso las correspondientes a un modelo 'de líquido denso), se debe tener presente a que son dos conceptos diferentes. Los cortantes, como ya se dijo, se mencionó, se generan por los deslizamientos relativos entre losa y base, en el plano x-y. La relación constitutiva se supone que aplica en las dos direcciones, x y en y, siempre que haya contacto entre la capa de rodamiento y en la base. O sea, existe un esfuerzo normal de compresión en dicha interfaz. Cuando exista un deslizamiento, $dz > 0$, se puede asumir que la rigidez en la interfaz y el esfuerzo cortante iguales a cero, es cuando no hay transferencia de carga o de cortante. Esta consideración es importante, especialmente cuando se manifiesta separación de losas en esquinas por efecto de contracción o por temperatura.

El esfuerzo cortante no depende de la magnitud del esfuerzo normal -como sería el caso de un modelo friccionante -. Para valores altos de k_{SB} el modelo empieza a parecerse a la fricción de Coulomb, con un coeficiente de fricción alto, mientras que para valores pequeños de k_{SB} se asemeja más a una interfaz sin fricción.

VII.5. Modelado de las varillas de sujeción y pasajuntas

El programa simula a las varillas de referencia mediante elementos finitos flexionantes empotrados cuadráticos, con tres nodos. La ventaja de este enfoque es que el acero se simula dentro de prismas, independientemente del arreglo de los elementos o de mallas de la losa; de esta manera se pueden localizar de forma más precisa dentro de una junta. Ver Fig. VII.3.

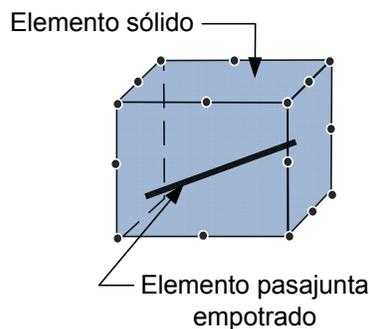


Fig. VII.3: Elemento pasajunta

Se pueden simular transferencias de carga en un rango amplio, con eficiencia de cálculos. La formulación de la longitud de empotramiento de la pasajunta hace que se puedan simular deterioros en la adherencia barra- losa- y eficiencia de traspaso de cargas. También se puede modelar la barra como una viga pequeña apoyada en una cimentación elástica (hipótesis de Winkler), o sea como resortes actuantes entre las losas y las barras. Ver Fig. VII.4

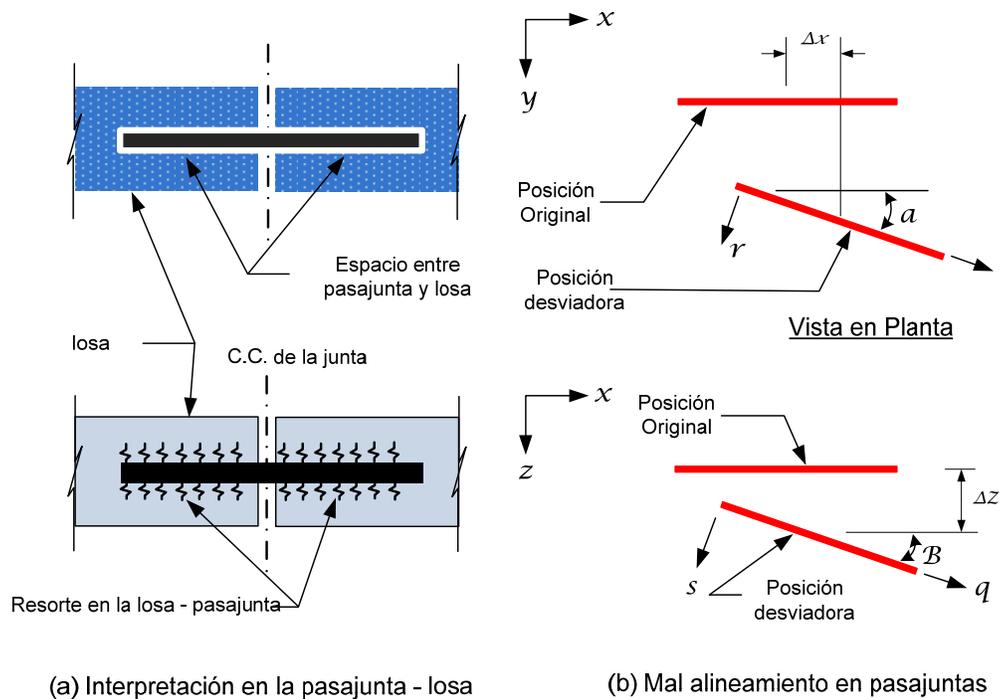


Fig. VII.4 Modelo de las barras pasajuntas

La descripción y discusión de las ecuaciones y fórmulas para estas condiciones está fuera del alcance de este trabajo.

VII.6 Modelo de la trabazón de agregado

En el modelo de elemento finito se simula la transferencia de cortante mediante fricción (trabazón de agregado) en todo el ancho de la sección de un pavimento. En las grietas o planos discontinuos se analizan comportamientos lineales y no lineales. El comportamiento lineal se refleja como una correspondencia entre el esfuerzo cortante desarrollado en una grieta o junta y el movimiento vertical relativo en la junta o grieta; y el esfuerzo cortante es independiente de la abertura de las juntas. En el caso del comportamiento no lineal, se acepta que no existe comportamiento lineal en la relación de esfuerzos cortantes- movimientos relativos verticales, así como un comportamiento no lineal entre los cortantes y la abertura de las juntas.

VII.7 Cargas y efectos térmicos

El programa puede simular de manera simultánea sistemas de carga externa en la superficie, así como los gradientes térmicos a diferentes elevaciones en las capas de rodamiento.

VII.8 Carga por llanta

Se pueden simular arreglos de carga muy complejos. Todos a partir de una colección de caras por llanta sencilla, rectangulares. Cada llanta se considera igual en los códigos del elemento finito. El centro de carga para cada llanta, en forma rectangular, se define básicamente dentro de las coordenadas del plano (x,y), con una longitud L y ancho W del área de contacto, y una magnitud de carga P . Se supone que la llanta produce una carga constante en el área de contacto.

Algunos aspectos específicos que tratan sobre eliminación de fuentes de error además de hipótesis simplificadoras están fuera del alcance de este trabajo, ya que corresponden a los mecanismos y arquitectura del programa, que tienen poco que ver con el tema motivo de esta discusión. De entre las cosas que se dejan de lado, por ejemplo está el tema de cómo se determina la carga que se aplica por las llantas en los nodos de los elementos finitos; cargas nodales, que sean equivalentes a las cargas uniformemente repartidas generadas por las llantas.

VII.9 Efectos térmicos y de contracción

En el modelo se utilizan deformaciones pequeñas inducidas o mejor dicho pre inducidas, para simular los efectos térmicos y de contracción, siempre de manera congruente con la teoría de los elementos finitos. (Zienkiewicz and Taylor 1994). Una característica interesante es que se puede simular gradiente lineal, bi lineal y tri lineal en todo el espesor de una losa. La deformación inducida, generada por el usuario, se puede estimar mediante el producto del cambio de temperatura pronosticado y el dato de entrada del coeficiente de contracción térmica. Este último valor también se puede usar para especificar una deformación de deformación por contracción; ello se logra mediante la conversión de la deformación de contracción buscada en un cambio equivalente de temperatura, usando el ya citado coeficiente. Luego el elemento de deformación pre fijada o inducida se convierte a un vector de fuerza nodal mediante los elementos de integración usual, y se restan de la deformación total durante el proceso de cálculo de esfuerzos internos

VII.10 Observaciones finales sobre el método

Desventajas

- Toma mucho tiempo para el desarrollo de los análisis
- Si existe una base estabilizada, se modela como una capa continua bajo las losas de concreto cuando estas cuentan con juntas. Ello tiende a sobreestimar la capacidad de transferencia de carga, aun en el caso de que existan grietas en toda la capa base.

Existen otros programas de elementos finitos de uso general, por ejemplo el denominado ILLI-SLAB puede incorporar gran variedad de modelos que pueden representar mejor, de manera más realista, el comportamiento de muchos terrenos:

- Modelo de Winler (Líquido denso, LD)
- Modelo de sólido elástico (SE)
- Modelo de dos parámetros (DP) o Pasternak
- Modelo de Zhemochkin-Sinitsyn Shtaerman (ZSS)
- Modelo de Kerr-Vlasov (KV)

VII.11 Ejemplos de aplicación

En el Anexo C se presentan resultados parciales, pero en detalle, de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos. También en los anexos D y E se presentan diagramas de esfuerzo y de desplazamientos a detalle, para cada uno de los casos analizados. En este caso para análisis de pavimentos rígidos. En estos ejemplos se utilizan arreglos de ejes cargados que corresponden al tracto articulado T2- S2, cuyo peso total legal en caminos tipo A4 y A2 es de 35.5 ton. Otras características son:

L = longitud total = 20.80 m

PSN = 39 ton= peso máximo con su presión neumática

No ejes totales = 4

No de llantas = 14

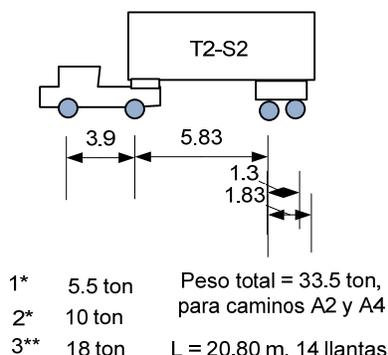


M_r = Módulo de ruptura = 45 Kg/ cm² (45 psi)

E_c = módulo elástico= 303,726 kg/ cm²

Fig. EVII.1 Sección de pavimento usada en el análisis

Para simular condiciones reales, se utilizó el vehículo siguiente:



Las propiedades fundamentales del sistema son las siguientes:

E_c = Módulo de elasticidad del concreto, losa = 30,372 MPa
 a = Coeficiente de contracción térmica del concreto, 1.1×10^{-5} ($1/^\circ\text{C}$)
 μ = relación de Poisson del concreto = 0.2

γ_c = peso unitario del concreto, 2.4 ton/ m³

Pasajuntas
 Diámetro 39 mm de 45 cm de longitud
 E_p = 200,000 MPa
 μ = 0.3

Varillas de sujeción
 90 cm de separación longitudinal
 100 cm de separación en junta 2
 Diámetro de 1.3 cm
 0.50 m de empotramiento dentro de cada losa
 Se simuló pérdida de adhesión losa- base

Base granular
 E = 172 MPa
 μ = relación de Poisson del concreto = 0.3
 γ_m = peso unitario de la capa base, 2.00 ton/ m³

Subbase granular
 E = 172 MPa
 μ = relación de Poisson del concreto = 0.3
 γ_m = peso unitario de la capa base, 2.0 ton/ m³

Capa subrasante
 E = 50 MPa
 μ = relación de Poisson del concreto = 0.3
 γ_m = peso unitario de la capa base, 0 ton/ m³

Condición No lineal

Se supuso desarrollo de fricción en la interfaz losa- base

Se asignó pequeño movimiento en la interfaz losa- capa granular

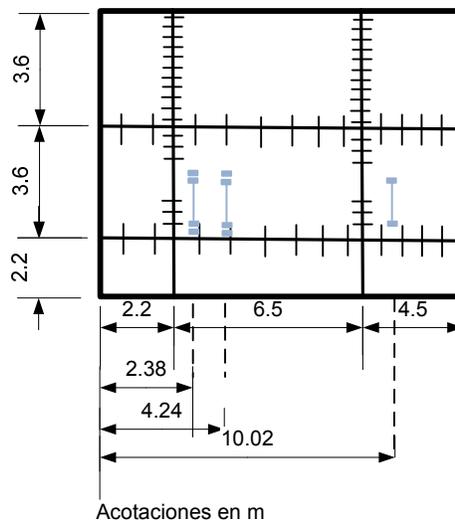
Trabazón de agregado: se asignó comportamiento no lineal

Abertura entre juntas transversales: 0.5 mm

Estas últimas condiciones se asignaron para simular comportamiento no lineal.

Condición de pasajuntas: Durante la vida útil de los pavimentos rígidos es común que por diversas circunstancias las barras pasajuntas no permanezcan adheridas totalmente en la masa del concreto, en la zona de juntas transversales. Por ello, es posible esperar en un período de servicio cierta pérdida de capacidad de transferencia de carga (esfuerzos cortantes por el paso de vehículos). Para simular la pérdida de transferir carga, se asignaron parámetros de dicha pérdida dentro del programa. Ello se logra mediante la introducción de una cantidad de socavación dentro de las perforaciones que alojan a las barras citadas. El programa se diseñó para esta eventualidad.

También, para tener una idea de la influencia de la posición de las cargas dentro del arreglo de juntas, pasajuntas y distribución de las varillas de sujeción, se definieron dos sistemas de carga:



Posición de carga A

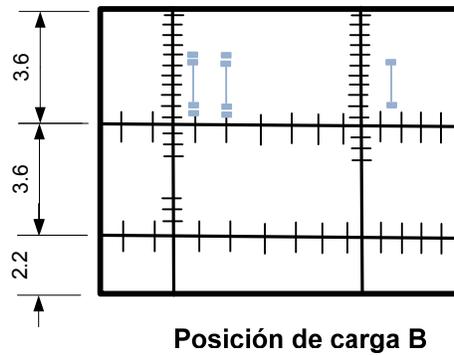


Fig. EVII.2 Sistemas de carga usados en el análisis

Como ya se refirió, el detalle de resultados se muestra en el anexo C. Para tener alguna idea de la variación de esfuerzos, en la Figura EVII.3 siguiente se muestran algunos cuadros comparativos.

0.438- 0.50	1.107- 1.85	0.48- 1.114
(0.499- 0.509)	(1.23- 1.372)	(0.444- 0.50)
0.50- 1.489	1.35 - 1.531	0.5025- 1.275
(0.50- 0.526)	(0.962- 1.217)	(0.515- 0.525)
0.3018- 0.6207	0.797- 1.33	0.48- 0.825
(0.50- 0.5006)	(0.888- 1.100)	(0.492-0.497)
Condición de carga A, en negro		Condición de carga B, entre paréntesis

Fig. EVII.3: Esfuerzos principales máximos por losa para las dos condiciones de carga

Es importante señalar que en lo que al terreno de apoyo respecta, se utilizaron los siguientes valores del módulo de reacción, k:

Tabla No EVII.1: Módulos de reacción empleados, y capas granulares de apoyo

T2-S2MR70* (k= 0.07)
T2-S2MR70b* (k = 0.07)
T2-S2MR35* (k = 0.035)
T2-S2MR70c (k= 0.07)
T2-S2MR70d (k= 0.12)
T2-S2MR70e (k= 0.12)
T2-S2MR70f (k= 0.12)
T2-S2MR70g (k= 0.06)
T2-S2MR70i (k= 0.0.03)
T2-S2MR70j (k= 0.06)

K en Mpa/ mm

* Incluye una sola capa granular por debajo de la losa

Nótese que a pesar de las variaciones importantes en los valores de k, este valor no incide de forma importante en los esfuerzos máximos, que son los que se muestran en la Fig. EVII.3 en forma resumida. Ello no quiere decir que en términos de deformaciones, que también fueron determinadas, no tengan relevancia.

La posición 2 es en general más crítica, pues involucra a mayor cantidad de acero dentro de las losas. Cabe aclarar que por la misma naturaleza de este trabajo se han dejado de lado geometrías y propiedades físico -mecánicas de los concretos y los aceros. Se ha privilegiado la atención al terreno a las capas granulares.

Se aprecia que los niveles de esfuerzo están muy por debajo del valor del módulo de ruptura. Pero cabe aclarar que la respuesta del sistema se rige por la acumulación y composición del tránsito y la evolución de agentes climáticos y ambientales en general con el tiempo. Se debe tener en cuenta que este es un ejercicio exclusivamente para un tracto camión articulado. De igual modo, en este análisis no se consideran efectos de fatiga,

En el Anexo D se presentan diagramas de esfuerzos principales en cada una de las losas, los desplazamientos asociados. También se presentan cuatro ejemplos ilustrativos del diagrama de esfuerzos cortantes en los pasajuntas. Nótese en ellos que el valor de tales esfuerzos depende de manera importante de la posición particular de las pasajuntas dentro del sistema losa -posición de carga. El proyectista puede así variar posiciones, diámetros y rigideces de las pasajuntas hasta lograr resultados satisfactorios.

Por lo demás, esta herramienta de análisis permite hacer simulaciones muy sofisticadas, pues involucra geometría de materiales, de juntas, pasajuntas, varillas de sujeción, condiciones de apoyo; rigideces de las capas de transición, rigideces en las juntas y traspasos de carga, entre otras condiciones.

Este tipo de métodos de análisis permite cuantificar respuestas estructurales atribuibles al terreno de apoyo, capas de transición y de rodamiento. Ello es posible si se inicia con una evaluación de las condiciones geotécnicas a lo largo del eje de trazo de una vialidad. Dicha evaluación debe incluir muestreo alterado e inalterado, así como el ensaye de laboratorio respectivo.

REFERENCIAS

1. Rasmussen, R.O. and Rozycki, D.K. (2001). "Characterization and Modeling of Axial Slab-Support Restraint." *Transportation Research Record 1778*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 26 – 32.
2. Zhang, J. and Li, V.C. (2001). "Influence of Supporting Base Characteristics on Shrinkage-Induced Stresses in Concrete Pavements." *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 127(6);455 – 642.
3. Davids, W.G., Wang, Z.M., Turkiyyah, G., Mahoney, J. and Bush, D. (2003). "3D Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement with EverFE2.2." *Transportation Research Record*, TRB, National Research Council, Washington, D.C. (in press).
4. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. (1994). *The Finite Element Method, Volume 1 (4th Ed.)*. McGraw Hill Book Company, London.

Capítulo VIII

Conclusiones y observaciones sobre investigaciones pendientes

Capítulo VIII

Conclusiones y observaciones sobre investigaciones pendientes

VIII.1 Sistemas elásticos multicapa

El elemento fundamental de este enfoque, capas elásticas, se basa en la idealización de un medio multicapa en el semi espacio, con una carga circular aplicada en la superficie. En estos enfoques la profundidad de la última capa es infinita; y la presión de la carga en la superficie se distribuye uniformemente. El sistema es asimétrico, con radio r , profundidad z y un ángulo en el plano horizontal, θ que define cualquier punto en el disco infinito o en un semi espacio infinito.

Estas herramientas de evaluación pueden usarse para analizar los potenciales de deformación en las capas granulares de los pavimentos, así como el potencial de “roderas” en las superficie de rodamiento. Ello se explica por la capacidad que tienen, dentro de sus limitaciones inherentes, de medir esfuerzos, deformaciones, esfuerzos y deformaciones radiales y desplazamientos verticales asociados a sistemas conocidos de carga. También se obtienen los elementos de esfuerzo y deformación considerando los estados de esfuerzo que existen en una capa dada. Tales elementos se consiguen también considerando desplazamiento y fricción en la interfaz capa de rodamiento - losa.

Las desventajas de estas soluciones de evaluación es que no consideran la degradación o en su caso, ganancia de rigidez, con el tiempo. No consideran todavía rangos no lineales, que son muy comunes en el comportamiento real de los pavimentos.

VIII.2 Métodos sísmicos para evaluación

El analizador sísmico de pavimentos, ASP, es un dispositivo para evaluar la condición funcional y estructural de un pavimento. Puede realizar en forma sencilla y repetitiva mediciones estructurales de un pavimento. Sus diferentes modalidades de empleo lo hacen atractivo por su versatilidad.

El ASP originalmente se desarrolló para pavimentos flexibles, específicamente para analizar los efectos de cambio de humedad, presencia de vacíos y eventuales pérdidas de soporte. También teóricamente sirve para analizar problemas de deterioros en las capas de rodamiento

No existe una correspondencia todavía entre mediciones con este equipo y los precursores de daño en sus diferentes tipos. La modalidad de Análisis espectral de ondas superficiales (SASW) es el más prometedor a la fecha, ya que diferentes estudios historia demuestran que sus resultados son consistentes con los del tipo de impulsos (FWD). Pero presenta la ventaja el SASW que sus

resultados se pueden obtener y usar en situaciones en donde las mediciones con FWD resultan incongruentes o irrealizables.

El ASP todavía resulta impredecible en cuanto a calificar la existencia de oquedades por debajo de las losas de concreto; además, no se puede precisar de qué están llenas dichas oquedades, si están secas o llenas de agua. En estas condiciones el FWD -método de impulsos- resulta más aplicable.

El ASP, en su modalidad de análisis espectral de ondas superficiales resulta atractivo cuando se trata de definir cuál de las capas está contribuyendo a un tipo de daño dado, siempre que este último sea detectado primero con la técnica de FWD. Es decir, el analizado sísmico es apenas un complemento del FWD.

Las ondas de ultrasonido del tipo de superficie y de cuerpo son prometedoras para el caso de evaluar deterioros a nivel de la capa de rodamiento (exfoliaciones y microfisuramientos); no así para caracterizar a las capas de terracería y suelo de cimentación.

Hasta hace unos pocos años el ASP usaba métodos y programas de cómputo para convertir propiedades mecánicas a condiciones de pavimento que requerían más validación, más trabajo de campo. Se requiere en los países en donde se produce, crear más bases de datos confiables que calibren más eficientemente sus resultados.

En el estado actual de conocimiento se requiere ejecutar una exploración directa, incluso obteniendo muestras inalteradas en los suelos de apoyo, para poder calibrar los resultados obtenidos con el ASP. La exploración de campo y de laboratorio se debe completar con otras técnicas no destructivas, como en la modalidad de impulsos, que ayuden a calibrar los resultados en la modalidad sísmica. Dependiendo de los resultados, se deben obtener algunos núcleos para ser ensayados, hasta que los medidos con las diferentes dispositivos sean razonablemente congruentes.

VIII.3 Cálculo inverso

Si bien los resultados de análisis de cálculo inverso son muy prometedores, y se han venido realizando con mucho grado de confianza en los últimos 20 años, diferentes estudios muestran que todavía hace falta realizar ajustes en el caso de pavimentos rígidos. Entre los factores que más inciden en variación de resultados se incluyen:

- Temperatura a la hora de los ensayos de deflexiones
- Condiciones de alabeo de las losas
- Hora de ensaye
- Condiciones de adhesión losa- capas de transición
- Las técnicas de análisis de cálculo inverso todavía no satisfacen estas condiciones o aspectos

Se ha demostrado que todavía no existe una correlación confiable entre E_c determinados a partir de cálculo inverso, y aquellos valores determinados en el laboratorio en condiciones estáticas. Tampoco existe mucha certeza entre los valores de E_c determinados en condiciones dinámicas -vigas - y en cálculo inverso. Los módulos de elasticidad obtenidos mediante cálculo inverso y los determinados en laboratorio presentan todavía correlaciones muy débiles.

Para explicar estas discrepancias es posible que los efectos dinámicos tienen que ver, según se discute más adelante. También influye el modelo de idealización de las condiciones de apoyo (líquido denso, sólido elástico o el modelo de Pasternak).

En algunos estudios sobre la validación de cálculo inverso se usan las soluciones de Westergaards para cargas interiores de una losa sobre terreno - en este caso se aplica a pavimentos rígidos - aplicadas también al caso de cargas dinámicas. Se han propuesto ecuaciones como la siguiente, para definir un parámetro adimensional m^* , que afecta la respuesta dinámica de pavimentos de concreto hidráulico. Para los pavimentos flexibles no se han propuestos parámetros de este tipo todavía.

$$m^* = \frac{m}{k} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \quad \text{Ec. VIII.1}$$

m = masa del área unitaria de la placa y la porción removida o afectada del terreno natural

T = duración de la carga del deflectómetro, FWD

k = Módulo de reacción del terreno de apoyo

También desde hace 10 años existen herramientas analíticas del tipo de soluciones cerradas para determinar la historia de tiempo -deflexión a partir de cargas por impulsos de deflectómetro. Mediante programas de cómputo se pueden hacer evaluaciones numéricas de tales soluciones, para hacerlos en forma eficiente y muy rápida.

La VIII.1 presenta la influencia de un valor m^* en los resultados de un cálculo inverso. Se pueden desarrollar otras curvas para los casos de variar masas de terreno involucradas, valores de k y módulo elástico de la losa. Se debe hacer notar que el comportamiento quasi estático corresponde a $m^* = 0$.

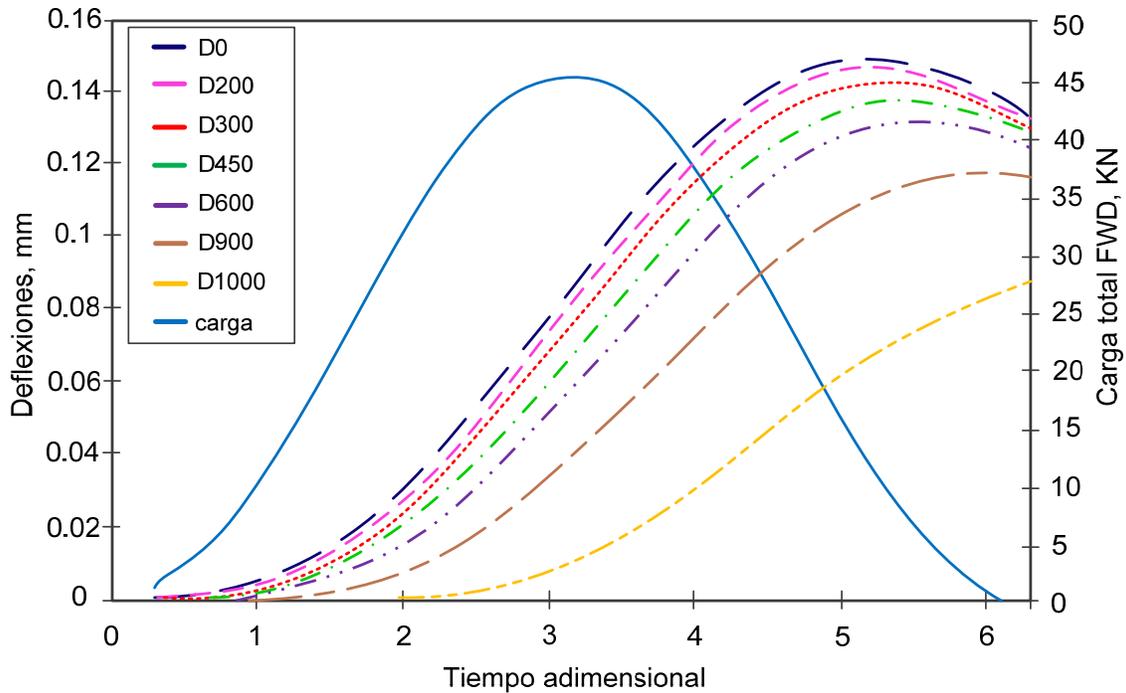


Fig. VIII.1 Efecto de la inercia del pavimento en la deflexión del sensor, FWD, $M^*=10$

Como otra forma de ilustrar los efectos dinámicos, en la gráfica de la Fig VIII.2 se muestra la relación entre valores determinados usando cálculo inverso de E y k , y los reales de E y k , todo respecto al valor correctivo m^* . Se aprecia que los valores de los módulos, usando técnicas de cálculo inverso convencionales, son más altos que los reales, derivados de ensayos de placa; también que un incremento de m^* hace que se incrementen las discrepancias entre los valores de los módulos de elasticidad a partir de cálculo inverso y los reales.

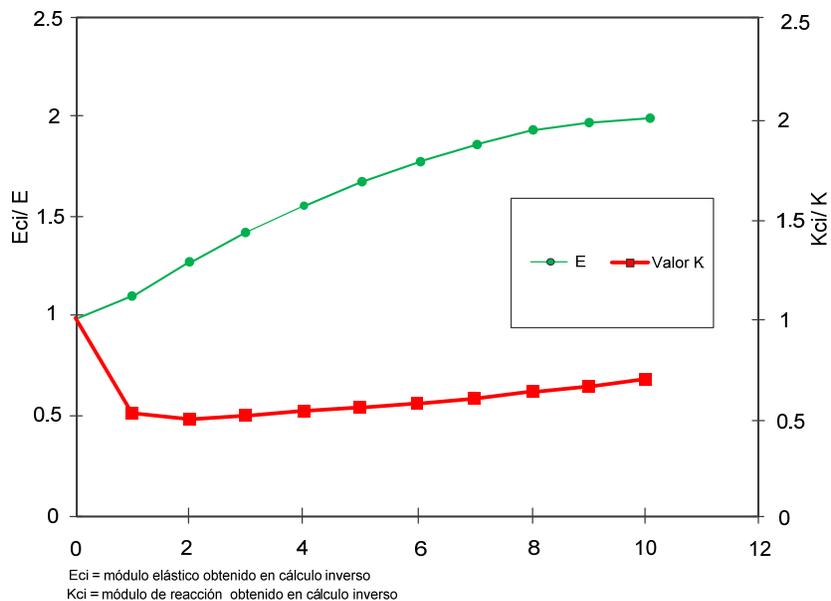


Fig. VIII.2: Efecto de la inercia del pavimento en los resultados de cálculo inverso

Nótese que el valor de k es mucho menos sensible a m^* . Nótese también que los derivados a partir de cálculo inverso casi siempre son menores a los reales.

Al menos en el caso de pavimentos rígidos, las pruebas de deflexiones con FWD deben evitarse en horas tempranas, ya que existe un gradiente térmico muy bajo. También se deben conducir este tipo de ensayos en diferentes horas del día, con objeto de calibrar el impacto que tiene la temperatura en las deflexiones.

Se han observado discrepancias para una misma sección de medición de deflexiones, y por tanto de módulos elásticos con FWD. Ello se puede deber a que siempre se supone una condición quasi-estática de los pavimentos durante la aplicación de carga. Se suponen que los picos de las deflexiones en cada uno de los sensores coinciden con el pico de la carga máxima aplicada, en tiempo. Sin embargo, se ha observado un cierto desfase entre tales picos de ocurrencia,

Existen también efectos de inercia, atribuibles a la masa de concreto (o de carpetas asfálticas, según se trate) más la masa de terreno natural movilizados por los efectos de los impactos de los FWD que afectan a los resultados del cálculo inverso. Esto es, la inercia afecta al comportamiento dinámico de los pavimentos. Los efectos dinámicos se hacen más pronunciados.

Así, las variaciones en la inercia de los pavimentos por cambios en las condiciones de humedad en las capas base, subbase y terreno natural, ayudan a explicar la variación estacional durante el año de los parámetros elásticos obtenidos con cálculo inverso. Esto es explicable si se hacen mediciones en diferentes épocas del año: las capas de suelo podrán variar, sin embargo los parámetros elásticos en las losas no necesariamente lo hacen.

Estas consideraciones se pueden resumir como sigue:

- a. Los efectos dinámicos pueden afectar de manera significativa las deflexiones medidas
- b. La masa del terreno de apoyo afectada o movida por las cargas de impulso afectan al módulo determinado mediante el cálculo inverso
- c. La variación en el módulo entre las diferentes pruebas para un mismo cadenamiento se puede explicar por el comportamiento dinámico de los pavimentos bajo las cargas inducidas por el deflectómetro (FWD)
- d. Se pueden usar procedimientos de cálculo inverso a partir de mediciones y resultados de cálculo inverso estático, para luego corregirlos mediante un factor correctivo obtenido de análisis de desfases entre picos de las deflexiones.

El método del mejor ajuste es de los más prometedores para pronóstico de parámetros de cálculo inverso, contra el método de AREA, que se discutió a mayor detalle en este trabajo. El mejor arreglo de sensores para el método de mejor ajuste sería de cuatro sensores, dispuestos a 0, 305, 610, and 914 mm.

Para los modelos de suelo de cimentación de líquido denso y sólido elástico se obtienen muy buenas correlaciones con los métodos de cálculo disponibles (mejores con el método del Mejor ajuste).

Como se menciona anteriormente, el alabeo en el caso de losas de concreto, tiene mucha influencia en los resultados de parámetros elásticos usando el cálculo inverso. Para evitar variaciones importantes, se recomienda hacer pruebas en las horas más frescas del día, con objeto de que los gradientes de temperatura sean lo más bajo posible.

Al menos en los centros de losas, y en el caso de pavimentos asfálticos no muy dañados estructuralmente, existe muy buena calidad en resultados con cálculos inversos en el caso de modelar bases, sean o no estabilizadas.

VIII.4 Evaluación geotécnica apoyada con métodos de análisis elementos finitos

En los casos prácticos conviene realizar exploración directa en secciones de pavimento de cualquier tipo, para luego compararlos con resultados de la evaluación mediante deflexiones; es una manera correcta de calibrar a los resultados que se obtienen de técnicas de cálculo inverso, según se dijo.

De manera conjunta, se pueden medir los parámetros elásticos más relevantes de las capas de transición, y del terreno natural. En este último también conviene establecer características esfuerzo - deformación, resistencia y deformabilidad. Con esta información resulta relativamente sencillo introducir esta información real, para cada proyecto particular, en herramientas analíticas tal como la utilizada en este trabajo.

Las herramientas utilizadas en este trabajo permiten simular los siguientes aspectos, entre otras características:

- e. Geometría del problema, y presencia con sus coordenadas exactas, del acero de refuerzo, en caso de estar presente.
- f. La existencia de juntas no ortogonales al eje de trazo
- g. La presencia de hasta tres capas por debajo de la capa granular. Se permite introducir su caracterización desde el punto de vista geotécnico. Sin embargo, no se considera la evolución con el tiempo de estas propiedades.
- h. Se pueden introducir distribuciones diferentes de pasajuntas, variando sus propiedades. También se puede controlar de manera rigurosa su posicionamiento, así como la degradación que pueda sufrir con el tiempo.
- i. Permite valorar con cierta precisión el cambio de esfuerzos debidos a gradientes simples, doble y triples en una misma sección. Esto es, pueden ser lineales, bilineales y trilineales.
- j. Con esta herramienta se pueden calcular los desplazamientos a diferentes niveles del sistema de pavimento: interfaz de la losa con la base, a nivel de base o de subrasante, o bien a nivel de terreno natural. Consecuentemente se puede pronosticar el potencial erosivo de las copas

de transición. Además se puede pronosticar el efecto de reblandecimiento, por ejemplo, por presencia de terraplenes; ello se logra asignando valores fijos modestos del valor de k y de E de las capas de apoyo.

- k. Se pueden inducir comportamientos no lineales mediante la aplicación de pre deformaciones, función de los gradientes térmicos asignados en las capas de rodamiento.

Existen muchas herramientas analíticas que simulan razonablemente bien el comportamiento de pavimentos de tipo flexible y rígido. Es importante, sin embargo, tomar en cuenta las limitaciones que todavía tienen la inmensa mayoría de ellos.

Algunas limitaciones adicionales de los métodos de elementos finitos para evaluar respuesta estructural de los pavimentos, y que se deben considerar son:

La gran mayoría de los métodos, incluyendo los de diseño, no toman en cuenta la variación con el tiempo del módulo de reacción. Este último es función de la compresibilidad. En si misma esta hipótesis de trabajo puede ser real, dadas las cargas bajas que representa el tránsito. Sin embargo, en zonas de terraplén o en zonas bajas, sujetas a inundación o saturación en épocas importantes del año la compresibilidad varía, sobre todo en suelos finos. Se sigue que con el tiempo el valor k y MR varían.

Es difícil modelar al suelo únicamente con los dos modelos clásicos: líquido denso o sólido elástico.

La idealización del terreno mediante la teoría de Boussinesq o de sólido elástico, SE, se considera la más realista para tipificar al terreno de apoyo. Bajo este modelo las deformaciones se generan no solamente bajo la carga, sino más allá de esta última. Las deformaciones se consideran linealmente elásticas.

Los modelos de dobles parámetros (Pasternak) se consideran más realistas, porque a diferencia del modelo de SE, que simula al suelo sin interacción entre cortantes entre los resortes, este tipo de cimentación involucra de alguna manera los esfuerzos cortantes entre elementos de suelo contiguos. Este tipo de cimentación no fue discutida a detalle en este trabajo.

Todos los modelos de cimentación conocidos a la fecha, Líquido denso, elástico sólido, y los de doble parámetro adolecen de limitaciones serias. La mayor de ellas es que no toman en cuenta la interacción del suelo con la losa. Además, no se conocen todavía el cambio paramétrico respecto al tiempo y geometría del problema, esto es, geometría del pavimento y estratigrafía del sitio.

El modelo usado en el método de elementos finitos usado en este trabajo fue el de Winler, o de líquido denso

ANEXO A

Análisis de esfuerzos, sistemas multicapas elásticas

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: Carpeta NO adherida, y terracerías adheridas

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

	Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
	1	.35	10.000	5038.00
	2	.35	20.000	1259.00
	3	.40	30.000	105.00
	4	.45		70.30

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	-15.00	.00	39970.0	1378.00	9.600
2	20.00	.00	39970.0	1378.00	9.600

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-807.39	-1752.13	.00	.00	.00	.00
9.980	1	700.86	1936.45	-214.42	.00	-1.33	.00
28.000	2	431.51	576.83	-110.45	.00	-3.69	.00
61.011	4	-23.55	-20.78	-68.16	.00	1.13	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-38.54	-291.69	177.82	.902	.000	982.280
9.980	1	19.48	350.58	-225.78	-.295	.000	980.555
28.000	2	213.08	368.91	-368.04	-5.300	.000	965.050
61.011	4	234.26	291.48	-685.77	-5.868	.000	791.235

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1752.13	-807.39	.00	-291.69	-38.54	177.82
9.980	1	-214.43	700.86	1936.45	-225.78	19.48	350.58
28.000	2	-110.47	431.53	576.83	-368.07	213.11	368.91
61.011	4	-68.19	-23.53	-20.78	-686.36	234.85	291.48

Location No: 2

X-Position (cm): 20.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-2766.14	-3093.41	-1378.00	.00	.00	.00
9.980	1	2262.87	2651.03	-547.41	.00	-.38	.00
28.000	2	441.19	551.59	-113.28	.00	-20.41	.00
61.011	4	-23.08	-19.57	-63.10	.00	-7.57	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-238.42	-326.11	133.55	-23.931	.000	976.628
9.980	1	303.02	407.03	-450.04	26.930	.000	959.551
28.000	2	228.58	346.96	-365.97	39.318	.000	925.003
61.011	4	200.83	273.33	-624.59	39.148	.000	761.964

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-3093.41	-2766.14	-1378.00	-326.11	-238.42	133.55
9.980	1	-547.41	2262.87	2651.03	-450.04	303.02	407.03
28.000	2	-114.03	441.94	551.59	-366.77	229.38	346.96
61.011	4	-64.49	-21.70	-19.57	-653.11	229.35	273.33

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: Cuatro capas, adhesión parcial

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

	Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
	1	.35	10.000	5038.00
	2	.35	20.000	1259.00
	3	.40	30.000	105.00
	4	.45		70.30

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	-20.00	.00	39970.0	1375.00	9.640
2	20.00	.00	39970.0	1375.00	9.640

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-440.98	-1175.66	.00	.00	.00	.00
9.980	1	-409.81	363.92	-122.85	.00	.00	.00
28.000	2	271.68	379.39	-61.97	.00	.00	.00
61.011	4	-3.19	-1.83	-29.48	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-5.86	-202.72	112.31	.000	.000	650.998
9.980	1	-98.09	109.24	-21.20	.000	.000	655.689
28.000	2	127.55	243.04	-230.22	.000	.000	630.676
61.011	4	155.08	183.03	-387.18	.000	.000	492.519

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1175.66	-440.98	.00	-202.72	-5.86	112.31
9.980	1	-409.81	-122.85	363.92	-98.09	-21.20	109.24
28.000	2	-61.97	271.68	379.39	-230.22	127.55	243.04
61.011	4	-29.48	-3.19	-1.83	-387.18	155.08	183.03

Location No: 2

X-Position (cm): 20.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-2444.22	-2650.16	-1375.00	.00	.00	.00
9.980	1	1038.09	1152.72	-543.82	.00	-51.95	.00
28.000	2	309.31	377.56	-71.79	.00	-18.96	.00
61.011	4	-3.55	-1.83	-27.69	.00	-3.98	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-205.52	-260.71	80.99	-19.362	.000	672.382
9.980	1	163.75	194.47	-260.14	3.891	.000	661.088
28.000	2	160.68	233.86	-247.97	29.240	.000	613.207
61.011	4	138.35	173.99	-359.38	29.927	.000	479.759

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-2650.16	-2444.22	-1375.00	-260.71	-205.52	80.99
9.980	1	-545.52	1039.80	1152.72	-260.60	164.21	194.47
28.000	2	-72.73	310.25	377.56	-248.98	161.69	233.86
61.011	4	-28.32	-2.92	-1.83	-372.54	151.52	173.99

ANEXO B

Ejemplos de análisis con cálculo inverso, sistemas multicapas elásticas

Route: Ejemplo 2 - Capa rígida cuando 350 MPa
 Plate Radius (cm): 15.0
 No of Sensors: 6
 Offsets (cm): 0 20.3 30.5 61.0 91.5 122.0

No of Layers: 4
 Stiff Layer: Yes
 P-Ratio: .350 .380 .420 .350

Station: 125.00	No of Drops: 4					Average RMS Error(%): 4.17
Thickness (cm): 10.00 35.00 460.78						Pavement Temperature (C): 20.0
Drop No: 1	Load (N): 73520.0					No of Iterations: 4
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied						RMS Error (%): 7.99
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	921.000	723.000	618.000	412.000	223.000	201.000
Calculated Deflection (microns):	914.406	734.607	616.455	380.471	254.437	178.747
Difference (%):	.72	-1.61	.25	7.65	-14.10	11.07
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	2700.00	150.00	95.00	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	5005.06	214.75	69.93	350.00	3862.687	
Layer No:	1		2		3	
Radial Distance (cm):	.00		.00		.00	
Position:	Bottom		Middle		Top	
Vertical Stress (kPa):	-347.99		-145.20		-62.98	
Radial Stress (kPa):	3117.73		22.50		-.47	
Bulk Stress (kPa):	5887.47		-100.19		-63.92	
Deviator Stress (kPa):	-3465.71		-167.70		-62.51	
Vertical Strain (10^-6):	-505.57		-755.77		-894.93	
Radial Strain (10^-6):	429.23		321.90		374.34	
Drop No: 2	Load (N): 54420.0					No of Iterations: 4
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied						RMS Error (%): 2.35
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	710.000	581.000	495.000	333.000	225.000	148.000
Calculated Deflection (microns):	695.288	587.766	508.965	326.925	218.191	151.924
Difference (%):	2.07	-1.16	-2.82	1.82	3.03	-2.65
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	5005.06	214.75	69.93	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	8196.71	171.14	60.55	350.00	6325.863	
Layer No:	1		2		3	
Radial Distance (cm):	.00		.00		.00	
Position:	Bottom		Middle		Top	
Vertical Stress (kPa):	-178.74		-82.60		-40.47	
Radial Stress (kPa):	3235.22		11.20		-1.20	
Bulk Stress (kPa):	6291.70		-60.20		-42.86	
Deviator Stress (kPa):	-3413.96		-93.80		-39.27	
Vertical Strain (10^-6):	-298.09		-532.38		-651.79	
Radial Strain (10^-6):	264.19		223.98		269.27	
Drop No: 3	Load (N): 41600.0					No of Iterations: 2
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied						RMS Error (%): 2.13
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	568.000	455.000	401.000	258.000	171.000	112.000
Calculated Deflection (microns):	553.588	468.136	404.500	255.296	166.747	114.326
Difference (%):	2.54	-2.89	-.87	1.05	2.49	-2.08
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	8196.71	171.14	60.55	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	8297.50	142.98	61.31	350.00	6403.648	
Layer No:	1		2		3	
Radial Distance (cm):	.00		.00		.00	
Position:	Bottom		Middle		Top	
Vertical Stress (kPa):	-124.43		-60.92		-32.09	
Radial Stress (kPa):	2633.07		4.79		-1.32	
Bulk Stress (kPa):	5141.70		-51.35		-34.74	
Deviator Stress (kPa):	-2757.50		-65.70		-30.76	
Vertical Strain (10^-6):	-237.13		-451.49		-505.23	
Radial Strain (10^-6):	211.51		182.65		207.29	
Drop No: 4	Load (N): 27210.0					No of Iterations: 5
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied						RMS Error (%): 4.23
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	387.000	305.000	245.000	171.000	118.000	75.000
Calculated Deflection (microns):	384.584	304.526	255.341	162.428	111.694	79.474
Difference (%):	.62	.16	-4.22	5.01	5.34	-5.97
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	8297.50	142.98	61.31	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	3458.20	232.16	57.73	350.00	2668.889	
Position:	Bottom		Middle		Top	
Vertical Stress (kPa):	-156.53		-59.48		-22.24	
Radial Stress (kPa):	893.38		12.84		.03	
Bulk Stress (kPa):	1630.24		-33.80		-22.18	
Deviator Stress (kPa):	-1049.91		-72.31		-22.28	
Vertical Strain (10^-6):	-226.10		-298.21		-385.76	
Radial Strain (10^-6):	183.76		131.63		162.14	
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Mean Moduli (MPa):	6239.37	190.26	62.38	350.00	4815.27	
Normalized Moduli (MPa):	7759.43	152.90	60.91	350.00	5988.386	
K1 (MPa):	N/A	N/A	71.18	N/A		
K2:	N/A	N/A	.29	N/A		
R-Squared:	N/A	N/A	93.24	N/A		
Soil Type:	N/A	N/A	Coarse	N/A		

Route: No hay capa rígida
 Plate Radius (cm): 15.0
 No of Sensors: 6
 Offsets (cm): .0 20.3 30.5 61.0 91.5 122.0

No of Layers: 4
 Stiff Layer: No
 P-Ratio: .350 .380 .420 .350

Station: 125.00 No of Drops: 4 Average RMS Error(%): 17.65
 Thickness (cm): 10.00 20.00 50.00 Pavement Temperature (C): 20.0

Drop No: 1 Load (N): 40000.0 No of Iterations: 5
 Convergence: Modulus Tolerance Satisfied RMS Error (%): 28.51

Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	935.000	810.000	712.000	512.000	360.000	285.000
Calculated Deflection (microns):	861.317	751.450	659.057	402.186	228.353	131.303
Difference (%):	7.88	7.23	7.44	21.45	36.57	53.93

Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)
Seed Moduli (MPa):	3000.00	120.00	80.00	80.00	N/A
Calculated Moduli (MPa):	8916.57	28.00	25.00	80.00	5726.517

Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)
Radial Distance (cm):		.00		.00	.00
Position:		Bottom		Middle	Top
Vertical Stress (kPa):		-48.92		-39.87	-33.43
Radial Stress (kPa):		3790.04		-9.49	-9.39
Bulk Stress (kPa):		7531.16		-58.86	-52.21
Deviator Stress (kPa):		-3838.96		-30.38	-24.04
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-303.03		-1166.47	-1021.86
Radial Strain (10 ⁻⁶):		278.21		330.99	343.85

Drop No: 2 Load (N): 35000.0 No of Iterations: 3
 Convergence: Modulus Tolerance Satisfied RMS Error (%): 26.56

Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	850.000	650.000	595.000	450.000	332.000	210.000
Calculated Deflection (microns):	733.141	642.283	565.464	349.713	201.257	116.790
Difference (%):	13.75	1.19	4.96	22.29	39.38	44.39

Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)
Seed Moduli (MPa):	8916.57	28.00	25.00	80.00	N/A
Calculated Moduli (MPa):	9575.36	28.00	25.00	80.00	6149.609

Layer No:	1	2	3
Radial Distance (cm):		.00	.00
Position:		Bottom	Middle
Vertical Stress (kPa):		-41.08	-33.64
Radial Stress (kPa):		3366.33	-8.16
Bulk Stress (kPa):		6691.57	-49.97
Deviator Stress (kPa):		-3407.41	-25.48
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-250.38	-979.94
Radial Strain (10 ⁻⁶):		230.02	275.83

Drop No: 3 Load (N): 42000.0 No of Iterations: 5
 Convergence: Modulus Tolerance Satisfied RMS Error (%): 10.66

Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	668.000	550.000	485.000	360.000	271.000	180.000
Calculated Deflection (microns):	631.873	563.133	506.026	344.473	225.068	147.676
Difference (%):	5.41	-2.39	-4.34	4.31	16.95	17.96

Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)
Seed Moduli (MPa):	9575.36	28.00	25.00	80.00	N/A
Calculated Moduli (MPa):	13525.00	178.79	25.00	80.00	8686.202

Layer No:	1	2	3
Radial Distance (cm):		.00	.00
Position:		Bottom	Middle
Vertical Stress (kPa):		-84.24	-46.24
Radial Stress (kPa):		3483.78	30.04
Bulk Stress (kPa):		6883.31	13.83
Deviator Stress (kPa):		-3568.02	-76.28
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-186.54	-386.32
Radial Strain (10 ⁻⁶):		169.61	202.44

Drop No: 4 Load (N): 28100.0 No of Iterations: 5
 Convergence: Iteration Limit (10) RMS Error (%): 4.87

Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	387.000	305.000	245.000	171.000	118.000	75.000
Calculated Deflection (microns):	369.047	301.211	254.164	164.416	112.821	82.212
Difference (%):	-5.3	1.24	-3.74	3.85	4.39	-9.62

Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)
Seed Moduli (MPa):	13525.00	178.79	25.00	80.00	N/A
Calculated Moduli (MPa):	1910.41	468.52	70.52	80.00	1226.929

Position:	Bottom	Middle	Top
Vertical Stress (kPa):	-234.55	-103.93	-41.18
Radial Stress (kPa):	315.24	49.23	-2.04
Bulk Stress (kPa):	395.94	-5.46	-45.26
Deviator Stress (kPa):	-549.79	-153.16	-39.14
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-238.28	-301.69	-559.56
Radial Strain (10 ⁻⁶):	150.23	149.45	228.44

Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)
Mean Moduli (MPa):	8481.83	175.83	36.38	80.00	5447.31
Normalized Moduli (MPa):	8916.57	28.00	25.00	80.00	5726.517
K1 (MPa):	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
K2:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
R-Squared:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Soil Type:	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Route: No hay capa rígida

Plate Radius (cm): 15.0

No of Sensors: 6

Offsets (cm): .0 20.3 30.5 61.0 91.5 122.0

No of Layers: 4

Stiff Layer: No

P-Ratio: .350 .380 .420 .350

Station: 125.00	No of Drops: 4					Average RMS Error(%): 4.52
Thickness (cm): 10.00 20.00 200.00						Pavement Temperature (C): 20.0
Drop No: 1	Load (N): 40000.0					No of Iterations: 5
Convergence: Iteration Limit (10)						RMS Error (%): 6.20
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	935.000	810.000	712.000	512.000	360.000	285.000
Calculated Deflection (microns):	959.528	791.875	706.120	505.039	352.731	243.476
Difference (%):	-2.62	2.24	.83	1.36	2.02	14.57
Layer No:	1	2	3	4	1	1-(adj)
Seed Moduli (MPa):	3000.00	120.00	80.00	70.00	70.00	N/A
Calculated Moduli (MPa):	967.50	564.04	25.00	70.00	70.00	621.362
Layer No:		1		2		3
Radial Distance (cm):		.00		.00		.00
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-395.75		-151.60		-33.64
Radial Stress (kPa):		1.62		121.76		-4.42
Bulk Stress (kPa):		-392.50		91.92		-42.49
Deviator Stress (kPa):		-397.37		-273.36		-29.22
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-410.21		-432.84		-1197.20
Radial Strain (10 ⁻⁶):		144.25		235.98		462.64
Drop No: 2	Load (N): 35000.0					No of Iterations: 4
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied						RMS Error (%): 3.52
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	850.000	650.000	595.000	450.000	332.000	210.000
Calculated Deflection (microns):	829.098	675.661	609.318	443.302	310.811	214.241
Difference (%):	2.46	-3.95	-2.41	1.49	6.38	-2.02
Layer No:	1	2	3	4	1	1-(adj)
Seed Moduli (MPa):	967.50	564.04	25.00	70.00	70.00	N/A
Calculated Moduli (MPa):	600.18	811.11	25.00	70.00	70.00	385.457
Layer No:		1		2		3
Radial Distance (cm):		.00		.00		.00
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-391.97		-154.22		-28.44
Radial Stress (kPa):		-200.43		97.00		-5.38
Bulk Stress (kPa):		-792.82		39.79		-39.21
Deviator Stress (kPa):		-191.54		-251.22		-23.06
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-419.32		-281.02		-956.92
Radial Strain (10 ⁻⁶):		11.51		146.40		352.99
Drop No: 3	Load (N): 42000.0					No of Iterations: 3
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied						RMS Error (%): 2.41
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	668.000	550.000	485.000	360.000	271.000	180.000
Calculated Deflection (microns):	672.727	543.773	490.857	360.748	259.044	186.238
Difference (%):	-0.71	1.13	-1.21	-0.21	4.41	-3.47
Layer No:	1	2	3	4	1	1-(adj)
Seed Moduli (MPa):	600.18	811.11	25.00	70.00	70.00	N/A
Calculated Moduli (MPa):	800.65	1215.56	42.90	70.00	70.00	514.203
Layer No:		1		2		3
Radial Distance (cm):		.00		.00		.00
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-477.66		-191.83		-38.00
Radial Stress (kPa):		-254.97		105.27		-6.88
Bulk Stress (kPa):		-987.59		18.72		-51.76
Deviator Stress (kPa):		-222.69		-297.10		-31.12
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-373.67		-223.63		-751.05
Radial Strain (10 ⁻⁶):		1.81		113.66		279.01
Drop No: 4	Load (N): 28100.0					No of Iterations: 5
Convergence: Iteration Limit (10)						RMS Error (%): 5.95
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	387.000	305.000	245.000	171.000	118.000	75.000
Calculated Deflection (microns):	383.346	304.416	255.189	159.832	110.479	82.901
Difference (%):	.94	.19	-4.16	6.53	6.37	-10.53
Layer No:	1	2	3	4	1	1-(adj)
Seed Moduli (MPa):	800.65	1215.56	42.90	70.00	70.00	N/A
Calculated Moduli (MPa):	3581.68	289.76	85.84	70.00	70.00	2300.272
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-163.41		-84.95		-45.02
Radial Stress (kPa):		888.11		23.98		-1.34
Bulk Stress (kPa):		1612.81		-36.98		-47.69
Deviator Stress (kPa):		-1051.53		-108.93		-43.68
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-219.20		-356.06		-511.39
Radial Strain (10 ⁻⁶):		177.14		162.72		211.25
Layer No:	1	2	3	4	1	1-(adj)
Mean Moduli (MPa):	1487.50	720.12	44.68	70.00	70.00	955.32
Normalized Moduli (MPa):	967.50	564.04	25.00	70.00	70.00	621.362
K1 (MPa):	N/A	N/A	.60	N/A	N/A	N/A
K2:	N/A	N/A	N/A	-2.08	N/A	N/A
R-Squared:	N/A	N/A	N/A	18.39	N/A	N/A
Soil Type:	N/A	N/A	N/A	Fine	N/A	N/A

Route: No hay capa rígida

Plate Radius (cm): 15.0

No of Sensors: 6

Offsets (cm): .0 20.3 30.5 61.0 91.5 122.0

No of Layers: 4

Stiff Layer: No

P-Ratio: .350 .380 .420 .350

Station	Load (N)	EAdj(MPa)	E(1)(MPa)	E(2)(MPa)	E(3)(MPa)	E(4)(MPa)	RMS Error
125.00	Thickness (cm)	-	10.00	20.00	200.00	-	-
125.00	40000.0	621.4	967.5	564.0	25.0	70.0	6.20
125.00	35000.0	385.5	600.2	811.1	25.0	70.0	3.52
125.00	42000.0	514.2	800.6	1215.6	42.9	70.0	2.41
125.00	28100.0	2300.3	3581.7	289.8	85.8	70.0	5.95
125.00	Norm.	621.4	967.5	564.0	25.0	70.0	4.52

Route: EXAMPLE NO. 2 - STIFF LAYER AT 350 MPA
 Plate Radius (cm): 15.0
 No of Sensors: 6
 Offsets (cm): .0 20.3 30.5 61.0 91.5 122.0

No of Layers: 4
 Stiff Layer: Yes
 P-Ratio: .350 .400 .450 .350

Station: 210.00	No of Drops: 4					Average RMS Error(%): 1.82
Thickness (cm): 10.00 40.00 797.48						Pavement Temperature (C): 20.0
Drop No: 1	Load (N): 74364.0					No of Iterations: 5
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied						RMS Error (%): 1.91
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	914.000	742.000	639.000	426.000	285.000	197.000
Calculated Deflection (microns):	893.739	754.962	652.641	417.244	280.748	200.332
Difference (%):	2.22	-1.75	-2.13	2.06	1.49	-1.69
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	2800.00	180.00	100.00	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	8954.49	158.11	69.93	350.00	6910.682	
Layer No:	1		2		3	
Radial Distance (cm):	.00		18.00		45.00	
Position:	Bottom		Middle		Top	
Vertical Stress (kPa):	-228.67		-82.33		-27.06	
Radial Stress (kPa):	4619.41		5.63		-2.29	
Bulk Stress (kPa):	9010.15		-71.08		-31.64	
Deviator Stress (kPa):	-4848.08		-87.96		-24.77	
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-386.85		-530.56		-311.75	
Radial Strain (10 ⁻⁶):	344.26		248.29		201.77	
Drop No: 2	Load (N): 53480.0					No of Iterations: 3
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied						RMS Error (%): 1.99
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	706.000	574.000	490.000	323.000	213.000	145.000
Calculated Deflection (microns):	689.713	582.386	502.442	316.650	209.361	147.557
Difference (%):	2.31	-1.46	-2.54	1.97	1.71	-1.76
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	8954.49	158.11	69.93	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	8595.49	134.01	67.97	350.00	6633.621	
Layer No:	1		2		3	
Radial Distance (cm):	.00		18.00		45.00	
Position:	Bottom		Middle		Top	
Vertical Stress (kPa):	-154.72		-58.71		-20.12	
Radial Stress (kPa):	3451.88		1.52		-1.86	
Bulk Stress (kPa):	6749.03		-55.68		-23.85	
Deviator Stress (kPa):	-3606.60		-60.22		-18.25	
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-299.11		-432.55		-236.88	
Radial Strain (10 ⁻⁶):	267.33		196.60		152.49	
Drop No: 3	Load (N): 41909.0					No of Iterations: 2
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied						RMS Error (%): 1.78
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	567.000	457.000	388.000	250.000	162.000	111.000
Calculated Deflection (microns):	555.110	463.665	396.592	244.803	160.218	112.589
Difference (%):	2.10	-1.46	-2.21	2.08	1.10	-1.43
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	8595.49	134.01	67.97	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	7617.17	131.25	69.50	350.00	5878.598	
Layer No:	1		2		3	
Radial Distance (cm):	.00		18.00		45.00	
Position:	Bottom		Middle		Top	
Vertical Stress (kPa):	-128.37		-48.07		-16.14	
Radial Stress (kPa):	2598.32		.84		-1.44	
Bulk Stress (kPa):	5068.26		-46.39		-19.02	
Deviator Stress (kPa):	-2726.69		-48.91		-14.70	
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-255.63		-358.84		-185.30	
Radial Strain (10 ⁻⁶):	227.62		162.87		121.31	
Drop No: 4	Load (N): 27446.0					No of Iterations: 2
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied						RMS Error (%): 1.60
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	385.000	307.000	256.000	160.000	101.000	70.000
Calculated Deflection (microns):	378.521	310.230	261.491	156.146	100.808	70.664
Difference (%):	1.68	-1.05	-2.14	2.41	.19	-.95
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	7617.17	131.25	69.50	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	6256.72	128.51	72.04	350.00	4828.666	
Position:	Bottom		Middle		Top	
Vertical Stress (kPa):	-92.64		-33.74		-10.91	
Radial Stress (kPa):	1583.29		.30		-.91	
Bulk Stress (kPa):	3073.94		-33.14		-12.73	
Deviator Stress (kPa):	-1675.93		-34.04		-10.00	
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-191.94		-254.99		-120.27	
Radial Strain (10 ⁻⁶):	169.67		115.89		81.04	
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Mean Moduli (MPa):	7855.97	137.97	69.86	350.00	8062.89	
Normalized Moduli (MPa):	7437.60	130.89	69.84	350.00	5740.015	
K1 (MPa):	N/A	147.34	66.68	N/A	N/A	
K2:	N/A	.32	-.04	N/A	N/A	
R-Squared:	N/A	88.16	59.47	N/A	N/A	
Soil Type:	N/A	Coarse	Fine	N/A	N/A	

Route: EXAMPLE NO. 2 - STIFF LAYER AT 350 MPA
 Plate Radius (cm): 15.0
 No of Sensors: 6
 Offsets (cm): 0 20.3 30.5 61.0 91.5 122.0

No of Layers: 4
 Stiff Layer: Yes
 P-Ratio: .350 .400 .450 .350

Station: 210.00		No of Drops: 4		Average RMS Error(%): 1.87		
Thickness (cm): 10.00 40.00 797.48				Pavement Temperature (C): 20.0		
Drop No: 1		Load (N): 74364.0		No of Iterations: 5		
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.91		
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	914.000	742.000	639.000	426.000	285.000	197.000
Calculated Deflection (microns):	893.739	754.962	652.641	417.244	280.748	200.332
Difference (%):	2.22	-1.75	-2.13	2.06	1.49	-1.69
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	2800.00	180.00	100.00	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	8954.49	158.11	69.93	350.00	6910.682	
Layer No:		1		2		3
Radial Distance (cm):		.00		18.00		45.00
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-228.67		-82.33		-27.06
Radial Stress (kPa):		4619.41		5.63		-2.29
Bulk Stress (kPa):		9010.15		-71.08		-31.64
Deviator Stress (kPa):		-4848.08		-87.96		-24.77
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-386.65		-530.56		-311.75
Radial Strain (10 ⁻⁶):		344.26		248.29		201.77
Drop No: 2		Load (N): 53480.0		No of Iterations: 3		
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.99		
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	706.000	574.000	490.000	323.000	213.000	145.000
Calculated Deflection (microns):	689.713	582.386	502.442	316.650	209.361	147.557
Difference (%):	2.31	-1.46	-2.54	1.97	1.71	-1.76
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	8954.49	158.11	69.93	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	8595.49	134.01	67.97	350.00	6633.621	
Layer No:		1		2		3
Radial Distance (cm):		.00		18.00		45.00
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-154.72		-58.71		-20.12
Radial Stress (kPa):		3451.88		1.52		-1.86
Bulk Stress (kPa):		6749.03		-55.68		-23.85
Deviator Stress (kPa):		-3606.60		-60.22		-18.25
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-299.11		-432.55		-236.88
Radial Strain (10 ⁻⁶):		267.33		196.60		152.49
Drop No: 3		Load (N): 41910.0		No of Iterations: 3		
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.98		
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	573.000	457.000	388.000	250.000	162.000	111.000
Calculated Deflection (microns):	559.631	465.261	396.757	244.044	160.069	112.808
Difference (%):	2.33	-1.81	-2.26	2.38	1.19	-1.63
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	8595.49	134.01	67.97	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	7182.95	134.79	69.30	350.00	5543.489	
Layer No:		1		2		3
Radial Distance (cm):		.00		18.00		45.00
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-134.23		-49.08		-16.11
Radial Stress (kPa):		2518.78		1.37		-1.37
Bulk Stress (kPa):		4903.34		-46.33		-18.84
Deviator Stress (kPa):		-2653.01		-50.45		-14.74
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-264.15		-359.33		-185.70
Radial Strain (10 ⁻⁶):		234.47		164.66		122.69
Drop No: 4		Load (N): 27446.0		No of Iterations: 2		
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.60		
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	385.000	307.000	256.000	160.000	101.000	70.000
Calculated Deflection (microns):	378.530	310.230	261.487	156.142	100.807	70.666
Difference (%):	1.68	-1.05	-2.14	2.41	.19	-.95
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	7182.95	134.79	69.30	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	6254.82	128.54	72.04	350.00	4827.197	
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-92.66		-33.75		-10.91
Radial Stress (kPa):		1582.99		.30		-.91
Bulk Stress (kPa):		3073.33		-33.14		-12.73
Deviator Stress (kPa):		-1675.65		-34.05		-10.00
Vertical Strain (10 ⁻⁶):		-191.97		-254.98		-120.27
Radial Strain (10 ⁻⁶):		169.69		115.89		81.04
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Mean Moduli (MPa):	7746.94	138.86	69.81	350.00	5978.75	
Normalized Moduli (MPa):	7060.39	133.97	69.66	350.00	5448.901	
K1 (MPa):	N/A	147.97	66.65	N/A		
K2:	N/A	.31	-.04	N/A		
R-Squared:	N/A	88.92	58.44	N/A		
Soil Type:	N/A	Coarse	Fine	N/A		

Route: EXAMPLE NO. 2 - STIFF LAYER AT 350 MPa
 Plate Radius (cm): 15.0
 No of Sensors: 6
 Offsets (cm): .0 20.3 30.5 61.0 91.5 122.0

No of Layers: 4
 Stiff Layer: Yes
 P-Ratio: 350 400 450 350

Station: 210.00		No of Drops: 4		Average RMS Error(%): 1.82		
Thickness (cm): 10.00 40.00 797.48				Pavement Temperature (C): 20.0		
Drop No: 1		Load (N): 74364.0		No of Iterations: 5		
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.91		
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	914.000	742.000	639.000	426.000	285.000	197.000
Calculated Deflection (microns):	893.739	754.962	652.641	417.244	280.748	200.332
Difference (%):	2.22	-1.75	-2.13	2.06	1.49	-1.69
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	2800.00	180.00	100.00	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	8954.49	158.11	69.93	350.00	5750.866	
Layer No:		1		2		3
Radial Distance (cm):		.00		18.00		45.00
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-228.67		-82.33		-27.06
Radial Stress (kPa):		4619.41		5.63		-2.29
Bulk Stress (kPa):		9010.15		-71.08		-31.64
Deviator Stress (kPa):		-4848.08		-87.96		-24.77
Vertical Strain (10^-6):		-386.65		-530.56		-311.75
Radial Strain (10^-6):		344.26		248.29		201.77
Drop No: 2		Load (N): 53480.0		No of Iterations: 3		
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.99		
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	706.000	574.000	490.000	323.000	213.000	145.000
Calculated Deflection (microns):	689.713	582.386	502.442	316.650	209.361	147.557
Difference (%):	2.31	-1.46	-2.54	1.97	1.71	-1.76
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	8954.49	158.11	69.93	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	8595.49	134.01	67.97	350.00	5520.304	
Layer No:		1		2		3
Radial Distance (cm):		.00		18.00		45.00
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-154.72		-58.71		-20.12
Radial Stress (kPa):		3451.88		1.52		-1.86
Bulk Stress (kPa):		6749.03		-55.68		-23.85
Deviator Stress (kPa):		-3606.60		-60.22		-18.25
Vertical Strain (10^-6):		-299.11		-432.55		-236.88
Radial Strain (10^-6):		267.33		196.60		152.49
Drop No: 3		Load (N): 41909.0		No of Iterations: 2		
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.78		
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	567.000	457.000	388.000	250.000	162.000	111.000
Calculated Deflection (microns):	555.110	463.665	396.592	244.803	160.218	112.589
Difference (%):	2.10	-1.46	-2.21	2.08	1.10	-1.43
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	8595.49	134.01	67.97	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	7617.17	131.25	69.50	350.00	4891.996	
Layer No:		1		2		3
Radial Distance (cm):		.00		18.00		45.00
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-128.37		-48.07		-16.14
Radial Stress (kPa):		2598.32		.84		-1.44
Bulk Stress (kPa):		5068.26		-46.39		-19.02
Deviator Stress (kPa):		-2726.69		-48.91		-14.70
Vertical Strain (10^-6):		-255.63		-358.84		-185.30
Radial Strain (10^-6):		227.62		162.87		121.31
Drop No: 4		Load (N): 27446.0		No of Iterations: 2		
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.60		
Sensor No:	1	2	3	4	5	6
Measured Deflections (microns):	385.000	307.000	256.000	160.000	101.000	70.000
Calculated Deflection (microns):	378.521	310.230	261.491	156.146	100.808	70.664
Difference (%):	1.68	-1.05	-2.14	2.41	.19	-.95
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Seed Moduli (MPa):	7617.17	131.25	69.50	350.00	N/A	
Calculated Moduli (MPa):	6256.72	128.51	72.04	350.00	4018.273	
Position:		Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):		-92.64		-33.74		-10.91
Radial Stress (kPa):		1583.29		.30		-.91
Bulk Stress (kPa):		3073.94		-33.14		-12.73
Deviator Stress (kPa):		-1675.93		-34.04		-10.00
Vertical Strain (10^-6):		-191.94		-254.99		-120.27
Radial Strain (10^-6):		169.67		115.89		81.04
Layer No:	1	2	3	4	1-(adj)	
Mean Moduli (MPa):	7855.97	137.97	69.86	350.00	5045.36	
Normalized Moduli (MPa):	7437.60	130.89	69.84	350.00	4776.672	
K1 (MPa):	N/A	147.34	66.68	N/A	N/A	
K2:	N/A	.32	-.04	N/A	N/A	
R-Squared:	N/A	88.16	59.47	N/A	N/A	
Soil Type:	N/A	Coarse	Fine	N/A	N/A	

ANEXO C

Resultados de esfuerzos principales en losas empleando el método de elementos finitos

	LOSA					BASE			Rigidez inicial MPa/mm	Desplazamiento interfaz losa - base, mm	K, MPa/mm	Trabazón agregado			
	E MPa	μ	α (/°C)	γ Kg/m ³	μ	E	μ	γ				No lineal	Modelo	Abertura en juntas, mm	
														1 y 2	2 y 3
T2S2MR35	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000	0.1	0.0	0.035	*	duro	0.5	0.5
T2S2MR70	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000			0.07	*	duro	0.5	0.5
T2S2MR70b	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000	0.1	0.1	0.07	*	duro	0.5	0.5
T2S2MR70c	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000							
	Base 2					120	0.3	2000	0.1	0.1	0.07	*	duro	0.5	0.5
	Base 3					50	0.2	0							
T2S2MR70d	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000							
	Base 2					120	0.3	2000	0.1	0.1	0.12	*	duro	0.5	0.5
	Base 3					50	0.2	0							
T2S2MR70e	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000							
	Base 2					120	0.3	2000	0.6	0.5	0.12	*	duro	0.5	0.5
	Base 3					50	0.2	0							
T2S2MR70f	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000							
	Base 2					120	0.3	2000	0.6	0.5	0.12	*	duro	0.5	0.5
	Base 3					50	0.2	0							
T2S2MR70g	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000							
	Base 2					120	0.3	2000	0.6	0.5	0.6	*	duro	0.5	0.5
	Base 3					50	0.2	0							
T2S2MR70h	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000							
	Base 2					120	0.3	2000	0.6	0.5	0.3	*	duro	0.5	0.5
	Base 3					50	0.2	0							
T2S2MR70i	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000							
	Base 2					120	0.3	2000	0.6	0.5	0.3	*	duro	0.5	0.5
	Base 3					50	0.2	0							
T2S2MR70j	30,372	0.2	1.1 e	2,400	0.3	172	0.3	2000							
	Base 2					120	0.3	2000	0.6	0.5	0.6	*	duro	0.5	0.5
	Base3					50	0.2	0							

Sistemas de cargas en ejes, Arreglo A				
T2S2MR35 T2S2MR70 T2S2MR70b T2S2MR70c T2S2MR70d T2S2MR70e		Eje sencillo	Eje Doble 1	Eje Doble 2
	Carga	53	98	98
	X	10,090	4,240	2,410
	Y	530	530	530
	L	200	200	200
	W	150	150	150
	A	1,800	1,500	1,500
	B		300	300
	Cambio de Temperatura	Cambio 1 (°C)	Cambio 2 (°C)	Cambio 3 (°C)
3	-4.0	-1.50	50	

Sistemas de cargas en ejes, Arreglo B				
T2S2MR70f T2S2MR70g T2S2MR70h T2S2MR70j		Eje sencillo	Eje Doble 1	Eje Doble 2
	Carga	53	98	98
	X	10,090	4,278	2525
	Y	-3,076	-3,076	-3,076
	L	200	200	200
	W	150	150	150
	A	1,800	1,500	1,500
	B		300	300
	Cambio de Temperatura	Cambio 1 (°C)	Cambio 2 (°C)	Cambio 3 (°C)
3	-4.0	-1.50	50	

T2S2MR35 – Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	0.491	MPa	MAX:	1.0539	MPa	MAX:	0.485746	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	-2400.03	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-2400.03	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.75421	MPa	MIN:	-1.88383	MPa	MIN:	-1.10177	MPa
X:	333.367	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.00	mm	Y:	-3600.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.501597	MPa	MAX:	1.36552	MPa	MAX:	0.505376	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	10250.4	mm
Y:	-1499.96	mm	Y:	1799.95	mm	Y:	1499.96	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.871795	MPa	MIN:	-2.1416	MPa	MIN:	-1.03232	MPa
X:	1499.97	mm	X:	5804.36	mm	X:	11400.4	mm
Y:	299.992	mm	Y:	1499.96	mm	Y:	299.992	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.492731	MPa	MAX:	1.05198	MPa	MAX:	0.489346	MPa
X:	1833.29	mm	X:	5262.7	mm	X:	9100.94	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	1800.05	mm	Y:	2350.02	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.578655	MPa	MIN:	-1.86455	MPa	MIN:	-1.03767	MPa
X:	1000.0	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	2350.02	mm	Y:	2900	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

T2S2MR70 – Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	1.43803	MPa	MAX:	1.39052	MPa	MAX:	1.11405	MPa
X:	1333.32	mm	X:	5262.7	mm	X:	13125.4	mm
Y:	-1800.05	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-1800.05	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-1.22904	MPa	MIN:	-2.21564	MPa	MIN:	-1.73939	MPa
X:	1833.29	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	-3600.0	mm	Y:	-3000.02	mm	Y:	-3600.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	1.48906	MPa	MAX:	1.53102	MPa	MAX:	1.27516	MPa
X:	133.32	mm	X:	5262.7	mm	X:	13125.4	mm
Y:	1799.95	mm	Y:	-299.992	mm	Y:	-1799.95	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-1.28218	MPa	MIN:	-2.36096	MPa	MIN:	-1.73984	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	1800.05	mm	Y:	-299.992	mm	Y:	-299.992	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.620722	MPa	MAX:	1.33208	MPa	MAX:	0.825582	MPa
X:	1999.95	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	1800.05	mm	Y:	1800.05	mm	Y:	3999.95	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-249.99	mm
MIN:	-0.747008	MPa	MIN:	-2.15367	MPa	MIN:	1.5897	MPa
X:	1666.63	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	1800.05	mm	Y:	3449.97	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

T2S2MR70b – Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	0.490285	MPa	MAX:	1.18251	MPa	MAX:	0.48353	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	-2400.03	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-2400.03	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.82755	MPa	MIN:	-2.01194	MPa	MIN:	-1.26018	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.5148	MPa	MAX:	1.4231	MPa	MAX:	0.502509	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	10250.4	mm
Y:	1499.96	mm	Y:	1799.95	mm	Y:	1499.96	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-1.01421	MPa	MIN:	-2.23127	MPa	MIN:	-1.23484	MPa
X:	1666.63	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	299.992	mm	Y:	0.0	mm	Y:	-299.992	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.494636	MPa	MAX:	1.1378	MPa	MAX:	0.488022	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	9100.44	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	1800.05	mm	Y:	2350.02	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.578222	MPa	MIN:	-1.94974	MPa	MIN:	-1.18361	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	2900.0	mm	Y:	2350.2	mm	Y:	2900.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

T2S2MR70c – Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	0.502705	MPa	MAX:	1.10717	MPa	MAX:	0.489595	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	-2400.03	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-2400.03	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.820934	MPa	MIN:	-1.92974	MPa	MIN:	-1.21091	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.507723	MPa	MAX:	1.35188	MPa	MAX:	0.511134	MPa
X:	666.683	mm	X:	5804.36	mm	X:	12550.4	mm
Y:	1499.96	mm	Y:	1799.95	mm	Y:	1499.96	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.9744185	MPa	MIN:	-214603	MPa	MIN:	-1.15247	MPa
X:	1333.32	mm	X:	5262.2	mm	X:	11400.4	mm
Y:	299.992	mm	Y:	0.0	mm	Y:	299.992	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.49878	MPa	MAX:	1.07474	MPa	MAX:	0.490914	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	3999.95	mm	Y:	2350.02	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.616794	MPa	MIN:	-1.89333	MPa	MIN:	-1.137	MPa
X:	833.342	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	2900.0	mm	Y:	2350.02	mm	Y:	2900.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

T2S2MR70d – Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	0.501379	MPa	MAX:	1.16262	MPa	MAX:	0.488265	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	-2400.03	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-2400.03	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.84149	MPa	MIN:	-1.98261	MPa	MIN:	-1.27678	MPa
X:	333.367	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825	mm
Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.507598	MPa	MAX:	1.40133	MPa	MAX:	0.509794	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	1499.96	mm	Y:	1799.95	mm	Y:	1499.96	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-1.02706	MPa	MIN:	-2.20259	MPa	MIN:	-1.24104	MPa
X:	1499.97	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825	mm
Y:	299.992	mm	Y:	0.0	mm	Y:	-299.992	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.500662	MPa	MAX:	1.11779	MPa	MAX:	0.489646	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	3999.95	mm	Y:	2350.02	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.615853	MPa	MIN:	-1.93437	MPa	MIN:	-1.1938	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	2900.0	mm	Y:	2350.02	mm	Y:	2900.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

T2S2MR70e – Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	0.506084	MPa	MAX:	1.16221	MPa	MAX:	0.491156	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	-2400.03	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-2400.03	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.878988	MPa	MIN:	-1.9791	MPa	MIN:	-1.28296	MPa
X:	500.025	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.519738	MPa	MAX:	1.39735	MPa	MAX:	0.519214	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	1499.96	mm	Y:	0.0	mm	Y:	1499.96	mm
Z:	-124.97	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-1.05798	MPa	MIN:	-2.19914	MPa	MIN:	-1.25048	MPa
X:	1499.97	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	299.992	mm	Y:	0.0	mm	Y:	-299.992	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.501823	MPa	MAX:	1.12099	MPa	MAX:	0.492927	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	3999.95	mm	Y:	2350.02	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.657038	MPa	MIN:	-1.93928	MPa	MIN:	-1.20757	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	2900.0	mm	Y:	2350.02	mm	Y:	2900.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

T2S2MR70f – Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	0.498347	MPa	MAX:	1.37532	MPa	MAX:	0.494875	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	9100.44	mm
Y:	-2400.03	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-2400.03	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.972261	MPa	MIN:	-2.1766	MPa	MIN:	-1.21352	MPa
X:	1166.66	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.0	mm	Y:	-3600.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.5161	MPa	MAX:	1.21715	MPa	MAX:	0.515874	MPa
X:	1166.66	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	-1499.96	mm	Y:	0.0	mm	Y:	1499.96	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.996972	MPa	MIN:	-2.03068	MPa	MIN:	-1.31266	MPa
X:	500.025	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	0.0	mm	Y:	3999.95	mm	Y:	0.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.500698	MPa	MAX:	1.10093	MPa	MAX:	0.491798	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	3999.95	mm	Y:	2350.02	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.600199	MPa	MIN:	-1.88186	MPa	MIN:	-1.20549	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	2900.0	mm	Y:	2900.0	mm	Y:	2900.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

T2S2MR70g – Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	0.499816	MPa	MAX:	1.30834	MPa	MAX:	0.496614	MPa
X:	166.708	mm	X:	5804.36	mm	X:	9100.44	mm
Y:	-2400.03	mm	Y:	-3000.02	mm	Y:	-2400.03	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.916291	MPa	MIN:	-2.12433	MPa	MIN:	-1.12515	MPa
X:	1166.66	mm	X:	5804.36	mm	X:	11400.4	mm
Y:	-3600	mm	Y:	-3000.02	mm	Y:	-3000.02	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.521682	MPa	MAX:	1.13708	MPa	MAX:	0.518728	MPa
X:	1166.66	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	-3600	mm	Y:	0.0	mm	Y:	1499.96	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.978657	MPa	MIN:	-1.95448	MPa	MIN:	-1.22187	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	0.0	mm	Y:	-299.992	mm	Y:	0.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.49995	MPa	MAX:	1.04037	MPa	MAX:	0.494012	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	3999.95	mm	Y:	2350.02	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.596708	MPa	MIN:	-1.82384	MPa	MIN:	-1.14903	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	290.0	mm	Y:	2900.0	mm	Y:	2900.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

T2S2MR70h– Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	0.499452	MPa	MAX:	1.24172	MPa	MAX:	0.499003	MPa
X:	166.708	mm	X:	5804.36	mm	X:	9100.44	mm
Y:	-2400.03	mm	Y:	-1800.05	mm	Y:	-2400.03	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.838265	MPa	MIN:	-2.05397	MPa	MIN:	-1.01792	MPa
X:	1166.66	mm	X:	5804.36	mm	X:	11400.4	mm
Y:	-3600.0	mm	Y:	-2400.03	mm	Y:	-3000.2	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.526468	MPa	MAX:	1.02209	MPa	MAX:	0.521528	MPa
X:	1333.32	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	-1799.95	mm	Y:	-299.992	mm	Y:	1499.96	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.977242	MPa	MIN:	-18463	MPa	MIN:	-1.10606	MPa
X:	833.342	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	0.0	mm	Y:	-299.992	mm	Y:	0.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.500033	MPa	MAX:	0.934968	MPa	MAX:	0.495508	MPa
X:	166.708	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	3999.96	mm	Y:	2350.02	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.597142	MPa	MIN:	-1.7245	MPa	MIN:	-1.66334	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	2900.0	mm	Y:	2900.0	mm	Y:	2900.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

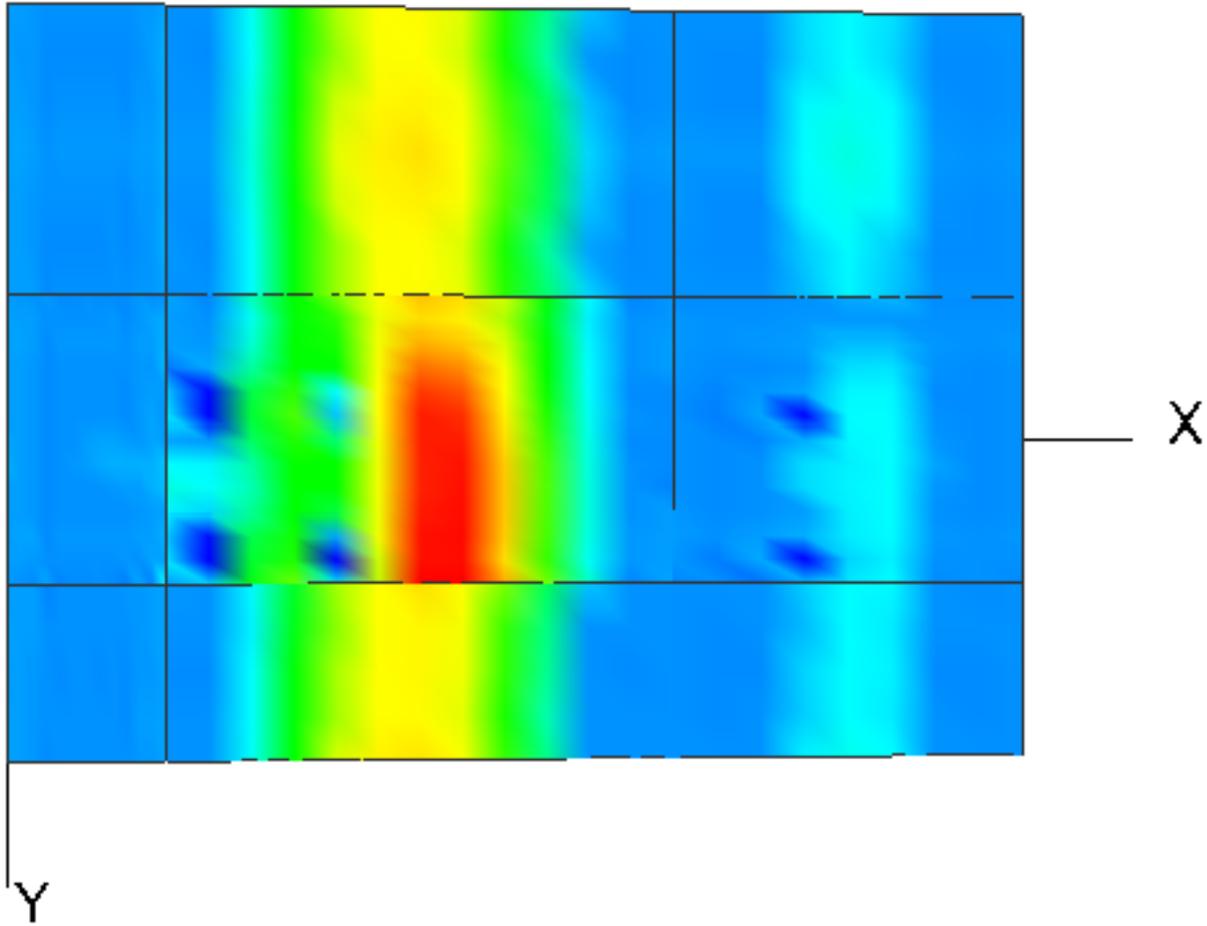
T2S2MR70i – Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	0.509759	MPa	MAX:	1.23036	MPa	MAX:	0.500504	MPa
X:	500.025	mm	X:	5804.36	mm	X:	9100.44	mm
Y:	-1800.05	mm	Y:	-1800.05	mm	Y:	-2400.03	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.766515	MPa	MIN:	-2.02437	MPa	MIN:	-0.921786	MPa
X:	1166.66	mm	X:	5804.36	mm	X:	10250	mm
Y:	-3600.0	mm	Y:	-2400.03	mm	Y:	-3000.2	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.551205	MPa	MAX:	0.962579	MPa	MAX:	0.525356	MPa
X:	1333.32	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	1799.95	mm	Y:	-299.99	mm	Y:	1499.96	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.940346	MPa	MIN:	-1.78493	MPa	MIN:	-1.01987	MPa
X:	1000.0	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	0.0	mm	Y:	-299.992	mm	Y:	0.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.1	mm
MAX:	0.50078	MPa	MAX:	0.888249	MPa	MAX:	0.497369	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	3999.95	mm	Y:	2350.02	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.575135	MPa	MIN:	-1.66221	MPa	MIN:	-0.972838	MPa
X:	666.683	mm	X:	526.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	2900.0	mm	Y:	2900.0	mm	Y:	2900.00	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

T2S2MR70h– Esfuerzo principal Máximo								
MAX:	0.50409	MPa	MAX:	1.28576	MPa	MAX:	0.499108	MPa
X:	166.708	mm	X:	5804.36	mm	X:	9100.44	mm
Y:	-2400.03	mm	Y:	-1800.05	mm	Y:	-2400.03	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.81983	MPa	MIN:	-2.08844	MPa	MIN:	-1.00861	MPa
X:	1166.66	mm	X:	5804.36	mm	X:	11400.4	mm
Y:	-3600	mm	Y:	-2400.03	mm	Y:	-3000.02	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.527003	MPa	MAX:	1.06128	MPa	MAX:	0.523215	MPa
X:	1166.66	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	1499.96	mm	Y:	-299.992	mm	Y:	1499.96	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.938338	MPa	MIN:	-1.87968	MPa	MIN:	-1.1034	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	0.0	mm	Y:	-299.992	mm	Y:	0.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm
MAX:	0.499462	MPa	MAX:	0.984763	MPa	MAX:	0.496045	MPa
X:	666.683	mm	X:	5262.7	mm	X:	12550.4	mm
Y:	2350.02	mm	Y:	3999.95	mm	Y:	2350.02	mm
Z:	-124.99	mm	Z:	-249.99	mm	Z:	-124.99	mm
MIN:	-0.579468	MPa	MIN:	-1.75248	MPa	MIN:	-1.0561	MPa
X:	333.367	mm	X:	5262.7	mm	X:	10825.4	mm
Y:	2900.0	mm	Y:	2900.0	mm	Y:	2900.0	mm
Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm	Z:	-0.01	mm

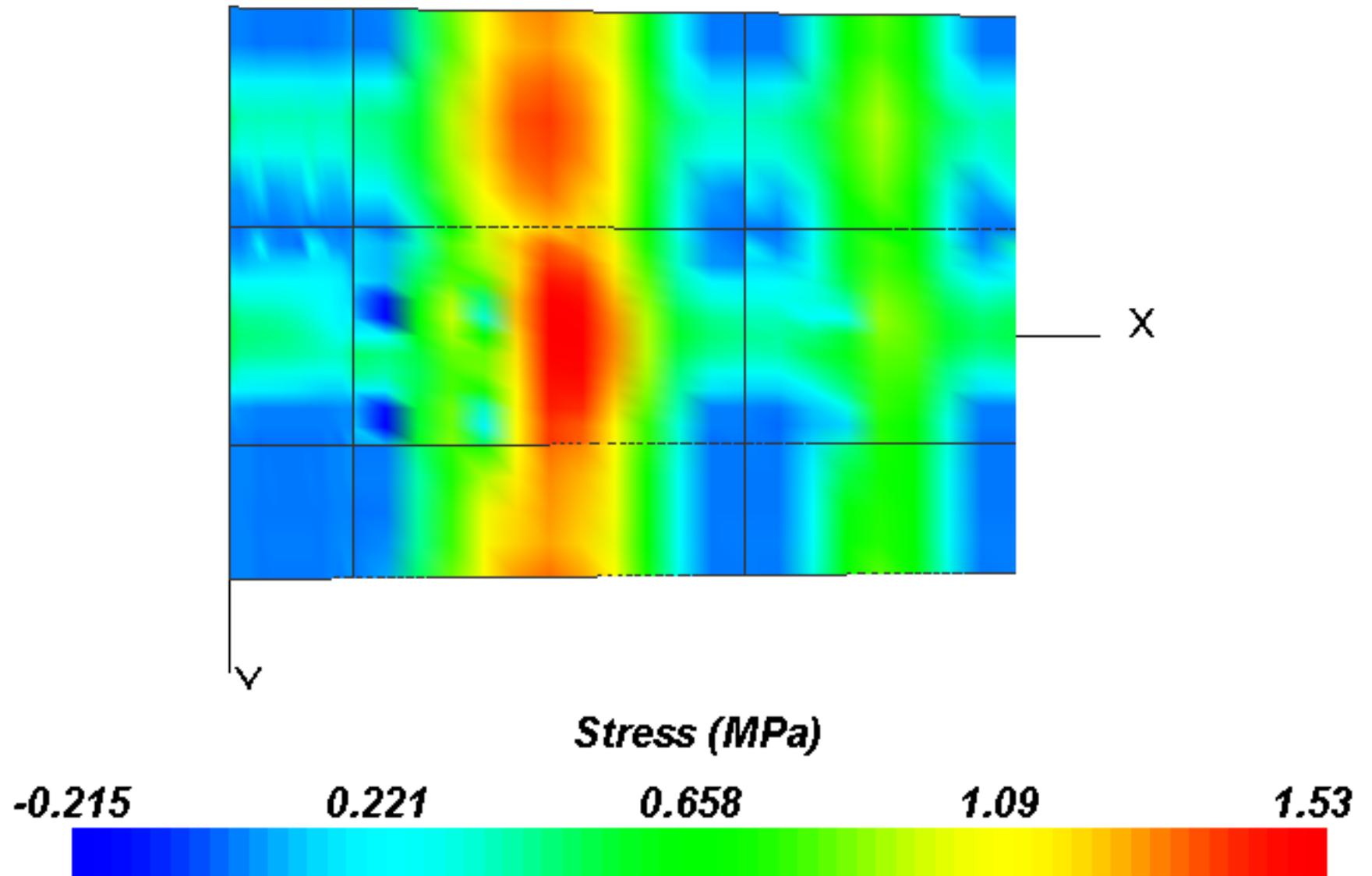
ANEXO D

Diagrama de esfuerzos en losas empleando el método de elementos finitos

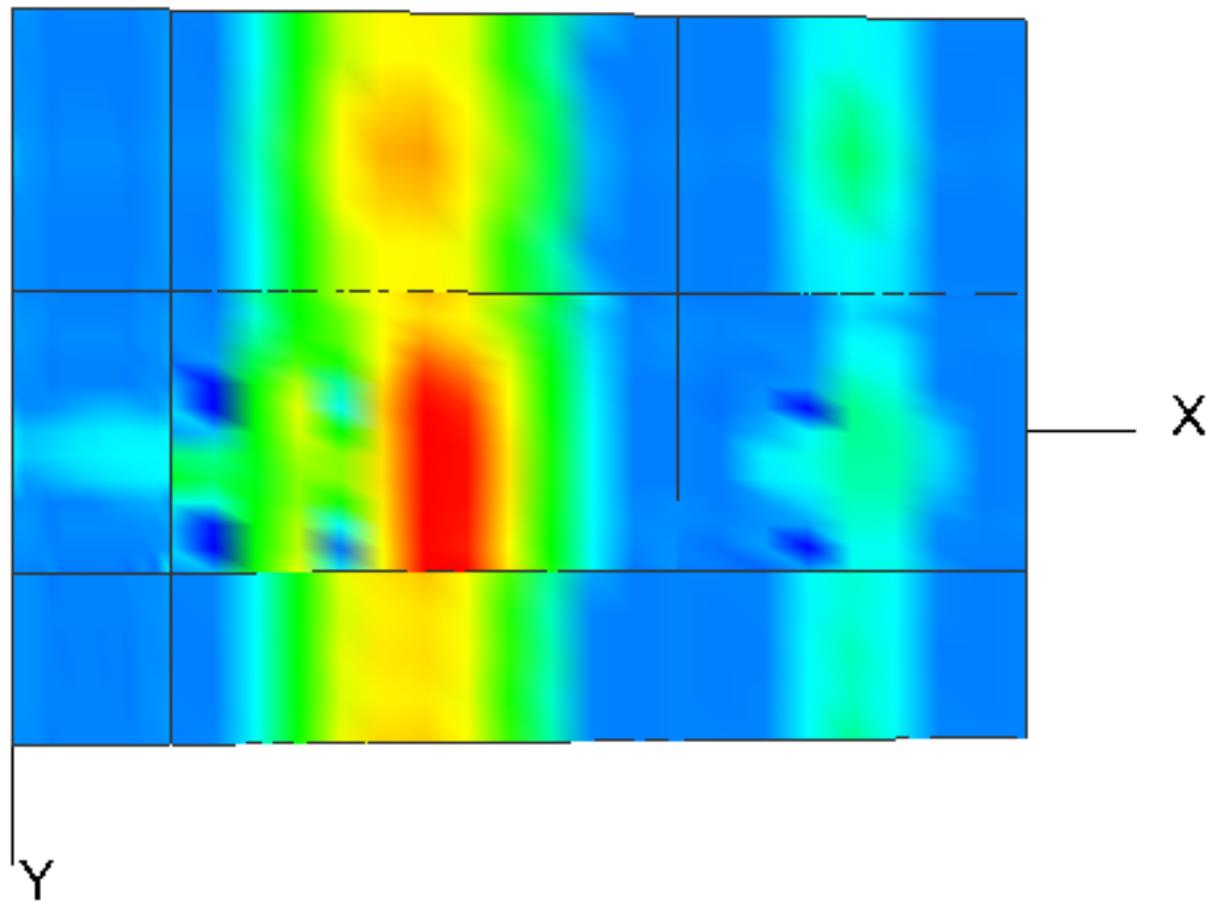
Current Project: T2S2MR35



Current Project: T2S2MR70



Current Project: T2S2MR70b



Stress (MPa)

-0.210

0.198

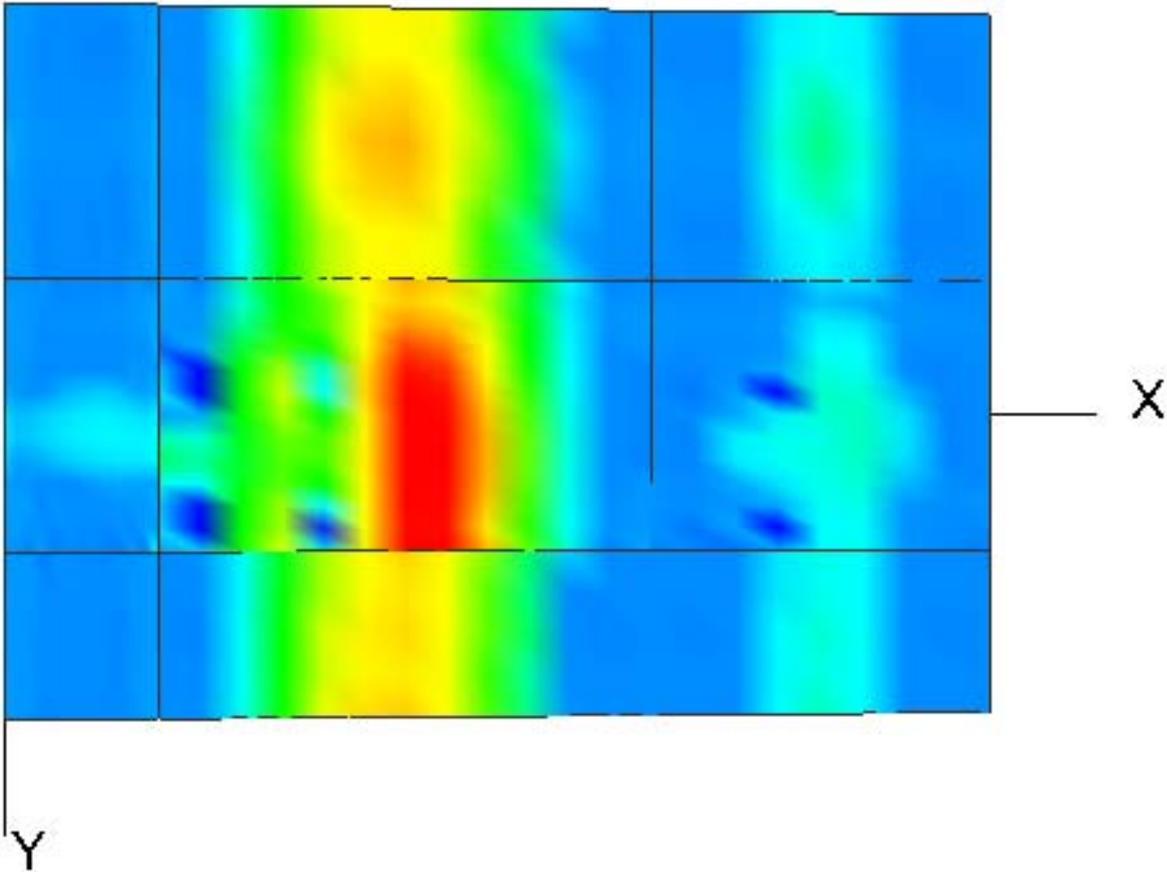
0.606

1.01

1.42



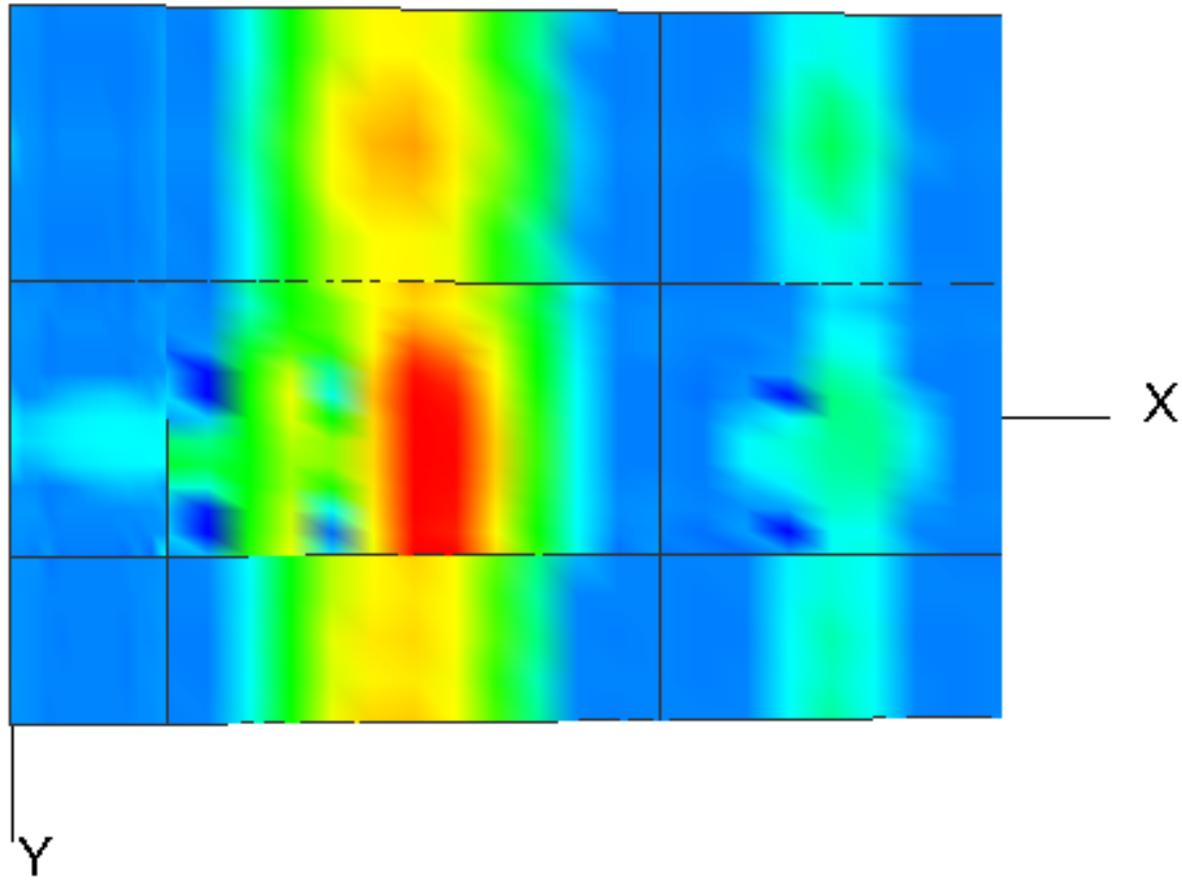
Current Project: T2S2MR70c



Stress (MPa)



Current Project: T2S2MR70d



Stress (MPa)

-0.207

0.195

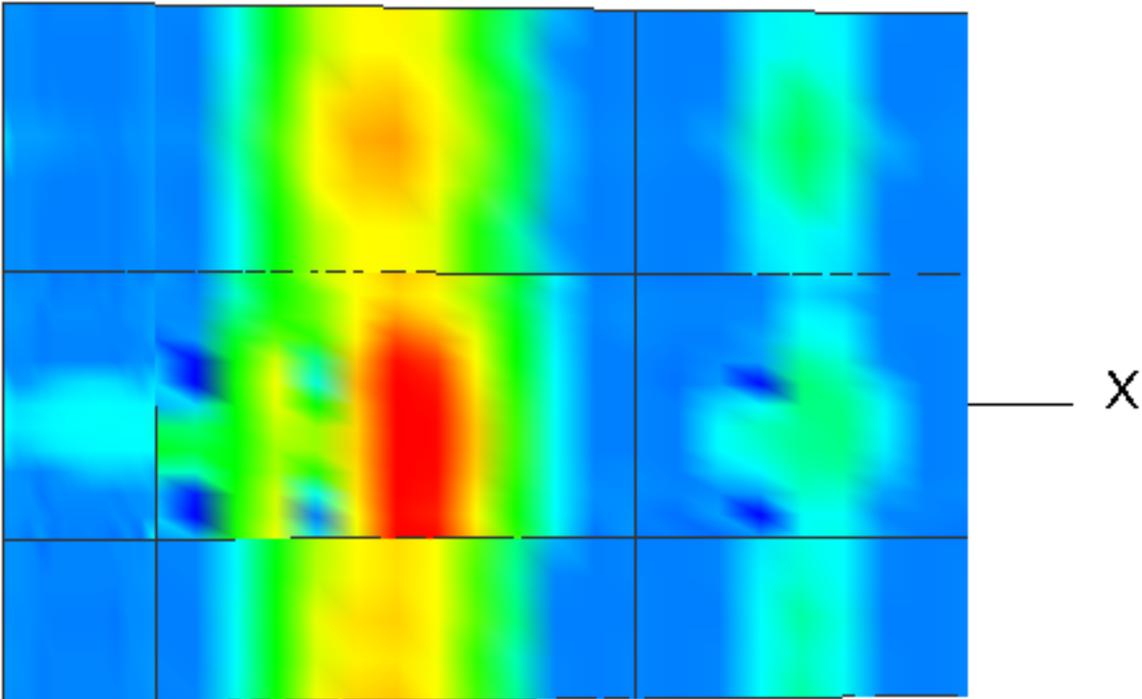
0.597

0.999

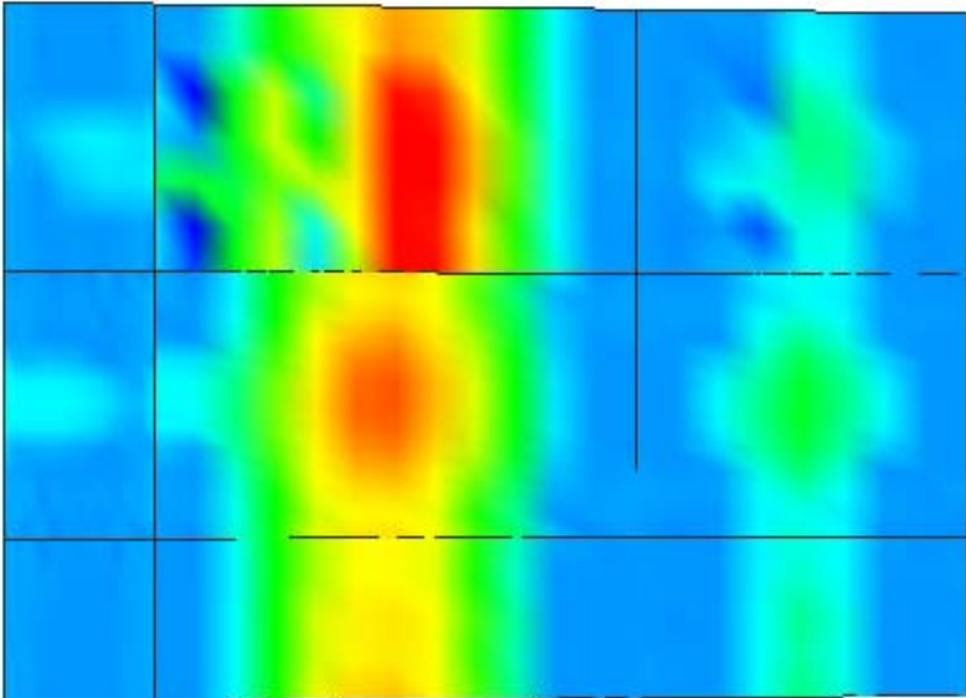
1.40



Current Project: T2S2MR70e



Current Project: T2S2MR70f



X

Y

Stress (MPa)

-0.228

0.173

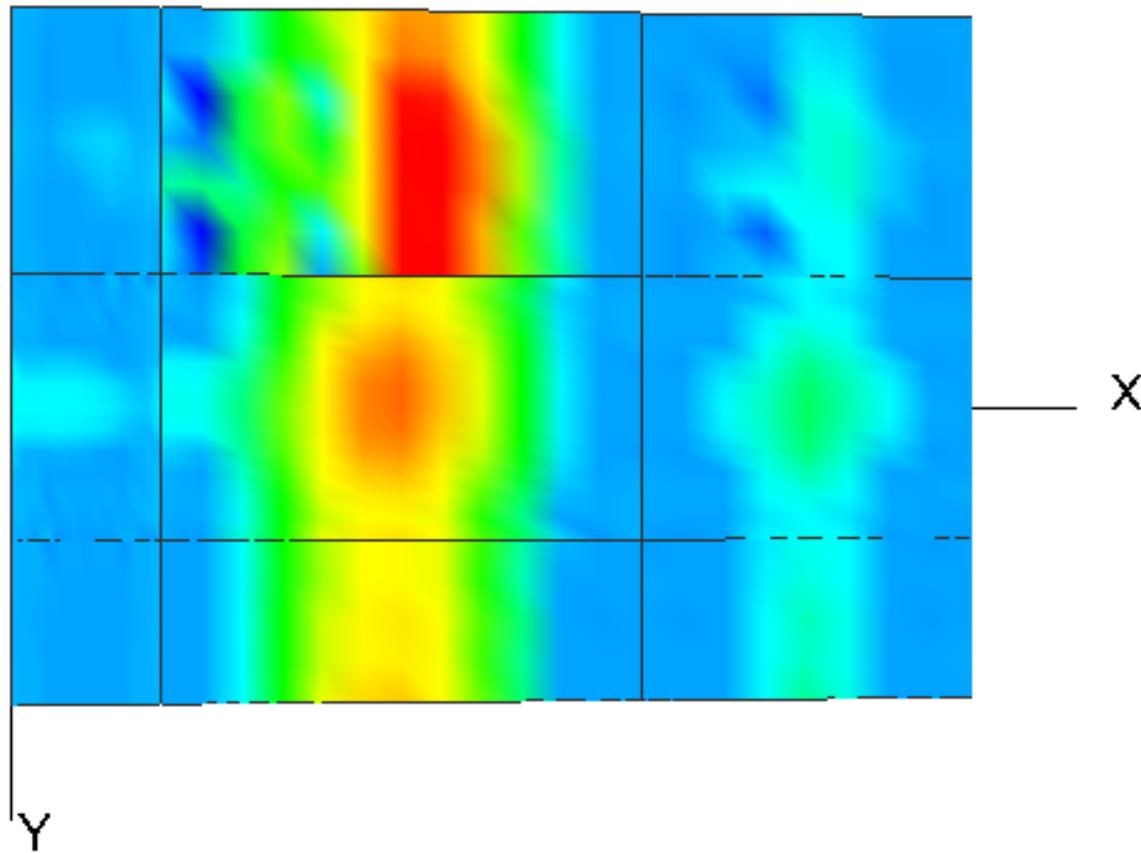
0.573

0.974

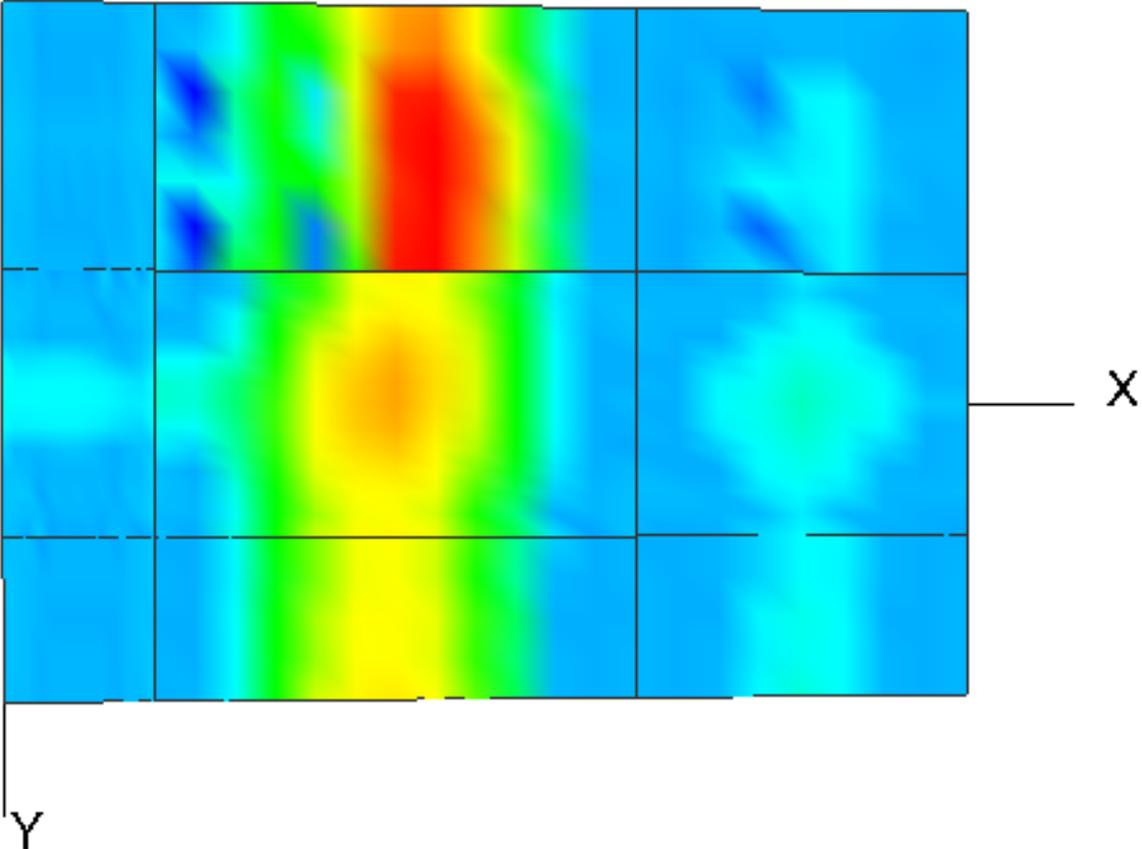
1.38



Current Project: T2S2MR70g



Current Project: T2S2MR70h



Stress (MPa)

-0.235

0.134

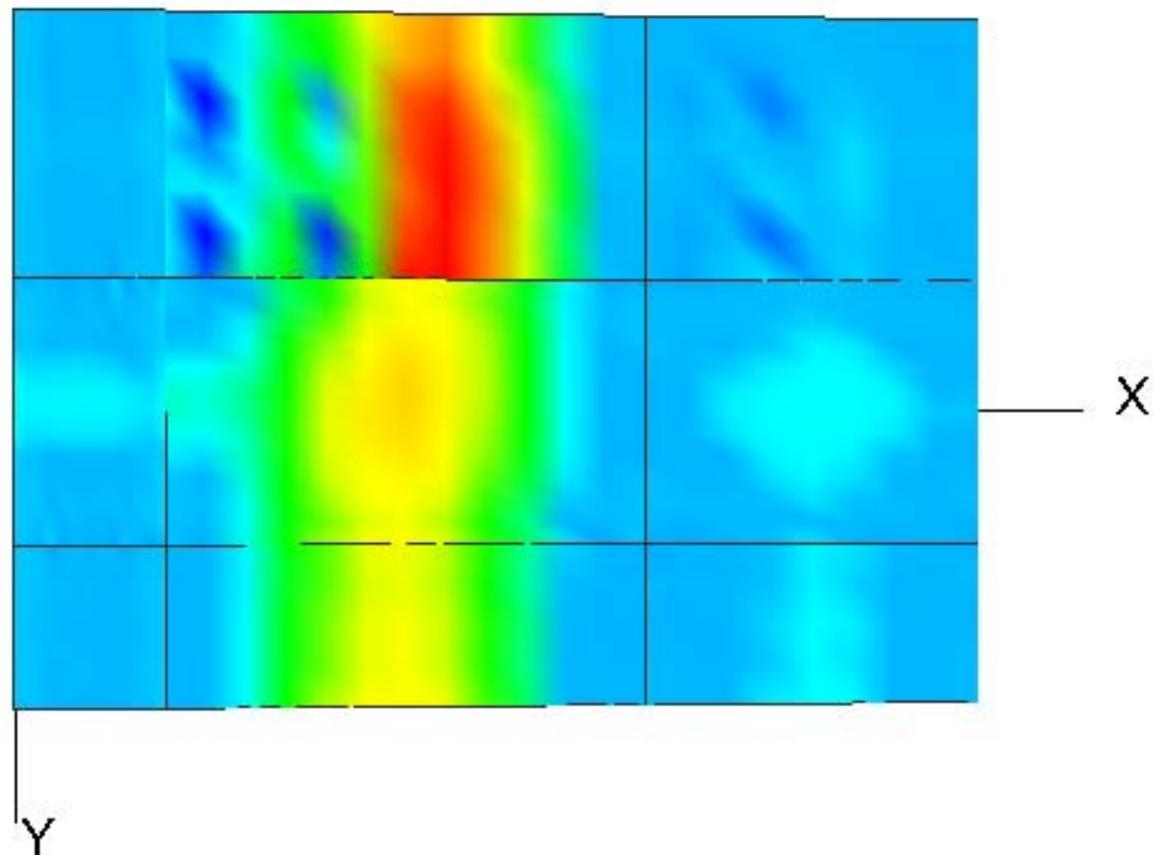
0.503

0.872

1.24



Current Project: T2S2MR70i



Stress (MPa)

-0.238

0.129

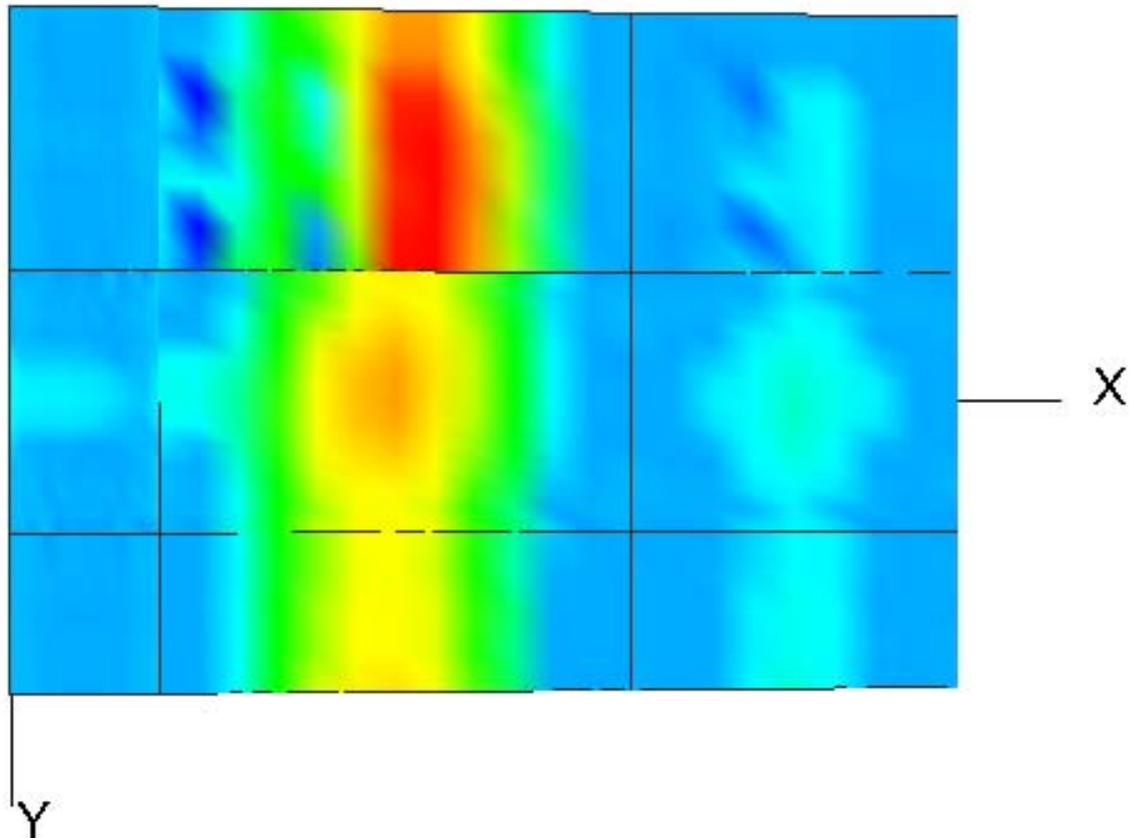
0.496

0.863

1.23



Current Project: T2S2MR70j



Stress (MPa)

-0.235

0.145

0.525

0.906

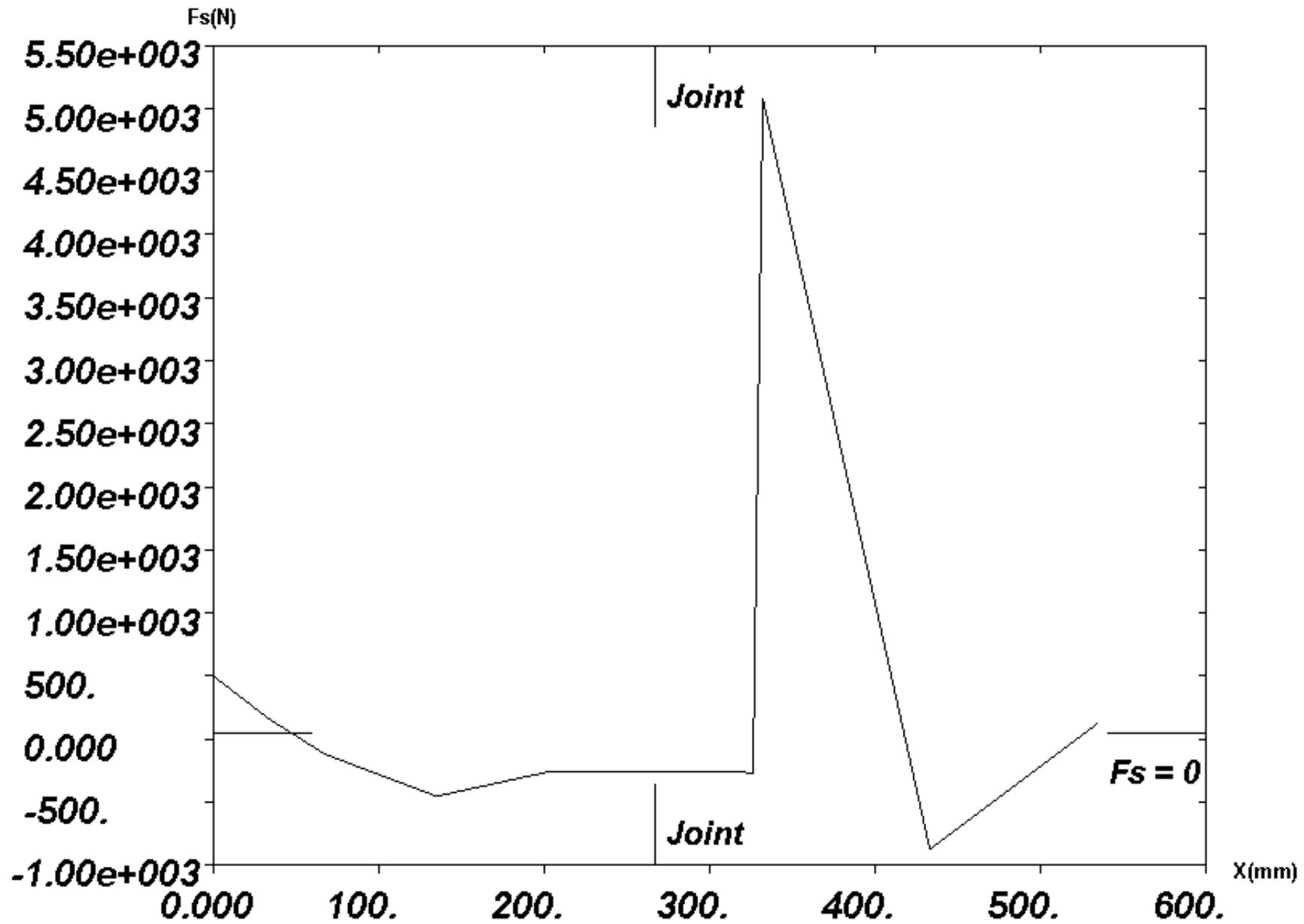
1.29



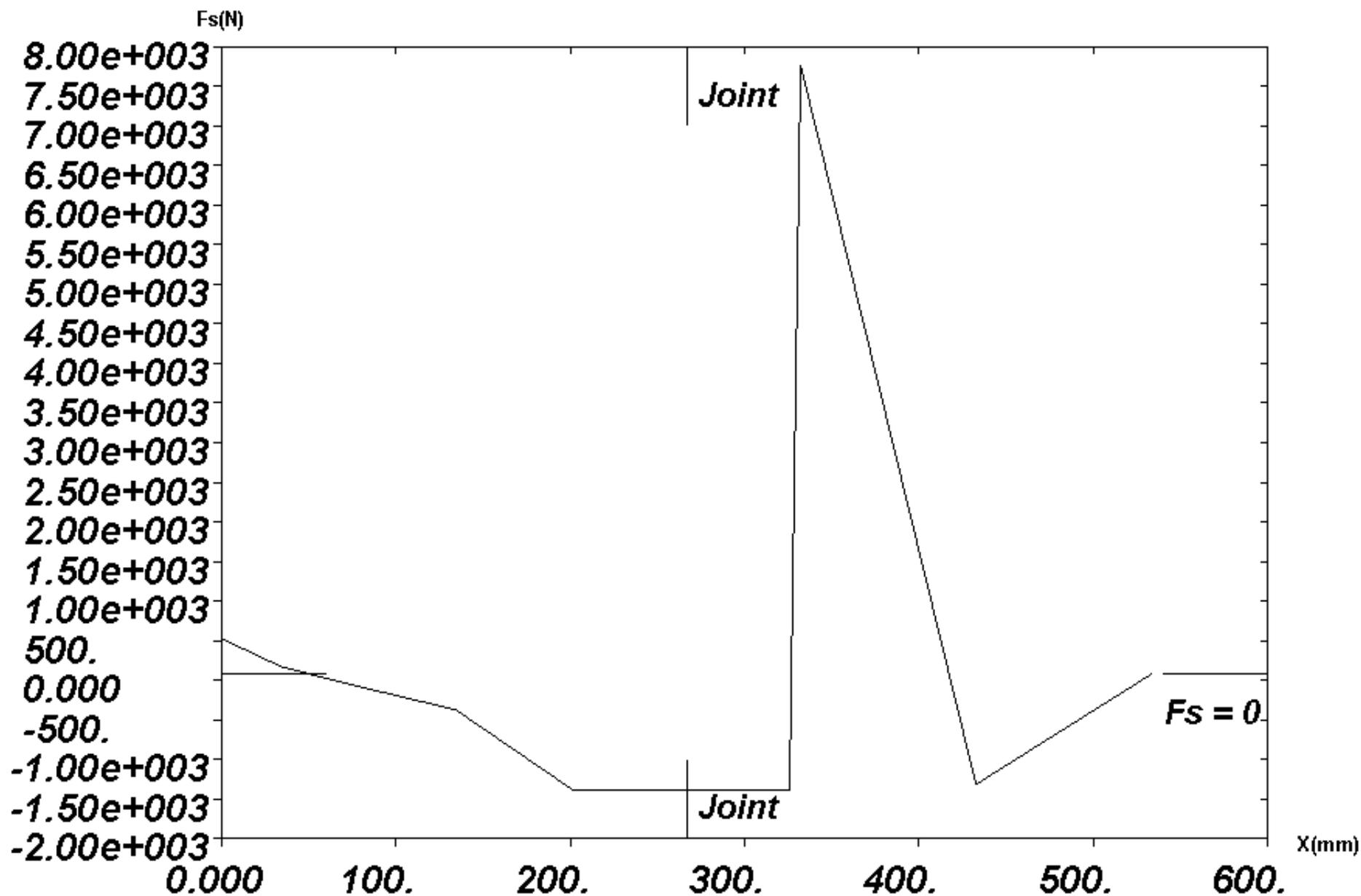
ANEXO E

Diagrama de desplazamientos en losas, empleando el método de elementos finitos

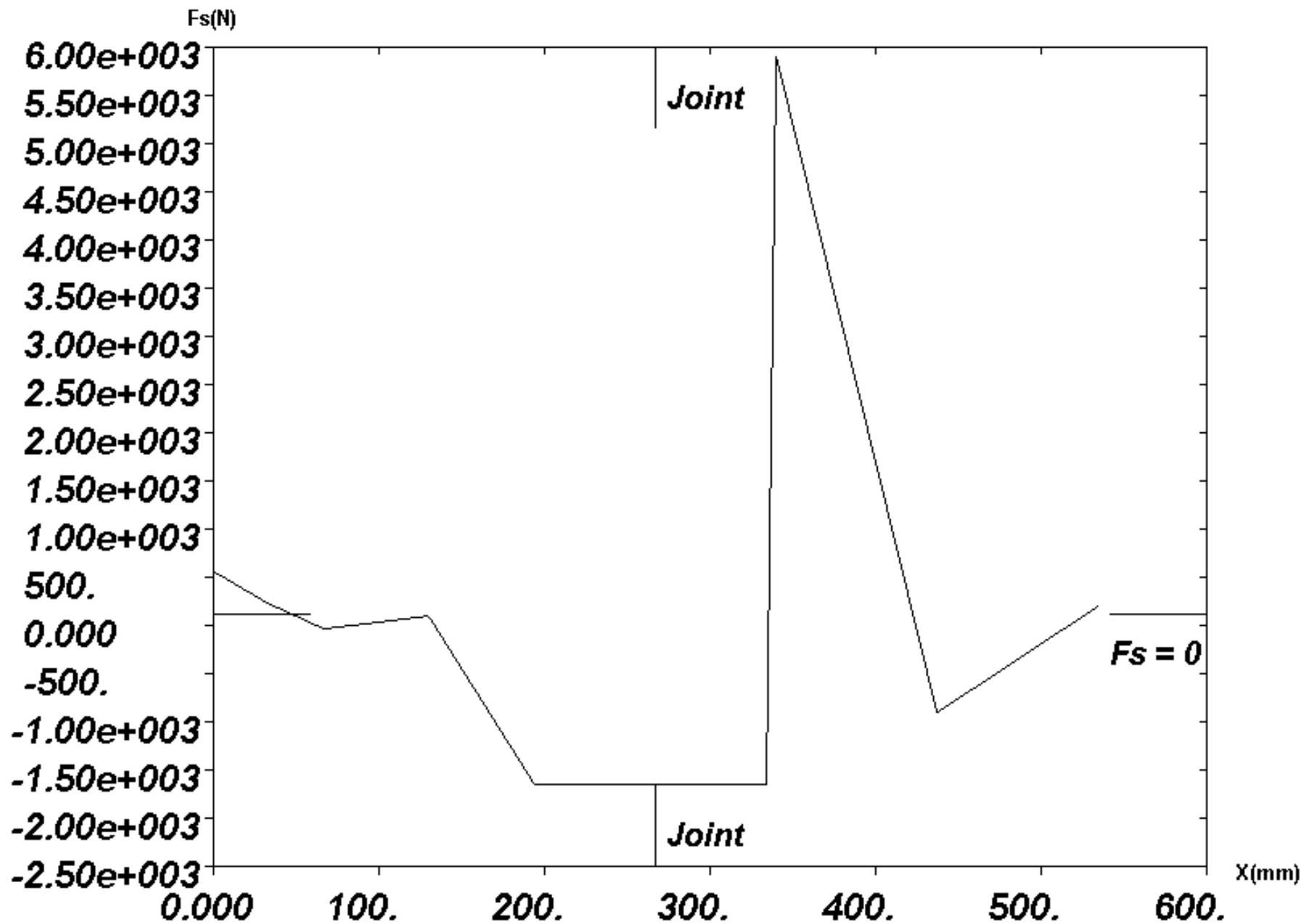
Current Project: T2S2MR70



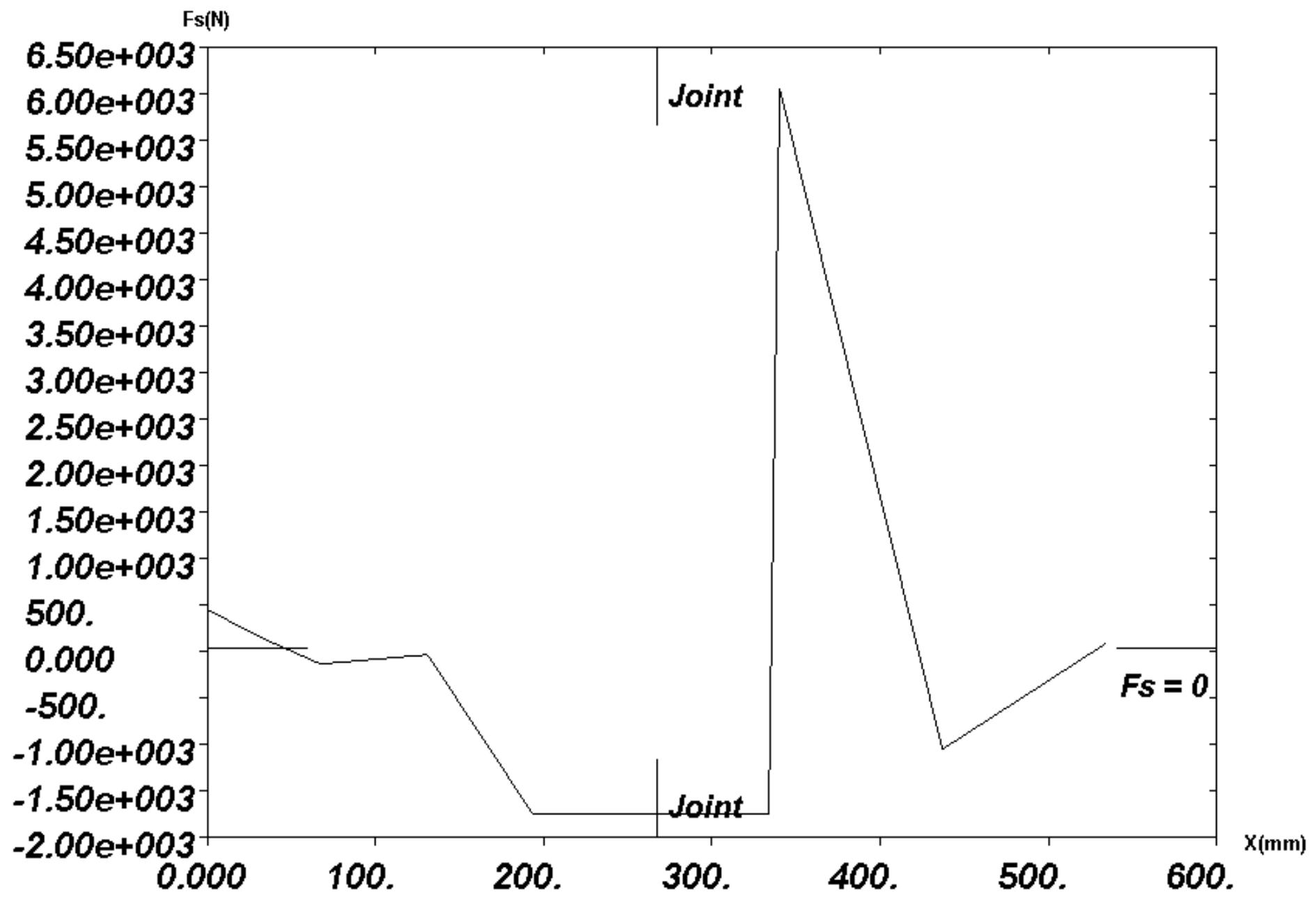
Current Project: T2S2MR70d



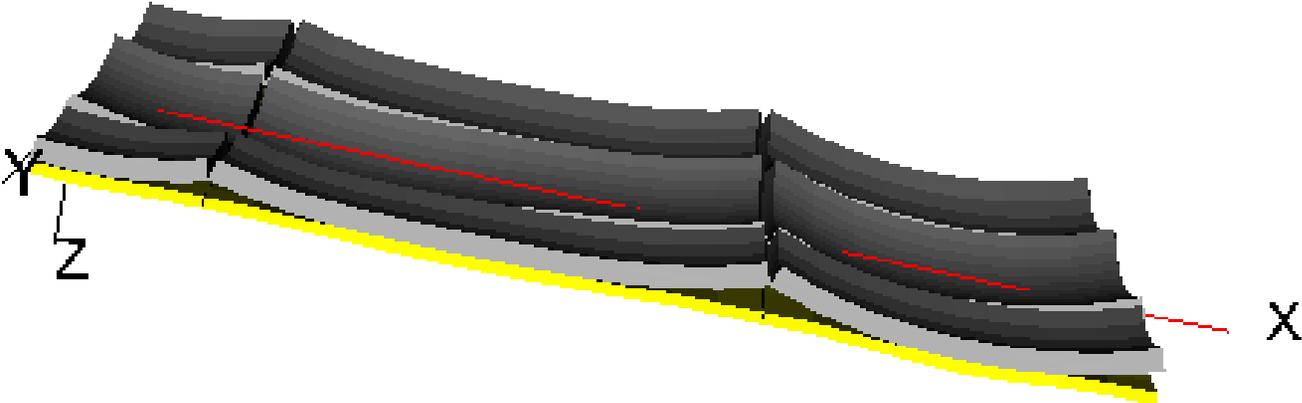
Current Project: T2S2MR70i



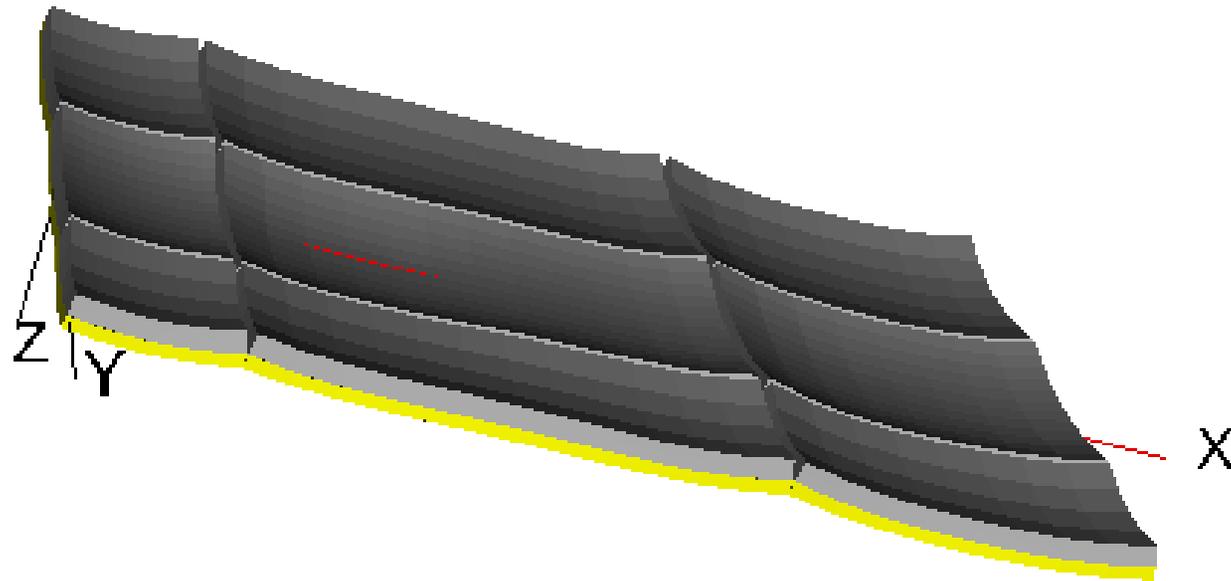
Current Project: T2S2MR70j



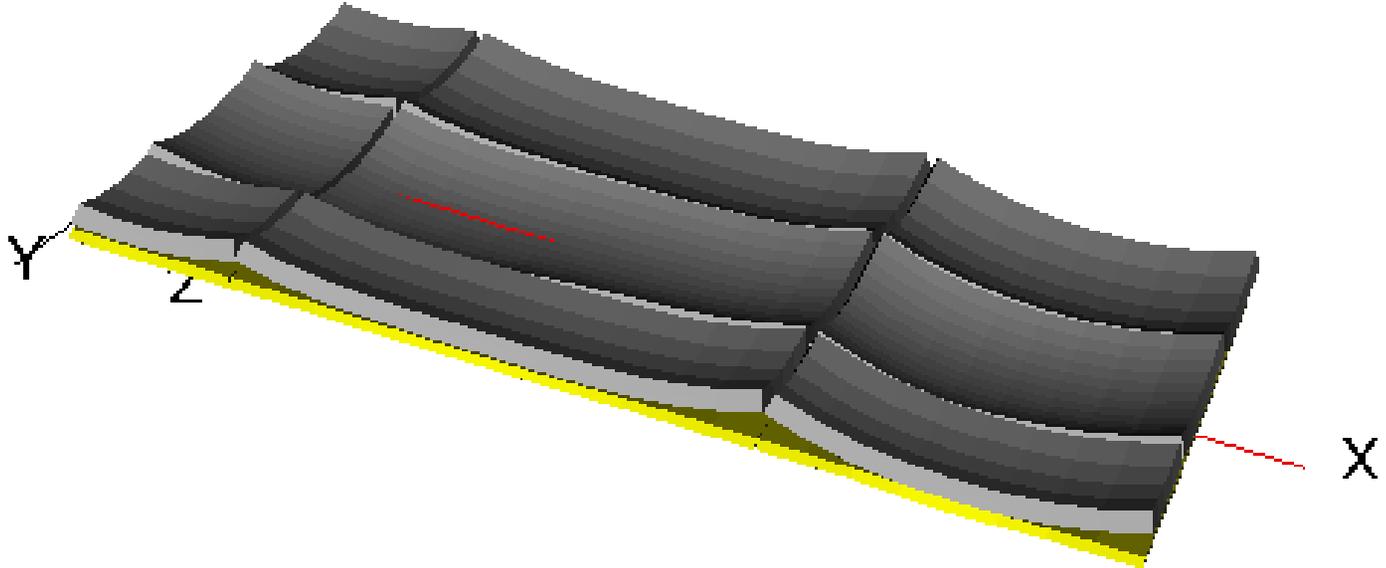
Current Project: T2S2MR35



Current Project: T2S2MR70



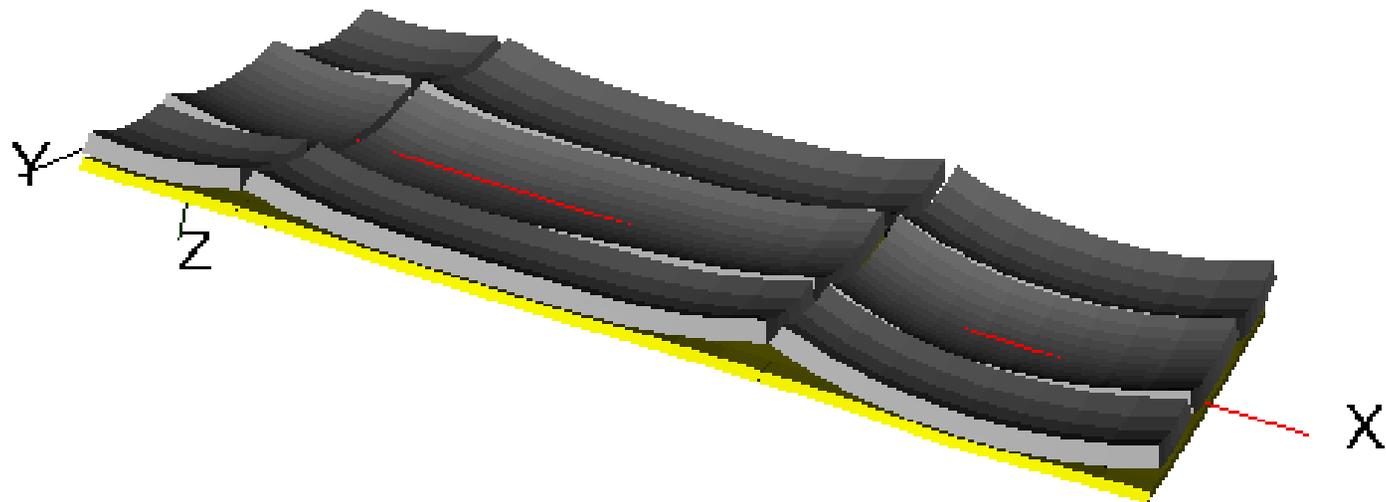
Current Project: T2S2MR70b



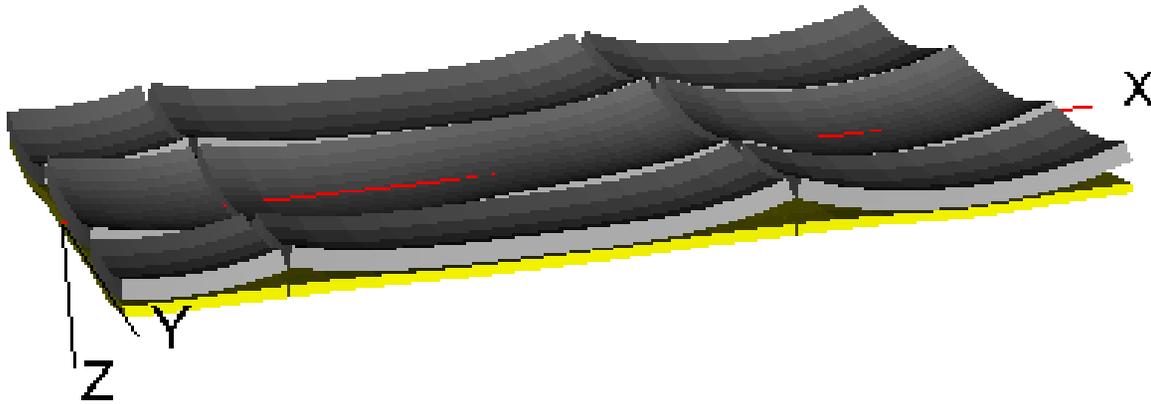
Current Project: T2S2MR70c



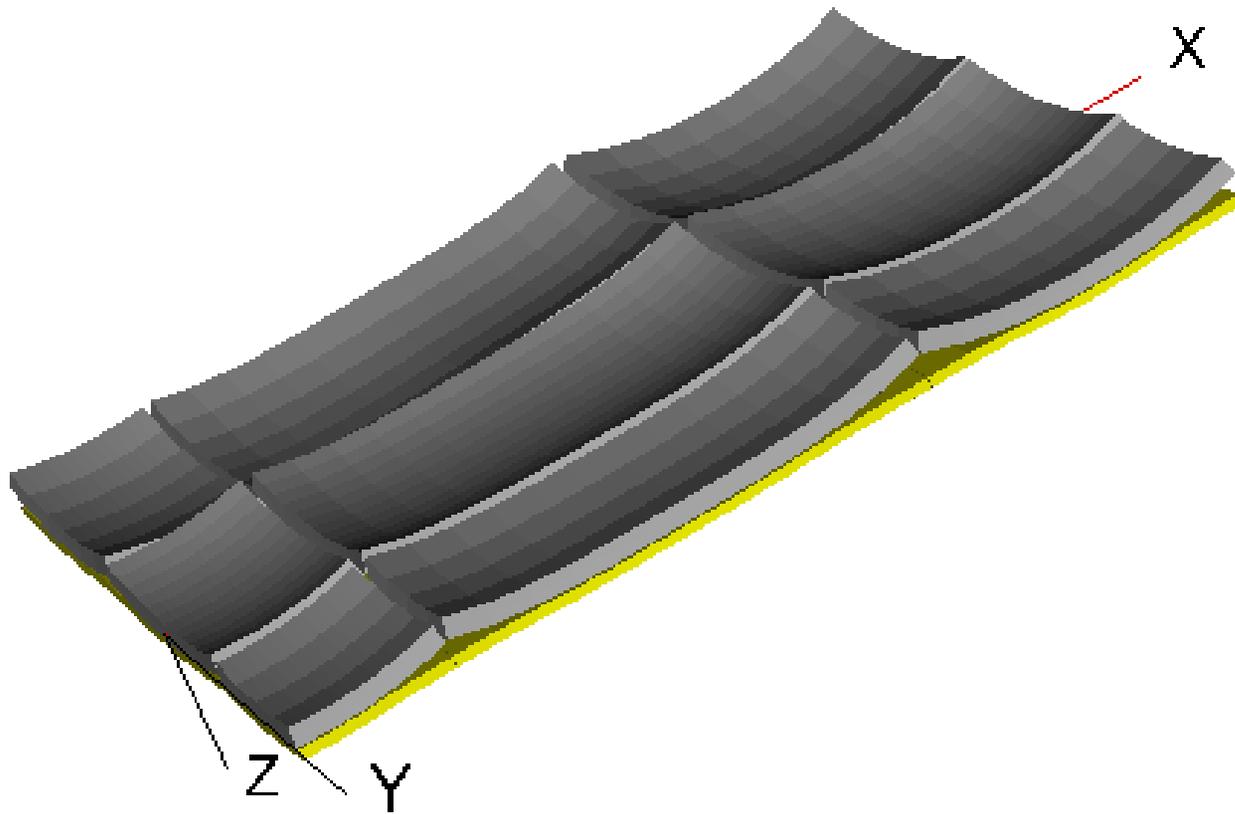
Current Project: T2S2MR70d



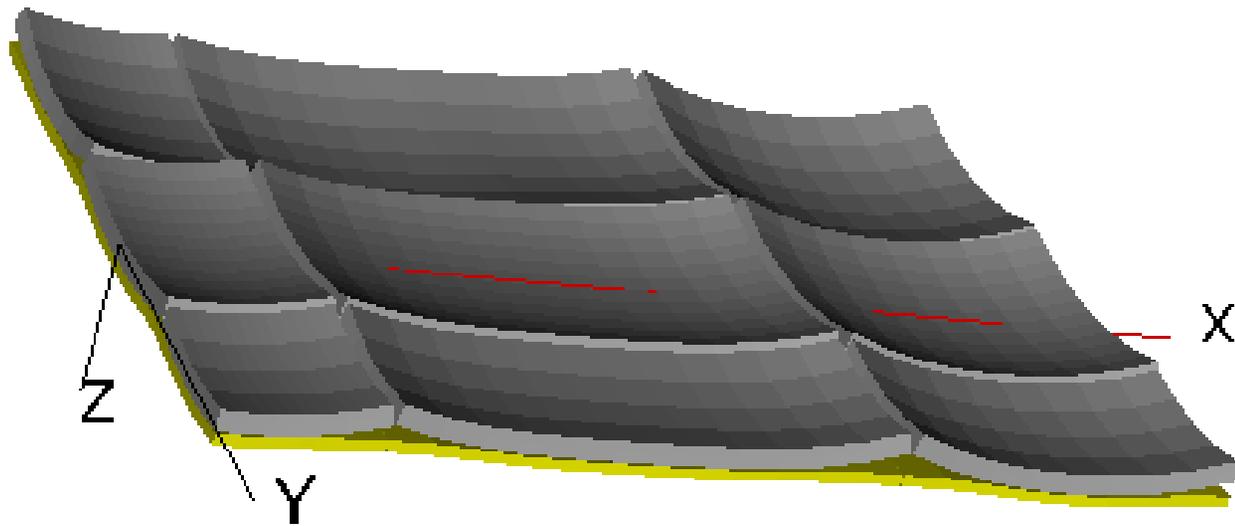
Current Project: T2S2MR70e



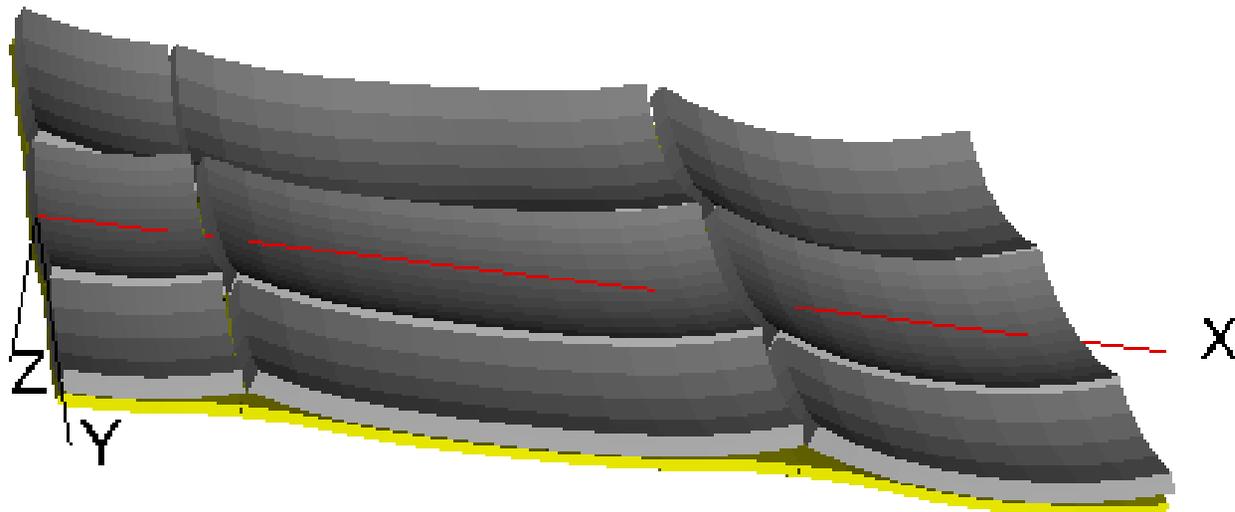
Current Project: T2S2MR70f



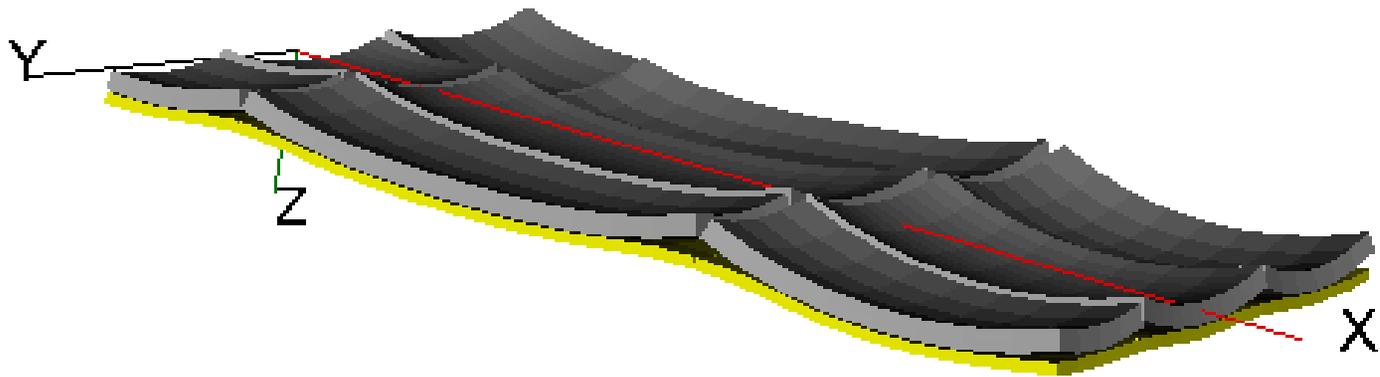
Current Project: T2S2MR70g



Current Project: T2S2MR70h



Current Project: T2S2MR70i



Current Project: T2S2MR70j

