



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1

Paul Garnica Anguas Roberto Hernández Domínguez

Documento Técnico No. 53 Sanfandila, Qro. 2013

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Manual del IMT-PAVE 1.1

Documento Técnico No. 53 Sanfandila, Qro. 2013

Este documento técnico fue realizado en la Coordinación de Infraestructura del nstituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Paul Garnica Anguas y el Ing. Roberto Hernández Domínguez.	
Se agradece la colaboración del Ing. Eloy Dorantes Bárcenas en el desarrollo de a primera etapa de esta metodología para el diseño de pavimentos.	

Resumen

En el presente documento se describe una herramienta para el cálculo estructural de pavimentos flexibles basada en el concepto del espectro de daño, el cual toma en cuenta los espectros de carga representativos de la red carretera mexicana y se fundamenta en los principios de mecánica de pavimentos, es decir se calculan las respuestas críticas de un pavimento flexible, para luego traducirlas en acumulación de daño en el tiempo para poder predecir la vida útil del pavimento.

Se propone una herramienta sencilla y práctica que contribuya a las metodologías empírico-mecanicistas para el diseño de pavimentos.

Abstract

This paper describes a tool for flexible pavement structural design based on the concept of the damage spectra, which takes into account the load spectra representative of the Mexican road network and is based on the principles of mechanics of pavements, where critical responses are calculated in a proposed flexible pavement structure, and then these are used into accumulation of damage over time to predict the pavement life.

This tool is intended to be simple and practical that contributes to the methodologies for mechanistic-empirical pavement design in México.

1 Manual del usuario

1.1 Descripción general

El IMT-PAVE es una herramienta informática para el diseño de pavimentos mediante una metodología empírico-mecanicista que, sin descuidar otros factores, pone un énfasis en el concepto de *espectro de carga* para relacionarlo con el de *espectro de daño*, a través del análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento y su correlación con los principales tipos de deterioros que presenta.

Las metodologías empírico-mecanicistas pretenden tener un enfoque más científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, ya que se pueden determinar en laboratorio o en campo. Esta metodología permitiría la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad del diseño.

Las componentes de entrada al proceso de diseño se refieren a la geometría de la estructura, básicamente son los espesores de cada capa, las propiedades de los materiales que conforman cada una de esas capas que serán módulos dinámicos o resilientes y el nivel de tránsito vehicular definido por su espectro de distribución de cargas. La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores para esas componentes de entrada.

Definido el diseño inicial, se procede al cálculo de las respuestas estructurales en la sección estructural del pavimento. Estás respuestas estructurales consisten en conocer la distribución de esfuerzos (σ) , deformaciones unitarias (ϵ) y deflexiones (δ) . El cálculo se realiza básicamente considerando al pavimento como un medio multicapas, en donde el comportamiento de los materiales se apoya en la Teoría de la Elasticidad, con simplificaciones necesarias para su cálculo más eficiente, como se verá más adelante.

A partir de la respuesta estructural en el pavimento se calcula el nivel de daño esperado en el período de diseño, para los dos tipos de deterioro principales que se presentarán. Estos son agrietamientos por fatiga y deformaciones permanentes.

Calculados los niveles de deterioro para el período de diseño, se introduce el concepto de vida remanente, el cual es el inverso del daño acumulado en el periodo de diseño y determinará cuando una sección ha excedido o no el valor máximo de daño acumulado.

Como fue expresado anteriormente, la idea fundamental es la de poder garantizar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida de proyecto. Esto significa garantizar que los niveles de agrietamiento y de deformación permanente, se mantendrán dentro de un rango ideal, que dependerá de la importancia de la red carretera de que se trate.

1.2 Factores que afectan el diseño de pavimentos

Las cuatro variables principales a considerar en el diseño estructural de pavimentos son:

- Tránsito vehicular
- Criterios de falla
- Estructura y propiedades de los materiales
- Factores ambientales

La vida de diseño de un pavimento es resultado de la interacción entre estas variables, además del proceso constructivo y trabajos de mantenimiento. El proceso de interacción de dichas variables puede apreciarse en la Figura 1.1.

La estructura y propiedades de los materiales incluyen los espesores individuales de cada capa, su resistencia y propiedades de deformabilidad. El tráfico debe incluir el eje y la configuración de la rueda, la carga y magnitud de la carga, además del número de repeticiones aplicadas al pavimento. Los dos factores anteriores derivan, con base en un modelo estructural (ej. teoría elástica multicapa), en lo que se conoce como respuesta estructural del pavimento, que permite proseguir con la segunda etapa del diseño, la predicción del desempeño del pavimento con base en los criterios de falla que permiten la incorporación de la respuesta estructural. Los factores ambientales se refieren principalmente a regímenes de temperatura y precipitación, el drenaje y humedad, que afectan las propiedades de los suelos y otros materiales en el tiempo.

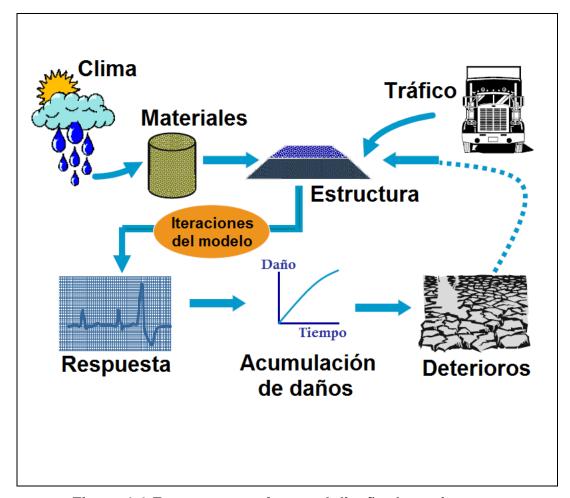


Figura 1.1 Factores que afectan el diseño de pavimentos

Si bien es cierto que los cuatro factores mencionados representan los principales componentes que afectan el diseño de pavimentos, el proceso de caracterización y análisis se traduce en una propuesta estructural que sólo puede lograrse con la disposición de un modelo de diseño con el que se pueda evaluar los insumos (solicitaciones y materiales) y la respuesta del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones). He ahí el origen y razón del IMT-PAVE.

1.3 Espectros de carga

Los datos de tráfico es uno de los factores clave requeridos para el diseño estructural de pavimentos. Se necesita para determinar la magnitud de las cargas transmitidas al pavimento y la frecuencia con que dichas cargas son aplicadas durante toda la vida de diseño del pavimento. Su caracterización adecuada es fundamental para poder concebir estructuras de pavimento que sean capaces de ofrecer altos desempeños en términos de durabilidad.

La importancia de ese factor es exponencialmente mayor en vías de alto y muy alto tránsito vehicular, como sucede en los ejes carreteros troncales del país, aunque no exclusivamente, en donde un gran porcentaje de los vehículos son de carga y muy pesados. En México, el interés se centra en cinco tipos de vehículos de carga, cuya configuración y pesos legales se indican en la Figura 1.2.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana de Pesos y Dimensiones del 2008, los pesos máximos permitidos para los ejes sencillos duales, en tándem y en trídem son 11, 18 y 23.5 toneladas, respectivamente. En la misma figura se presentan, para fines de comparación, los valores que se tenían anteriormente en la Norma del año 1995.

Esos pesos máximos por eje mencionados, son valores legales, en ningún caso se les podría considerar como valores de diseño. La autoridad correspondiente es la responsable de su cumplimiento.

Para fines de diseño, rehabilitación, modernización, reconstrucción, preservación y operación de carreteras, se propone que la mejor caracterización del tránsito vehicular es en términos de lo que denomina espectros de carga de cada uno de los diferentes tipos de ejes. Para ello se utilizan estaciones móviles de pesaje dinámico, denominadas en el ámbito de trabajo como estaciones WIM, por sus siglas en inglés *Weight In Motion*, y de las que se presentan unas imágenes en la Figura 1.3.

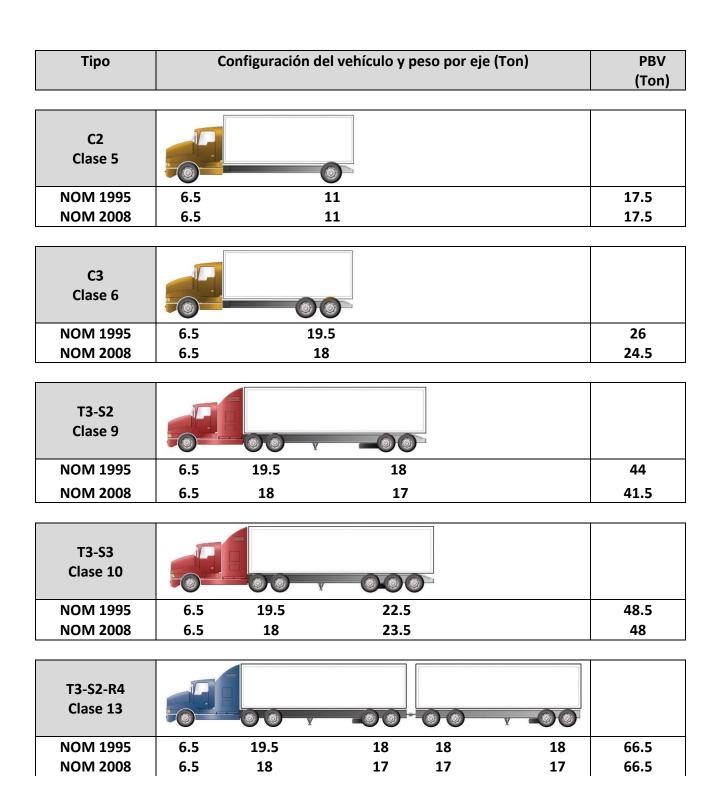


Figura 1.2 Configuraciones y pesos legales de vehículos de carga en México

a) Cableado y sensores



c) Consola de registro



b) Sensores piezoeléctricos



d) Señalamiento



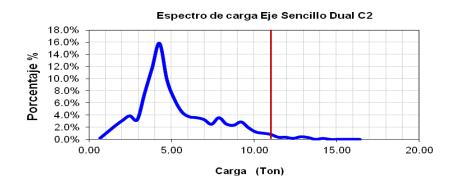
Figura 1.3. Componentes de una estación móvil de pesaje dinámico (WIM)

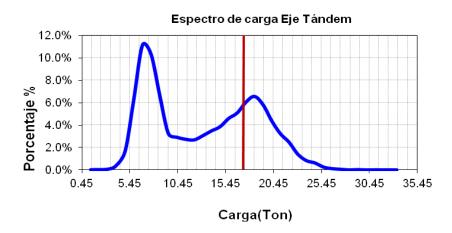
El concepto de espectro de carga, como factor fundamental para el diseño de pavimento, se ha ganado una amplia aceptación en los últimos años. En la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista para el Diseño y Rehabilitación de Pavimentos de la AASHTO, DARWIN-ME, las cargas del tráfico se caracterizan mediante espectros de carga por tipo de eje.

Un espectro de carga se puede definir como la distribución de la carga de un grupo de ejes durante un período de tiempo, es decir, es la relación entre el número de ejes con cierto rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje. Los espectros de carga por eje se representan por medio de histogramas de distribución de la carga por eje para cada uno de los cuatro tipos de ejes: sencillo direccional o sencillo, dual, tándem y trídem.

Entre los múltiples aspectos que se pueden mencionar en relación a los espectros de carga, conviene destacar los siguientes:

- 1. Cada punto del espectro de carga representa el porcentaje de ejes de un cierto tipo que circula con cierto nivel de carga.
- 2. El área bajo la curva de cada espectro de carga debe ser unitaria.
- 3. El espectro de carga caracteriza al tránsito pesado en el tramo carretero en donde se hace la medición. El seguimiento en el tiempo permite valorar la evolución de la distribución de las cargas, aspecto que está relacionado con la intensidad de las actividades económicas en el sector transporte.
- 4. Los valores máximos permiten identificar los niveles de carga más usuales; niveles que se pueden asociar a si los vehículos circulan vacíos o con carga completa.
- 5. Permite identificar los tramos carreteros en donde los niveles de carga exceden el reglamento y en qué porcentaje.
- 6. Se pueden asociar comportamientos del tránsito de vehículos de carga similares y establecer espectros regionales.
- 7. Permiten diseñar y revisar la capacidad estructural de un pavimento con datos realmente representativos de una red carretera.
- 8. Son indicadores de la severidad que se puede esperar de los distintos deterioros en una carretera a lo largo del tiempo. Esto puede de ser de particular interés para los responsables de la conservación y mantenimiento de una red carretera en términos de desempeño.





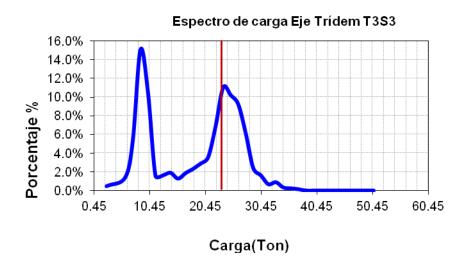


Figura 1.4. Espectros de carga en la carretera libre Portezuelo-Palmillas (2003)

1.4 Caracterización de materiales

Las propiedades fundamentales de los materiales que usualmente son parte de la sección estructural de un pavimento, se deben determinar a partir de ensayes de laboratorio de carga repetida.

Para el caso de las mezclas asfálticas, la propiedad se llama módulo dinámico, (ASTM D3497), en donde un espécimen cilíndrico se somete a pulsos repetidos de cierto esfuerzo cíclico, en condiciones de compresión no confinada. El módulo dinámico se calcula como el cociente entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga (figura 1.5). En la Tabla 1.1. se presentan algunos valores típicos.



Figura 1.5 Montaje de un ensaye de módulo dinámico en mezclas asfálticas

Para suelos y materiales granulares, la propiedad de referencia es el módulo de resiliencia, que se ejecuta de acuerdo con la norma AASHTO T274 y cuyo montaje se muestra en la figura 1.6. En este caso, la prueba se ejecuta por medio de un ensaye triaxial donde la presión de confinamiento es constante, y el esfuerzo desviador se aplica cíclicamente. El módulo de resiliencia se define como el cociente entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga. En Tabla 1.2 se presentan valores típicos.

Los ensayes de módulo de resiliencia se deben realizar en condiciones representativas de la colocación de los materiales en obra, como son las características de peso volumétrico, contenido de agua de compactación, método de compactación, granulometría, etcétera, ya que el ensaye es muy sensible a esas condiciones.

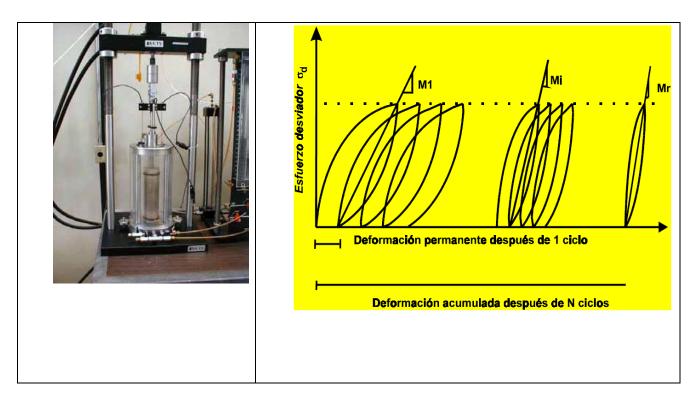


Figura 1.6 Ilustración de una cámara triaxial y el concepto de módulo de resiliencia

En todos los materiales se necesitarán los valores correspondientes a la relación de Poisson.

Basados en un estudio específico, los módulos mencionados se podrán estimar a partir de la medición de otros parámetros más comunes, como puede ser la resistencia a la compresión simple, o el valor relativo de soporte. Sin embargo, siempre será una mejor práctica la ejecución directa de los ensayes.

Tabla 1.1. Valores típicos de Módulos Dinámicos, Ed, para Mezclas Asfálticas (a 20°C, 10Hz)

Material	Rango de Ed, MPa	Valor típico de Ed, Mpa
Mezcla asfáltica diseñada con la metodología Marshal, asfalto convencional	2000 - 4000	3000 MPa
Mezcla asfáltica de alto desempeño, metodología Superpave, Protocolo AMAAC, asfalto modificado	4000 - 6000	5000 MPa
Mezcla asfáltica de alto módulo, metodología especial	8000 - 12000	10000 MPa

Tabla 1.2. Valores típicos del módulo de resiliencia, Mr, para suelos clasificados con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, S.U.C.S.

Manual SCT M-MMP-1-02/03

Clasificación del suelo	Rango de M _r (MPa)	Valores típicos de M _r (Mpa)
СН	34 - 90	55
CH+cal	100-200	150
CH+cemento	200-300	250
MH	55 - 120	80
CL	90 - 165	117
ML	50 – 100	75
SW	193 – 259	220
SP	166 – 228	193
SW-SC	148 - 214	176
SW-SM	166 – 228	193
SP-SC	148 - 214	176
SP-SM	166 -228	193
SC	148 - 193	166
SM	193 - 259	221
GW	273 – 350	310
GW+cemento	750-2000	1500
GW+Asfalto	500-1500	1000
GP	245 -300	270
GW-GC	193 - 276	238
GW-GM	245 - 279	266
GP-GC	193 - 269	235
GP-GM	214 - 276	252
GC	166 - 259	214
GM	228 - 290	266

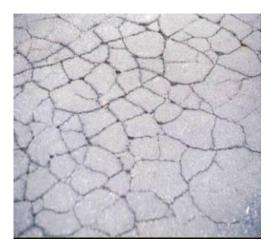
1.5 Espectros de daño

Para la obtención de los espectros de daño, se necesita el concepto de daño definido por Miner, 1945, en donde para cada tipo de eje, *i*, y cada nivel de carga, *j*, se obtiene el cociente entre el número de repeticiones correspondiente esperado por año, *n*, y el número de repeticiones admisibles, *N*, para limitar el desarrollo de un cierto tipo de deterioro. El daño total se calcula con la ecuación (1).

$$D = \sum_{i} \sum_{j} \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \tag{1}$$

El coeficiente de Daño, D, así obtenido, está asociado a un cierto tipo de deterioro en el pavimento, como los que se muestran en la Figura xx. El inverso de D representa el tiempo, T (en años), en que se alcanzará el número de repeticiones admisible de ese deterioro y es el que se debe comparar con el período de diseño deseado (usualmente 20 años en pavimentos asfálticos).

a) Agrietamiento por fatiga



b) Deformaciones permanentes en las capas inferiores



Figura 1.7 Tipos de deterioros comunes en pavimentos asfálticos

Es práctica común asociar el número de repeticiones admisible con los esfuerzos y deformaciones máximos que se presentan en puntos críticos de la sección estructural de un pavimento. Para agrietamiento por fatiga se toma, por ejemplo, la deformación unitaria de tensión máxima, ϵ_t , en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y, para la deformación permanente de las capas inferiores, la deformación unitaria de compresión máxima, ϵ_c , en la parte superior de las terracerías. El cálculo de esas deformaciones supone un comportamiento elástico de los materiales, lo que es válido en pavimentos ya que los niveles de esfuerzos que se generan al paso de las cargas vehiculares son muy inferiores a la resistencia al esfuerzo cortante.

Para el número de repeticiones admisible para agrietamiento por fatiga, N_f , se utilizan modelos del tipo que se indica en la ecuación (2).

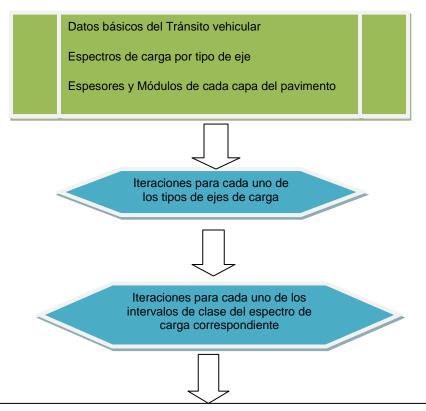
$$N_f = f_1 \varepsilon_t^{-f_2} \tag{2}$$

Para el modelo de deterioro por deformación permanente de las capas inferiores la forma matemática es la que se establece similar a la anterior, ecuación (3).

$$N_d = f_4 \varepsilon_c^{-f_5} \tag{3}$$

El IMT-PAVE 1.1 utiliza valores particulares de esos parámetros, definidos con base en su propia experiencia y análisis de otros modelos. El cálculo de esfuerzos y deformaciones se realizó con el método de Odemark, 1949, que permite transformar la estructura de un pavimento en una sección homogénea equivalente. Los resultados obtenidos con esta metodología para las deformaciones unitarias que se requieren son muy similares a los que proporcionan los programas de cómputo existentes basados en la Teoría de Burmister para medios estratificados, además de permitir una programación mucho más sencilla.

La Figura 1.8 muestra el diagrama de flujo general de las etapas necesarias para el cálculo de los Espectros de Daño.



- Cálculo del número de repeticiones esperado por año
- Calculo de las deformaciones unitarias de tensión en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y de compresión en la parte superior de las terracerías.
- Calculo del número de repeticiones admisible para agrietamiento por fatiga y para deformación permanente.
- Calculo del incremento en el coeficiente de daño para cada tipo de deterioro.
- Actualización del coeficiente de daño total para cada tipo de deterioro

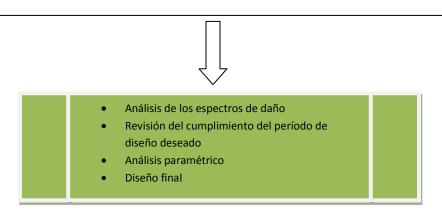


Figura 1.8. Diagrama de flujo general para el cálculo de los Espectros de Daño

1.6 Ejemplo de análisis

Como se mencionó anteriormente el IMT-PAVE una herramienta informática para el diseño de pavimentos en desarrollo constante, ésta es su versión 1.1 y a continuación se presenta un caso de análisis.

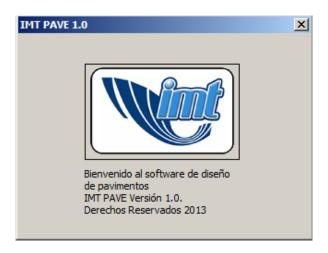


Fig. 1.9 Pantalla de bienvenida del IMT-PAVE 1.1

Consideremos una carretera de 4 carriles con un Tránsito Diario Promedio Anual, TDPA, de 44,000 vehículos diarios con una tasa de crecimiento del 3%, de los cuales 78% son vehículos ligeros y el 22% son vehículos de carga (5% de C2, 5% de C3, 7% de T3-S2, 4% T3-S3 y 1% de T3-S2-R4). Suponiendo coeficientes de distribución por sentido y por carril de 0.5 en ambos casos.

Tránsito

Para comenzar se debe introducir los valores del tránsito en la pestaña correspondiente, como el valor del TDPA (veh/día), factores de distribución por carril y por sentido, el horizonte de proyecto, el periodo de análisis y la tasa de crecimiento.

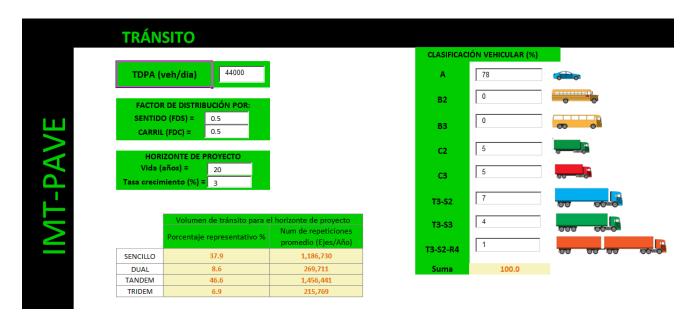


Fig. 1.10 Características del Tránsito

El número de ejes promedio por año para cada tipo de eje de carga, y su porcentaje de participación en el total de ejes, aparece en la parte inferior izquierda de la hoja de tránsito, se calcula automáticamente al modificar cualquier dato de entrada de esta hoja y es el que se indica en la Tabla 1.3.

Tipo de Eje	Número de repeticiones esperado, por año
Sencillo	1,186,730
Sencillo Dual	269,711
Tándem	1,456,441
Tridem	215,769

Tabla 1.3. Número de repeticiones por año esperado para cada tipo de eje en los ejemplos de diseño

En la hoja de Espectros de Carga se debe escoger el nivel de carga con el que se calcularán las respuestas del pavimento. Existen cuatro niveles de carga, Legal, Leve sobrecarga, Sobrecarga, Alta sobrecarga avanzado. Estos niveles representan condiciones de sobrecarga comunes en muchas carreteras

mexicanas. Y para el nivel avanzado permite la personalización de los propios espectros de carga medidos en el lugar, mediante una modelación matemática propuesta, la cual está fuera del alcance de esta primera versión del IMT-PAVE.

Así también al seleccionar el límite legal de carga, se muestran los umbrales que rigen para cada tipo de eje en la normativa mexicana vigente y determinar de manera gráfica el nivel de exceso de carga por cada eje.

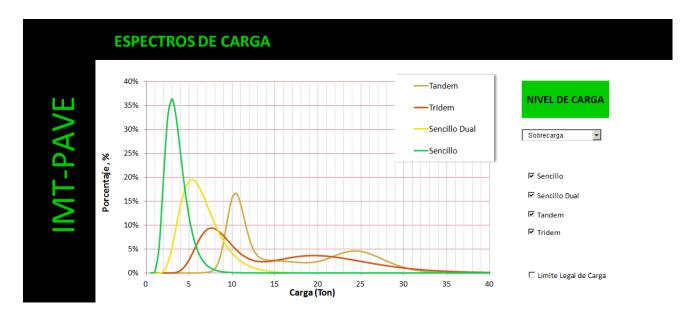


Figura 1.11 Espectros de carga

Esta metodología permite revisar secciones estructurales para pavimentos nuevos o existentes, o bien valorar la modernización de la vía. Para ello la información que se requiere son los espesores de cada una de las capas y los módulos dinámicos o resilientes correspondientes, los cuales se ingresan en la ventana llamada Análisis Espectral.

Se deben ingresar el número de capas usadas, y en la última capa no ingresar ningún valor de espesor, ya que éste se considerará semi-infinito. El número de capas deberá ir acorde a las capas anotadas en la parte superior.

El modelo de deterioro usado será el llamado IMT, tanto para fatiga como para deformación permanente, el cual se basa en la experiencia adquirida en el laboratorio de infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte.

Para efectuar el análisis se debe hacer clic en el botón "Análisis Espectral".

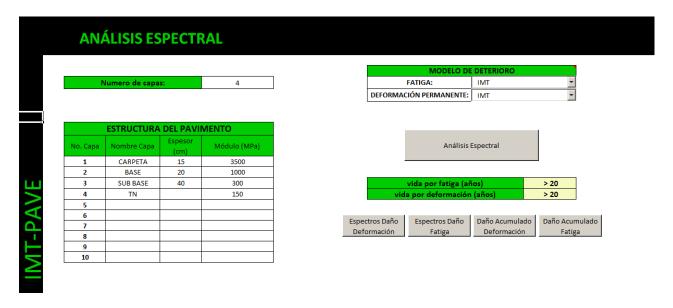


Figura 1.12 Análisis Espectral

La metodología sirve para revisar secciones propuestas, así entonces, una sección será adecuada cuando se cumpla el umbral de diseño que aparece en el valor de vida por fatiga y vida por deformación, donde éstas deberán ser superiores al horizonte de proyecto que se ingresó en la hoja de datos del tránsito.

Para cada tipo de eje se pueden apreciar los espectros de daño calculados en para el agrietamiento por fatiga (Figura 1.13) y para la deformación permanente.

Si acumulamos el daño tal y como se indica en la Figura 1.14, se pueden obtener las contribuciones parciales por tipo de eje y la total. En cada curva se indica el tiempo, calculado como el inverso del coeficiente de daño acumulado al final de cada curva, en que se alcanzaría el número de repeticiones admisible de acuerdo con los tipos de deterioro considerados y que se debe comparar con el período de diseño deseado.

El espectro de daño acumulado que se indica es la suma de los correspondientes cuatro ejes y la vida esperada es el inverso de la suma total del coeficiente de daño.

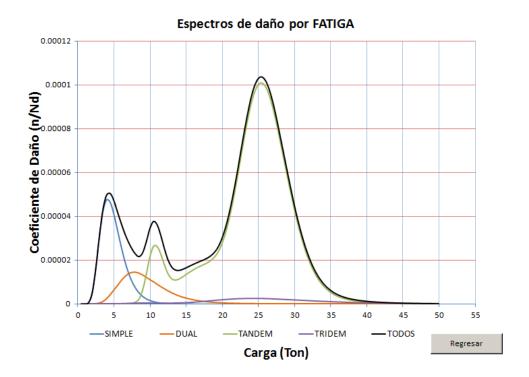


Figura 1.13 Espectro de daño por fatiga

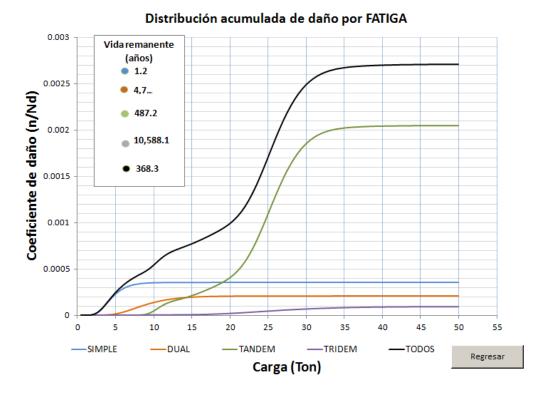


Figura 1.14 Distribución acumulada de daño

Bibliografía

Rico A., Téllez R., Garnica P. (1998), "Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de diseño y tendencias", Publicación Técnica No. 104, Instituto Mexicano del Transporte.

Garnica P., Pérez N. (2001), "Influencia de las condiciones de compactación en la deformación permanente de suelos cohesivos compactados", Publicación Técnica No. 165, Instituto Mexicano del Transporte.

Garnica P., Pérez A. (2002), "Comportamiento de suelos arcillosos compactados adicionados con cloruro de sodio", Publicación Técnica 201, Instituto Mexicano del Transporte.

Garnica P., Gómez J.A. (2002), "Mecánica de Materiales para Pavimentos", Publicación Técnica 197, Instituto Mexicano del Transporte.

Barrera M., Garnica P. (2002), "Mecánica de suelos no saturados en vías terrestres", Publicación Técnica 198, Instituto Mexicano del Transporte.

Sánchez F., Garnica P. (2002) "Metodología racional para el análisis de la densificación y resistencia de geomateriales compactados", Publicación Técnica 200, Instituto Mexicano del Transporte.

Garnica P., Gómez J.A., Delgado H. (2003), "Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio", Publicación Técnica No. 228, Instituto Mexicano del Transporte.





Carretera Querétaro-Galindo km 12+000 CP 76700, Sanfandila Pedro Escobedo, Querétaro, México Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610 Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

http://www.imt.mx/