



EVALUACIÓN DEL DAÑO ESTRUCTURAL EN PAVIMENTOS FLEXIBLES A TRAVÉS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

Juan Manuel Tinoco Orozco¹, Noé Hernández Fernández²; Jorge Alarcón Ibarra³, Alexandra Ossa López⁴

¹Alumno de Maestría. Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH. juanmanuel_tinoco@hotmail.com

Teléfono: +52 (55) 4133 6169

²Alumno de Doctorado. Instituto de Ingeniería, UNAM. nhernandezf@iingen.unam.mx

³Profesor investigador. Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH. jorge.alarcon.ibarra@hotmail.com

⁴Investigadora. Instituto Ingeniería, UNAM. aossal@iingen.unam.mx

Resumen

En la actualidad se ha vuelto más usual obtener los módulos elásticos de la capas del pavimento a través de pruebas no destructivas (deflexiones de superficie) y empleando la metodología del retrocálculo. Sin embargo no existe un método preciso para llevar a cabo el retrocálculo.

En el presente trabajo se hace la propuesta de una metodología a seguir para obtener los módulos elásticos de las capas del pavimento flexible a través del retrocálculo, en la cual como primer paso se sugiere realizar un pre-proceso de las deflexiones para comprobar que los valores de las mediciones no sean datos atípicos que perjudiquen la confiabilidad de los resultados. Para el proceso de retrocálculo se utilizarán dos herramientas informáticas, el programa CalBack (California Backcalculation) desarrollado en el centro de investigación de pavimentos de la universidad de California y el Evercalc desarrollado por el departamento de Transporte de Washington. Una vez obtenidos los módulos en ambos programas se graficaron para comprobar la existencia de alguna diferencia. También se realizó un análisis del daño graficando los resultados obtenidos con CalBack de los años del 2012 al 2016. Y finalmente se obtuvieron las curvas maestras para cada uno de los años observándose una disminución de la rigidez conforme pasa el tiempo, comprobándose esto con el aumento del agrietamiento por fatiga que de igual manera va incrementando con el tiempo.

Palabras clave: Módulos elásticos, retrocálculo, pavimento flexible, daño, agrietamiento.



1. Introducción

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

Las cifras de la Subsecretaria de Infraestructura publicadas en el anuario estadístico indican que para el año 2015 México contaba con una red total compuesta por 390,301 kilómetros de carretera.

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

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

Las deflexiones que obtenemos a través del deflectómetro de impacto se conocen como pruebas no destructivas y en la actualidad juegan un papel muy importante en el ámbito del pavimento, ya que a través de ellas podemos obtener los módulos elásticos de las capas de un pavimento por medio de un proceso de cálculo inverso conocido como retrocálculo. El propósito del retrocálculo es principalmente obtener los módulos elásticos in situ de las diferentes capas de pavimento. Este proceso, se inicia proponiendo los valores de módulos elásticos con los cuales se calculan las deflexiones y posteriormente se comparan estas deflexiones calculadas con las deflexiones medidas; los valores de módulo asumidos se ajustan de forma iterativa. Este proceso se repite hasta que los valores de deflexiones calculados y observados coinciden en un cierto rango definido.

En el presente trabajo se hace la propuesta de una metodología para llevar a cabo el proceso del retrocálculo, apoyándose en dos herramientas informáticas conocidas como CalBack desarrollada en el Centro de Investigación de Pavimentos de la Universidad de California (UCPRC) y Evercalc desarrollado por el departamento de Transporte de Washington (WSDOT). Con estas herramientas se obtuvieron los módulos elásticos a través de retrocálculo de un tramo carretero localizado en el estado de Hidalgo. Con los módulos elásticos obtenidos por retrocálculo, se hace una comparativa de los valores obtenidos con las dos

herramientas y se estima el daño en función de la disminución de la rigidez del pavimento, el cual se verifica a través del incremento en el agrietamiento por fatiga.

2. Caso de estudio

El caso de estudio presentado en este documento es parte de la Tesis de Maestría del correspondiente autor, en ella se analizaron 15 distintos tramos localizados en diferentes puntos de la república Mexicana, para la selección de estos tramos se tomaron en consideración diversos criterios, los más importantes fueron el clima y la disponibilidad de los datos de auscultación requeridos para el análisis, es decir, se eligieron tramos con la información más completa (deflexiones, espesores de capa, catálogo de deterioros, IRI y macrotextura) de las campañas realizadas en los años 2012 al 2016. Después de un análisis detallado de la información proporcionada por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) se consideró que solo cuatro tramos de los quince analizados contaban con la información necesaria para realizar el análisis de daño en los pavimentos en estudio. Sin embargo, debido al extenso proceso que requiere el evaluar los datos de las distintas campañas de auscultación y a la cantidad de información analizada en el presente documento solo se muestra y discute información de un solo tramo de estudio, en la Figura 1 se muestra su ubicación (línea roja dentro del círculo).



Figura 1. Tramo de estudio. (mapacarreteras.org, 2017)

El tramo en estudio se ubica en el km 59+500 al 77+500 de la carretera México-Pachuca, en el estado de Hidalgo, como se muestra en la Figura 1.

3. Proceso de retrocálculo

El retrocálculo o cálculo Inverso es un proceso a través del cual obtenemos los módulos elásticos de las capas del pavimento, en donde intervienen o son requeridos datos de auscultación medidos en campo como son las deflexiones (respuesta del pavimento ante la aplicación de una carga) obtenidas con deflectómetro de impacto y los espesores de las distintas capas del pavimento que pueden ser obtenidos por medio de sondeos o por medio del radar de penetración (GPR).

El deflectómetro de impacto que es el dispositivo con el cual se midieron las deflexiones de superficie utilizadas en este trabajo, tiene sus orígenes en Dinamarca en la década de los años 60 y con el paso del tiempo se ha ido perfeccionando con el objetivo de hacer más práctica y eficiente su operación (Bohn, 1990). Actualmente existen diversos fabricantes en el mundo de estos equipos.

Los Deflectómetros de impacto actuales tienen vigas instaladas equipadas con 6 o 7 geófonos normalmente, para la medición de las deflexiones a diferentes distancias. El número de geófonos se puede incrementar según sea requerido. En la Figura 2 se muestra un diagrama del funcionamiento del deflectómetro, que consiste básicamente en dejar caer una masa desde una altura específica, de acuerdo a la magnitud del impacto que se desee producir sobre la superficie del pavimento, dicho impacto provoca una deflexión en la superficie la cual se mide con sensores ubicados en distintos puntos con respecto al eje de aplicación de carga.

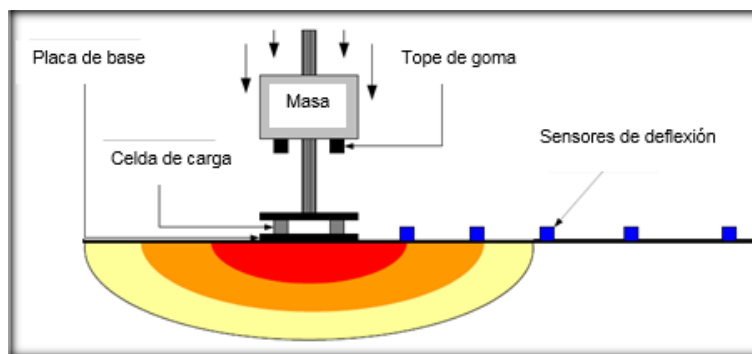


Figura 2. Diagrama de un deflectómetro de Impacto FWD (Falling Weight Deflectometer). (Karim Chatti, M. Emin Kutay, Nizar Lajnef, Imen Zaabar, Sudhir Varma, 2017)

Además, del desarrollo del equipo para medir las deflexiones otro avance que logro incrementar el uso del retrocálculo como técnica de evaluación de pavimentos



fue el desarrollo de la teoría elástica multicapas (desde el año de 1885 por Boussinesq, Burmister con su sistema de dos y tres capas en el año de 1962), por supuesto la teoría elástica multicapas no sería tan practica de utilizar sin las computadoras en conjunto con las cuales se han venido creando programas de cómputo que hacen más sencillo el proceso del retrocálculo para la obtención de los módulos elásticos de las capas del pavimento a través de las deflexiones de superficie.

Para la obtención de los módulos elásticos de las capas del pavimento por retrocálculo se hizo uso de dos herramientas de cómputo. El primero es el software CalBack versión 1.01 que funciona para el análisis de distintos tipos de pavimentos entre los cuales se encuentran los de tipo flexibles, rígidos, y compuestos (University of California Pavement Research Center, 2008).

El programa tiene tres modelos de respuesta:

1. Odemark-Boussinesq
2. WES
3. LEAP

El programa usa por default la teoría Odemark – Boussinesq para el cálculo de las deflexiones mediante las cuales se hacen las iteraciones en la búsqueda del gradiente. También se pueden utilizar otros dos modelos de respuesta basados en la teoría elástica. El WES es el modelo desarrollado por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos (USACE) y el modelo LEAP que fue desarrollado por la Universidad de California.

El programa además cuenta con tres parámetros o motores de búsqueda:

1. Búsqueda de gradiente
2. Filtro Kalman
3. Búsqueda Genética

El segundo software de apoyo es el Evercalc desarrollado por el Departamento de Transporte del Estado de Washington (WSDOT).

Evercalc utiliza un enfoque iterativo para cambiar los módulos en una solución elástica para que coincida con deflexiones teóricas y medidas. Un diagrama de flujo simplificado de este método se muestra en la Figura 3 (Washington State Department of Transportation, 2005).

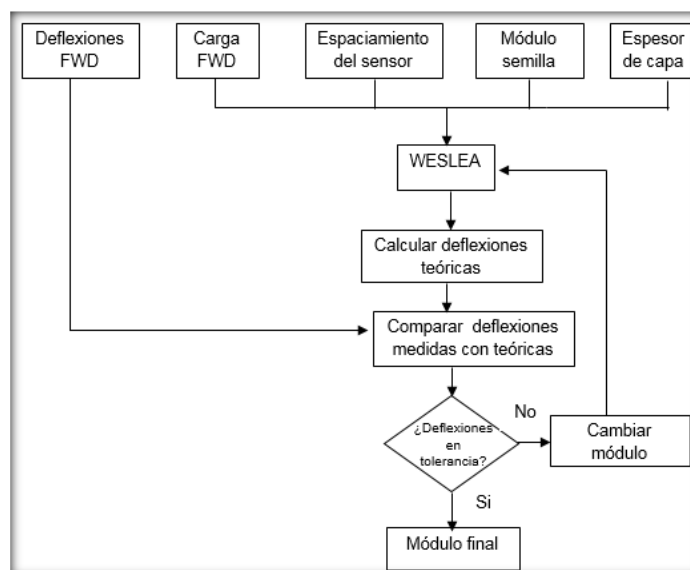


Figura 3. Diagrama de Flujo Evercalc. (Washington State Department of Transportation, 2005)

3.1 Metodología de retrocálculo propuesta

En la actualidad no existe una metodología con pasos a seguir para el proceso del retrocálculo, por lo que siempre se hace a juicio del ingeniero o de la persona que lleve a cabo el análisis. Es recomendable que la persona encargada de hacer un análisis por retrocálculo sea un ingeniero especialista en pavimentos, sin embargo, en la práctica es común que el analista no sea especialista en el área.

Es por ello que en este trabajo se propone una metodología a seguir para el proceso del retrocálculo, con la finalidad de que los resultados sean más precisos y confiables, la cual se describe a continuación.

3.1.1 Detección de datos incongruentes o atípicos

Después del análisis exhaustivo de las deflexiones de los quince tramos de estudio propuestos originalmente, se observó que en muchos casos existían valores de deflexiones que no seguían la forma de la cuenca de deflexión teórica. Esto significa valores de deflexión que no disminuían con respecto a una distancia mayor del centro de aplicación del impacto, lo cual se puede observar en la Figura4. Por lo cual, es necesario hacer una evaluación de los datos de deflexión ya que de la calidad de datos depende la confiabilidad de los resultados del retrocálculo. Para ello es necesario crear filtros que nos sirvan para detectar los datos atípicos o incongruentes en los valores de deflexión.

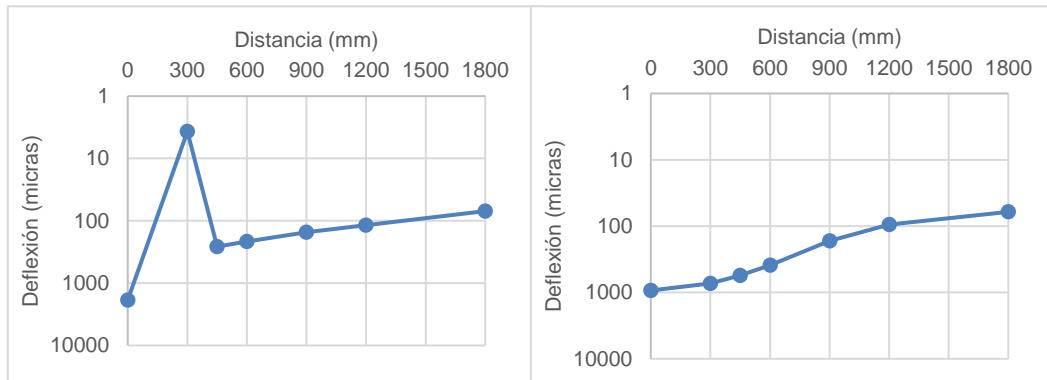


Figura 4: Cuencas de deflexión. a) Cuenca no decreciente con la distancia, b) Cuenca teórica decreciente con la distancia

Programas como CalBack realizan este proceso de filtración para detectar los datos de deflexiones y temperaturas de medición atípicos, de manera automática antes de iniciar el cálculo y obtener los módulos de las capas del pavimento.

Debido a que no todos los programas para retrocálculo disponibles en el mercado realizan este pre-proceso de la información de manera automática, como es el caso del Evercalc, es necesario crear nuestros propios filtros para garantizar la confiabilidad de los datos de entrada.

En nuestro caso para este pre-proceso de la información realizamos una sencilla macro en el programa Excel, la cual nos detecta en todo el conjunto de datos, los valores de deflexión con valor de “cero”, valores “no decrecientes” y temperaturas de medición “fuera de rango”. En la macro se revisa cada valor de deflexión y temperatura para cada estación de medición, y si se localiza algún dato atípico en las columnas del lado derecho de los datos en la hoja de cálculo aparecerá en la celda correspondiente a cada dato “DEFLEXIÓN 0” si es el caso, “ERROR DEFLEXIÓN” si la deflexión no es decrece en algún geófono y “ERROR” si la temperatura de medición excede el límite inferior, “TEMPERATURA FUERA DE RANGO” si la temperatura rebasa el límite superior, si ningún dato es atípico entonces en las celdas aparecerá la leyenda “OK”.

3.1.2 Secciones homogéneas

El criterio que se tomó para dividir los tramos en secciones homogéneas fue utilizando un método propuesto por el Laboratorio Central de Puentes y Carreteras de Francia (LCPC) en el año de 1981 por Lebas (Mancini, 2009).

El método utiliza la siguiente función:

$$g(i) = \frac{n}{i * (n - i)} * \left[\sum_{j=1}^i y_j \right]^2 \quad (1)$$

$$y_j = x_j - \bar{x}$$

Donde:

i = número de datos menos 1

n = número de mediciones

y_j = valor de la medición menos el promedio

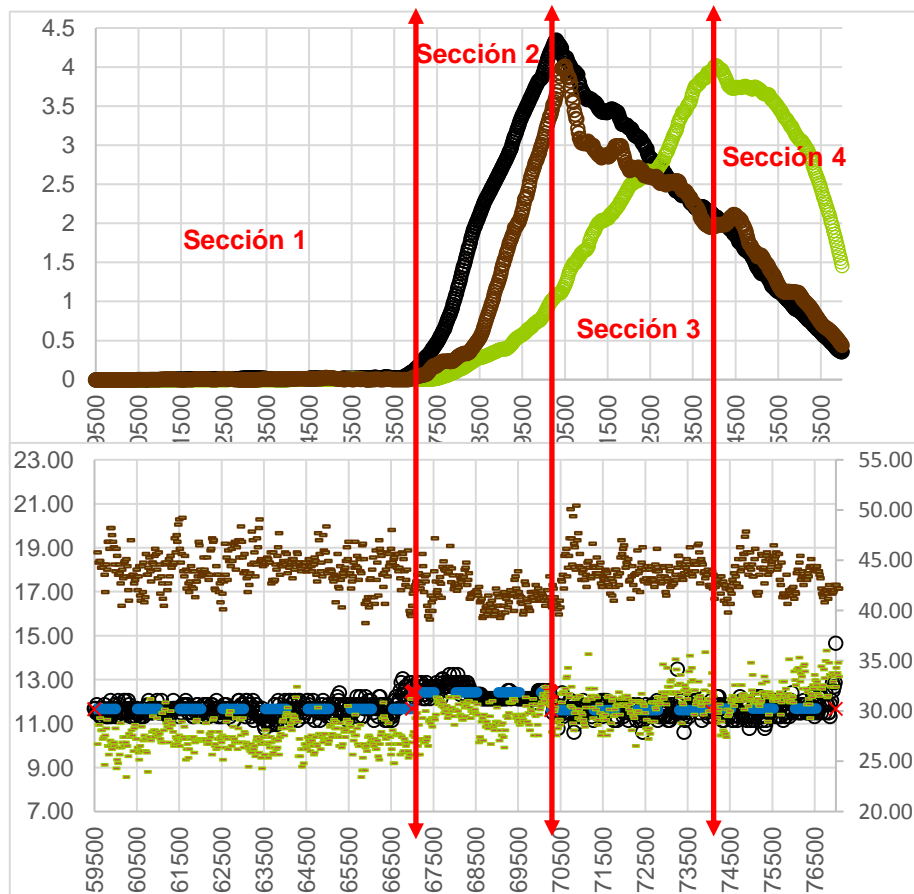


Figura 5: Secciones homogéneas, tramo Km 59+500 al 77+500, carretera México-Pachuca



En la parte superior de la Figura 5 se graficó la función $g(i)$ para los espesores de las capas del pavimento, en donde en el eje horizontal aparece el Cadenamiento del tramo y en el eje vertical el valor de la función normalizado. Los puntos de color negro corresponden a la carpeta, el color verde a la base y el café a la Subrasante. El criterio tomado para la división de las secciones homogéneas fue donde el valor de la función para cada capa tenía un cambio de pendiente importante. Por consiguiente en la parte inferior de la Figura aparecen los valores de los espesores de las capas con su color correspondiente, en donde de igual manera en el eje horizontal aparece el Cadenamiento del tramo y en el vertical los valores de las capas del pavimento en centímetros. La división se realizó tomando el criterio de la función $g(i)$, se traslapo a la parte inferior de la Figura 5 para de esta manera poder dividir en secciones homogéneas los valores de las capas del pavimento y obtener el valor promedio de cada una de ellas como lo muestra la línea punteada azul para el caso de la carpeta.

3.1.3 Obtención de módulos elásticos

Una vez realizado el pre-proceso de los datos de entrada y habiendo dividido los tramos de estudio en secciones homogéneas, el siguiente insumo antes de iniciar el cálculo de los módulos de las capas del pavimento son los espesores de las capas del pavimento. Para fines de este artículo solo se presentan los resultados de la sección homogénea 4 del km 74+020 al 77+500 de la carretera México-Pachuca. En la Tabla 1 se muestran los valores promedio de las capas del pavimento.

Tabla 1. Espesores promedio por sección homogénea, tramo 59+500 al 77+500 de la carretera México-Pachuca

Sección Homogénea	Cadenamiento		Espesores promedio(cm)		
	Inicio	Fin	Capa 1	Capa 2	Capa 3
1	59+500	67+000	13	26	44
2	67+020	70+260	12	33	43
3	70+280	74+000	11	34	44
4	74+020	77+500	10	34	43

Ya definidos todos los datos de entrada, el siguiente paso es realizar el retrocálculo para obtener los módulos de cada una de las capas del pavimento. Una vez iniciado el retrocálculo se recomienda verificar que el ajuste de las cuencas de los valores medidos con los calculados sea lo más cercano posible. Esto lo podemos verificar con el RMS (Root Mean Square) y se recomienda para esto que las diferencias estén por debajo del 4%, ya que entre menor sea el RMS mayor será el ajuste de las cuencas. Cuando este ajuste no sea satisfactorio habrá que verificar que los espesores de las capas sean los adecuados (lo más recomendable es que



se hallan hecho sondeos en campo para verificar los espesores) y si aun teniendo la certeza de que los espesores son los adecuados no se logra el ajuste, se recomienda subdividir o unir las capas granulares para tratar de lograr un mejor ajuste y que los resultados sean representativos del sitio en estudio. Tomando en cuenta el criterio anterior y los valores típicos de módulos los resultados se consideran aceptables, es decir, si los módulos obtenidos por retrocálculo se encuentran dentro de un rango de entre el 40% al 70% (rango obtenido en pruebas por diversos autores citados en párrafos posteriores) respecto a los módulos típicos de laboratorio recomendados por el Centro de Investigación de Pavimentos de la Universidad de California y que el ajuste de las cuencas se haga con un RMS igual o menor al 4%, se consideran aceptables los resultados. En la Tabla 2 se muestran los valores típicos de módulos elásticos para diferentes materiales de los cuales pueden estar conformadas las capas del pavimento.

Tabla 2: Módulos típicos de materiales para conformar capas de pavimento. (University of California Pavement Research Center, 2008)

Material	Rango E (Mpa)
Mezcla asfáltica en caliente (a 20°C)	3000 - 4000
Concreto con cemento Portland	14000 - 56000
Materiales estabilizados	35 - 14000
Materiales no estabilizados	35 - 690

En la Figura 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos para las capas de carpeta, base y subrasante con cada una de las herramientas utilizadas.

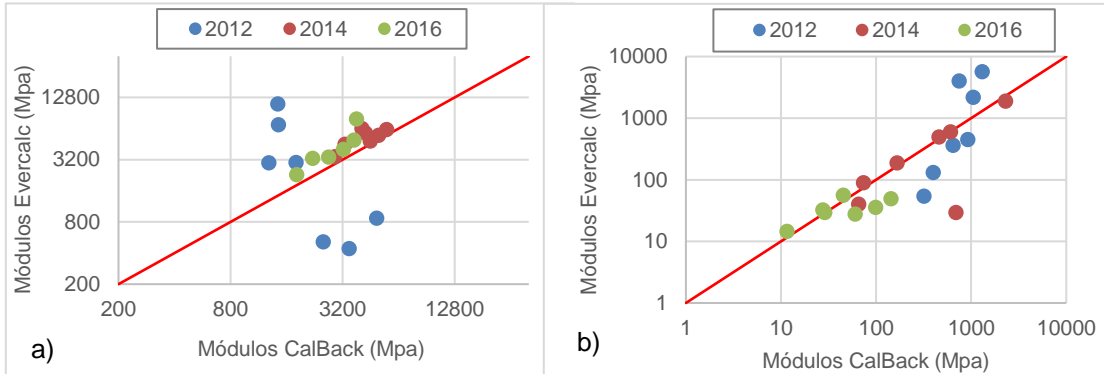


Figura 6: Comparación de resultados entre CalBack y Evercalc. a) Módulos de carpeta, b) Módulos de base

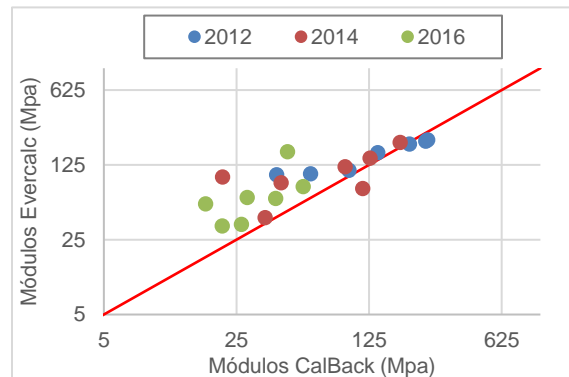


Figura 6: Módulos obtenidos con CalBack y Evercalc para la capa Subrasante

Como podemos observar en las Figuras 6a, 6b y 7 mostradas anteriormente existe dispersión entre los módulos obtenidos con CalBack y Evercalc. En el caso de la carpeta y la subrasante podemos observar que los valores de módulo se encuentran la mayoría por encima de la línea de igualdad, por lo que se asume que el programa Evercalc nos da módulos con valores mayores que CalBack. Para el caso de la base se observa lo contrario. También se observa que la mayor dispersión de los datos se da en el año 2012 esto se entiende porque de acuerdo con la información entregada por la Dirección General de Servicios Técnicos hasta después del 2012 es cuando se han venido tomando mejores medidas para el control de calidad en las campañas de auscultación.



La dispersión en los resultados que observamos anteriormente también se puede atribuir a que los programas de cómputo son distintos, ya que como lo mencionábamos en párrafos anteriores el CalBack por ser un software de más reciente creación cuenta con más de un modelo de respuesta y parámetros de búsqueda para el cálculo de los módulos por lo que es más completo que el Evercalc que solo utiliza un modelo de respuesta con un solo parámetro de búsqueda.

También pueden existir diferencias entre los módulos obtenidos en laboratorio y los obtenidos a través del retrocálculo, esto es debido a que en laboratorio se tienen condiciones controladas que en campo no lo pueden ser así.

Lo anterior queda documentado con estudios previos donde se demuestra que la diferencia entre los módulos de laboratorio y los obtenidos por retrocálculo tienen cierta diferencia, y esta se encuentra en un rango del 20% al 40% como lo comprueba el estudio realizado por Zhou (2000) quien comparó los módulos obtenidos por retrocálculo y en laboratorio en el Estado de Oregon. Incluso se han realizado estudios donde la diferencia es mayor al 40% como el estudio realizado por Nazarian et al (1998) donde la diferencia fue de hasta el 70%, al realizar pruebas en distintos materiales del estado de Texas (Edward Offei, Rhonda Young & Performing, 2013).

4. Análisis de Resultados, obtención de curvas maestras y estimación del daño

Una vez realizado el retrocálculo, lo siguiente fue estimar las curvas maestras de los diferentes años de estudio. Las curvas maestras se obtuvieron con el modelo de Superposición Tiempo-Temperatura que utiliza el software CalBack que es el mismo que usa la Guía Empírico Mecanicista (MEPDG). El modelo usado es el que se muestra en la ecuación 2 (Ullidtz & Harvey, John, Tsai, 2006).

$$\log(E_i) = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \log(tr))} \quad (2)$$

Donde:

E_i = Es el módulo de la mezcla asfáltica

tr = Tiempo reducido, en segundos

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = Son constantes y logaritmos base 10

Las curvas maestras se fueron ajustando a la distribución media de los módulos calculados y ajustados a la temperatura de referencia de 20 °C, por el software CalBack, variando las constantes α , β , γ , δ .

En la Figura 8 se muestran las curvas maestras desde al año 2012 hasta el año 2016. En ellas se puede ver la caída de rigidez con el paso del tiempo, es decir, para el año 2012 se observan valores de módulo mayores que en 2014 y por consecuencia en el año 2014 se observan módulos mayores que en el 2016.

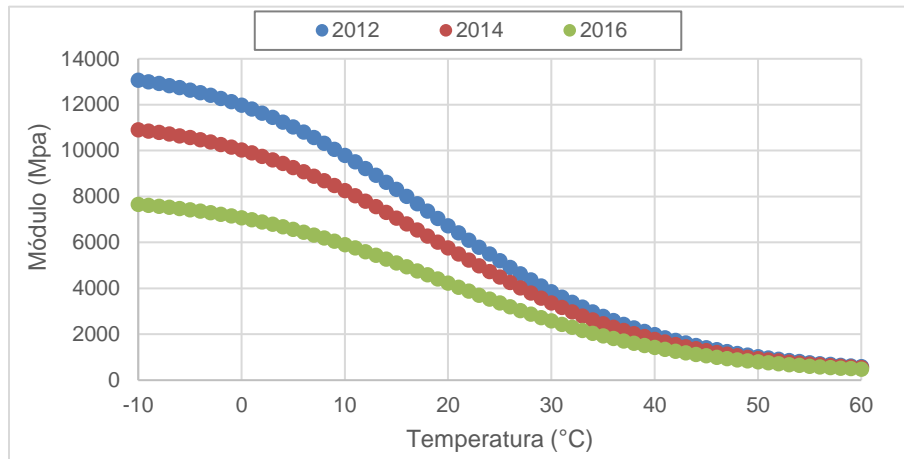


Figura 8: Curvas maestras para la carpeta asfáltica

A la vez se graficaron los resultados de los módulos obtenidos a través del retrocalculo con el software CalBack para los tres años como se muestra en la Figura 9.

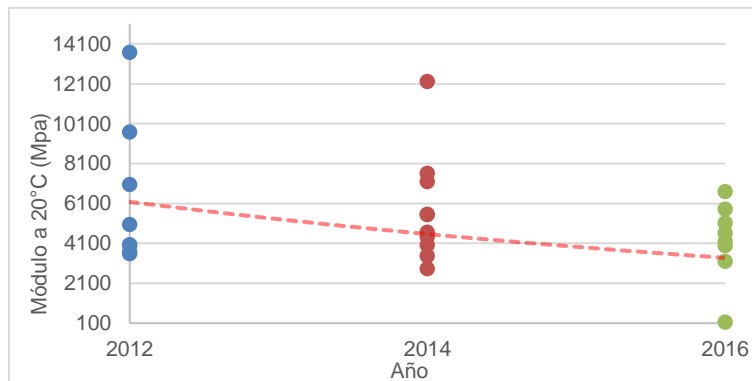


Figura 9: Curva de daño de la carpeta asfáltica

En la Figura anterior se puede observar la curva de daño. La tendencia del valor del módulo obtenido por retrocálculo de la carpeta, es a disminuir con el paso del tiempo, por lo que de la misma manera en esta grafica comprobamos la disminución existente de la rigidez.

También se obtuvo el daño en porcentaje a través de una relación entre el módulo obtenido por retrocálculo, ajustado a la temperatura de referencia (20°C), del año actual entre el año anterior. La relación es la que se muestra en la ecuación 3.

$$d = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right) 100 \quad (3)$$

Donde:

d = Daño en porcentaje

M₂ = Módulo del año actual

M₁ = Módulo del año anterior

De esta manera se estimó el daño que hay de un año a otro, de acuerdo con la disminución de la rigidez (módulo de elasticidad). Y los resultados se muestran en la Figura 10.

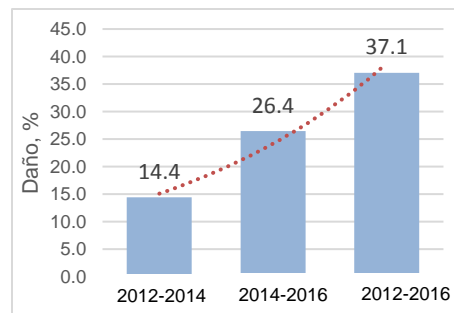


Figura 7. Estimación del daño en porcentaje

De acuerdo con la Figura anterior, podemos observar que el daño va en aumento con el paso del tiempo, por lo que con ello se comprueban todos los resultados anteriormente mostrados y la hipótesis de que la rigidez disminuye cuando el daño aumenta y que es dependiente del tiempo.

También de manera conjunta se graficó el agrietamiento por fatiga. En la Figura 11 se graficó la distribución normal de los valores del agrietamiento contra el



porcentaje de agrietamiento, observándose que con el paso del tiempo el agrietamiento va en aumento, porque en la gráfica claramente se aprecia que el valor medio de los datos del año 2016 es mayor que el de 2014 y consecuentemente el de 2014 es mayor que el de 2012.

Relacionando el aumento de agrietamiento por fatiga con la disminución de la rigidez observada en las curvas maestras y en la curva de daño estimada, con el paso del tiempo comprobamos que con conforme aumenta el deterioro del pavimento disminuye la rigidez del mismo.

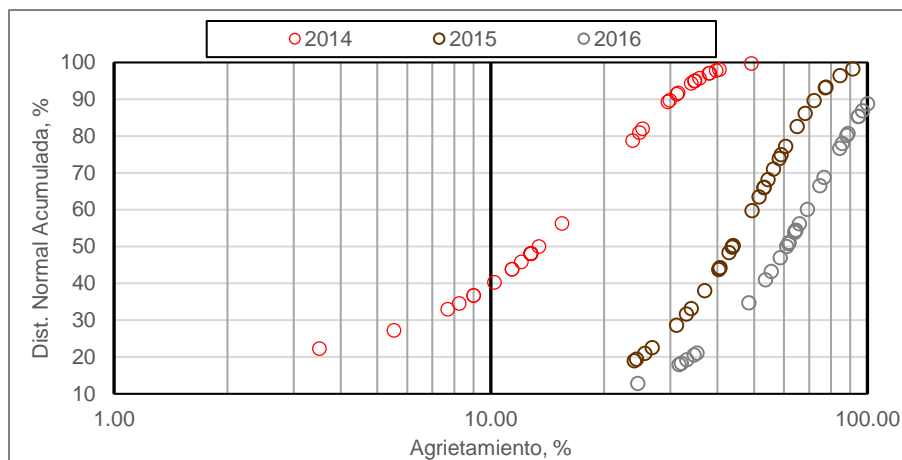


Figura 8. Agrietamiento por fatiga

4. Conclusiones

El proceso de retrocálculo es un tema muy poco estudiado en México, por lo que el estudio realizado en el presente trabajo deja muchas enseñanzas y nuevos temas por abordar.

Al ir estudiando el proceso de retrocálculo comprobamos que, de la confiabilidad de nuestros datos de entrada dependen los resultados obtenidos. De esta manera es necesario realizar un pre-proceso de toda la información que emplearemos durante el retrocálculo, para evitar errores y garantizar la confiabilidad de los resultados.

En cuanto a la comparación entre los módulos obtenidos con CalBack y Evercalc notamos cierta dispersión, viéndose que los resultados están por arriba de la línea de igualdad, por lo que Evercalc da como resultado mayores valores de módulo. Aunque los dos programas utilizan un método iterativo para la búsqueda de los módulos elásticos de las capas, utilizando las deflexiones de superficie medidas con deflectómetro de impacto, encontramos que los resultados son un poco distintos.



Esto se atribuye a que el Evercalc es un software más antiguo y solo utiliza un modelo de respuesta, a diferencia del CalBack que utiliza tres modelos de respuesta distintos y tres parámetros de búsqueda por que tiene la capacidad de realizar un número mayor de iteraciones, con lo que se logra un mayor ajuste de los valores medidos con los calculados.

Al realizar un análisis de los valores de módulo obtenidos encontramos que la rigidez va disminuyendo con el paso del tiempo como teóricamente debe de ser el comportamiento de un pavimento.

Finalmente se concluye que existe una relación de la rigidez del pavimento con el agrietamiento por fatiga y que ambos parámetros son dependientes del tiempo, ya que en este estudio al estimar el daño existente entre los años 2012, 2014 y 2016 porque se observó que con el paso del tiempo el agrietamiento aumenta y como consecuencia por el contrario la rigidez o el valor del módulo de la capa va disminuyendo.

5. Referencias

- [1] Bohn, A. O. (1990). The History of the Falling Weight Deflectometer (FWD).
- [2] Karim Chatti, M. Emin Kutay, Nizar Lajnef, Imen Zaabar, Sudhir Varma, and H. S. L. (2017). Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers. Washington, DC.
- [3] University of California Pavement Research Center. (2008). CalBack Manual Version 1.0 September 2008.
- [4] Washington State Department of Transportation. (2005). Everseries Users Guide Pavement Analysis Computer Software and Case Studies. Washington, DC.
- [5] Mancini, L. (2009). Studio teorico-applicativo del decadimento delle caratteristiche superficiali di pavimentazioni aeroportuali: regolarità. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II Polo delle Scienze e delle Tecnologie Facoltà. <https://doi.org/10.2451/2011PM0030>.
- [6] Edward Offei, Rhonda Young, K. K. and D. A., & Performing. (2013). EVALUATING BASE WIDENING METHODS. Wyoming. <https://doi.org/C-ITS Platform>.
- [7] Ullidtz, P., & Harvey, John, Tsai, B. (2006). Calibration of CalME models using WesTrack Performance Data.