



Caracterización estructural de los pavimentos asfálticos mediante la normalidad, varianza y probabilidad, medida con equipo FWD en la rodera externa y al centro del carril sobre pavimentos en operación

Luis Alberto Hernández¹, Domingo Pérez²,

¹ YUTAVE Ingeniería, Cardel Ver., México, Igalicia@yutave.com

² YUTAVE Ingeniería, Cardel Ver., México, Domingopm@yutave.com

Resumen

Dentro de los sistemas de gestión de pavimentos, precisar la condición estructural actual de un pavimento mediante pruebas de campo no destructivas es de gran importancia para realizar la mejor programación de su mantenimiento o rehabilitación. Así mismo, la importancia del punto donde se efectuarán las mediciones conlleva determinado criterio estratégico para la obtención de los mejores resultados y los más representativos de la estructura de pavimento que se esté evaluando. En este artículo se presenta el resultado de la investigación de campo respecto a la influencia y variabilidad de la medición de deflexiones con el deflectómetro de impacto (FWD) para analizar la condición estructural del pavimento. Para el desarrollo de la investigación se establecieron criterios de evaluación de deflexiones con el fin de caracterizar la condición estructural de los pavimentos asfálticos en la zona que se encuentra sometida al tránsito donde se presenta principalmente la falla por rodera y la zona central de un carril. Para este propósito, se realizaron mediciones con el FWD de manera sistemática en tres tramos de un kilómetro con distintas características geométricas, estructurales y tránsito vehicular, las mediciones se llevaron a cabo a cada 100 m en la rodera derecha y al centro de carril, aplicando tres impactos; uno de asentamiento y dos de medición, en las mismas condiciones de temperatura y humedad. A través de un análisis estadístico mediante el software Minitab, se realizó una comparativa de la respuesta estructural en función a las máximas deformaciones en la cuenca de deflexión para caracterizar la condición estructural del pavimento con respecto al lugar donde se efectuaron las mediciones, pudiendo identificar que estadísticamente las poblaciones de los datos analizados en cada tramo resultaron ser significativamente iguales, es decir, las varianzas de las poblaciones analizadas son iguales, por tanto siempre que el pavimento no presente una falla por deformación o por fatiga, el lugar de aplicación de la medición de deflexiones al centro del carril y la rodera derecha no influye significativamente para descartar uno u otro resultado.

Palabras Clave: Pavimentos, Auscultación, deflexiones, Evaluación estructural

1 Introducción

La evaluación estructural de un pavimento, se asocia con capacidad para soportar las cargas del tránsito vehicular y los cambios ambientales a los que está expuesta la estructura del mismo. Dicha evaluación, debe precisar lo mejor posible las condiciones de servicio del pavimento para desarrollar un programa de mantenimiento o rehabilitación de acuerdo a las necesidades reales [1, 2, 3, 4]. Dentro de los procedimientos de evaluación para conocer la condición estructural del pavimento existen dos: a) la evaluación destructiva y b) la no destructiva. El primero incluye la extracción de muestras y excavación de calas, haciendo este un procedimiento confiable [5], no obstante, aplicarlo para un sistema de gestión a nivel red nacional suele ser complicado por el costo elevado, tiempo e intensidad de la mano de obra y el alto nivel la seguridad vial [6, 7]. Por tanto, se utiliza con más frecuencia el procedimiento por métodos no destructivos para la evaluación estructural del pavimento en servicio.



Actualmente, la deflexión de superficie, medida con el deflectómetro de impacto (FWD) se usa ampliamente como método no destructivo para evaluar la condición estructural del pavimento [8, 9, 10]. Con base en las deflexiones obtenidas con el FWD, se pueden estimar las condiciones estructurales del pavimento para la gestión de los mismos a nivel de red nacional.

Las deflexiones se han utilizado ampliamente como respuestas mecánicas tanto para diseñar estructuras como para evaluar la capacidad estructural de los pavimentos [9]. De acuerdo con el diseño estructural de pavimentos, existen dos deformaciones críticas principales para los pavimentos asfálticos: (I) la deformación por tensión transversal en la parte inferior del pavimento asfáltico, asociada al comportamiento de la fisuración ascendente, y (II) la deformación por compresión vertical en la parte superior de la subrasante, relacionada con el comportamiento de la formación de roderas en la subrasante [11].

Estas deformaciones críticas son parámetros mecánicos confiables para evaluar las condiciones estructurales del pavimento por medio del FWD, actualmente, las deformaciones críticas se pueden predecir utilizando módulos de capa retrocalculados a partir de las deflexiones de la superficie del pavimento, junto con modelos de respuesta, como el análisis elástico en capas. Los parámetros de la cuenca de deflexiones, derivados de los datos de deflexiones del FWD se han utilizado ampliamente para evaluar su condición estructural y se ha encontrado que se correlacionan bien con las deformaciones críticas [12, 13, 14].

Algunas investigaciones han desarrollado relaciones entre la cuenca de deflexiones y las respuestas del pavimento para predecir deformaciones críticas [3, 15, 16]. Sin embargo, la mayoría de estas relaciones se establecieron a partir de mediciones in-situ al centro del carril. Por tanto, la diferencia en la medición en un punto de la superficie del pavimento modifica su condición estructural en función a su rendimiento y comportamiento, debido a la ubicación de la zona con mayor concentración de cargas [17].

1.1 Objetivo

Evaluar el efecto de las deformaciones críticas sobre las propiedades estructurales de diferentes pavimentos en términos de agrietamiento y formación de roderas, identificando la variación en los puntos de medición de las deflexiones para predecir deformaciones críticas

2 Análisis Estadístico De Datos

2.1 Medición de las deflexiones con FWD

Se realizaron mediciones de deflexiones con el equipo FWD en tres tramos carreteros: 1) Fortín – Conejos, 2) Libramiento Cardel, y 3) Tamarindo – Cardel, ubicados en el estado de Veracruz. Las mediciones se realizaron en los carriles de baja velocidad, realizando mediciones al centro del carril y mediciones en la rodera derecha del mismo como lo establece la normativa N-CVS-CAR-1-03-010/17 [18]. En Tabla 1 se presentan los datos de las mediciones de la deflexión máxima $\delta 1$ para cada tramo en la rodera derecha y al centro del carril.

Así mismo, para evaluar bajo las mismas condiciones ambientales, las mediciones correspondientes a cada tramo se realizaron el mismo día.



Tabla 1. Deflexiones medidas en los tramos de estudio

Tramo Km	Fortín – Conejos		Libramiento Cardel		Tamarindo – Cardel	
	$\delta 1$ Rd mm	$\delta 1$ Cc mm	$\delta 1$ Rd mm	$\delta 1$ Cc mm	$\delta 1$ Rd mm	$\delta 1$ Cc mm
0+000	1188.8	996.9	670.6	557.2	355.1	443.2
0+100	874	853.6	544.4	489.9	259.8	299.9
0+200	877.5	917.6	897.3	710	439.4	399.9
0+300	1277.3	1360.1	660.4	574	438.9	477.5
0+400	1245.9	1064.3	654	540.8	467.4	432.7
0+500	773.5	747.6	586	527.6	324.3	462.5
0+600	396.4	464.3	511.7	530.4	311.2	313.7
0+700	1343	1360.8	573.6	639.8	222.5	265
0+800	976.9	945.2	636.8	556.7	236.4	287.4
0+900	1112.4	761.2	526.6	517.9	275.6	281.5
1+000	470.1	465.5	568.7	499.4	353.9	306.9

*Rd: Rodera derecha, Cc: Centro del carril.

2.2 Prueba de normalidad

Para realizar el análisis estadístico más adecuado a las necesidades del problema se realizó una prueba de normalidad por dos métodos diferentes (gráfico y estadístico) para cada conjunto de datos con el fin de identificar si presentaban una distribución paramétrica o no paramétrica. Primeramente, se realizó una gráfica de probabilidad normal y como segundo método se realizó la prueba de Shapiro Wilk, la cual, se ajusta muy bien para conjuntos con menos de 30 datos. Las Figuras 1 a 3 presentan las gráficas de normalidad de cada tramo.

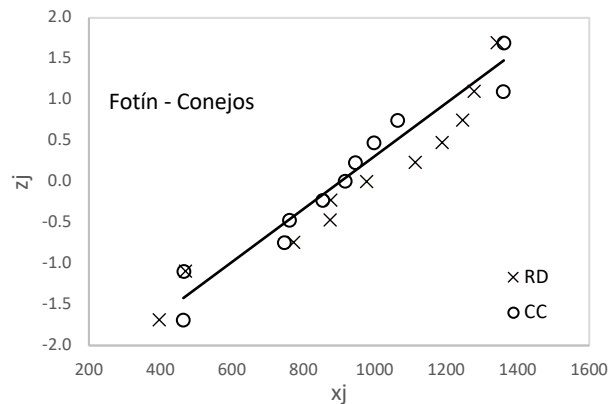


Figura 1. Gráfica de normalidad tramo Fortín – Conejos.

Cuando las gráficas de normalidad muestran una distribución lineal de los datos se puede decir que presentan una distribución normal.

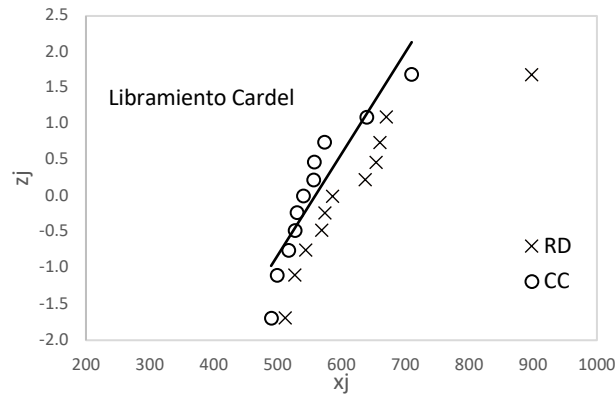


Figura 2. Gráfica de normalidad tramo Libramiento Cardel

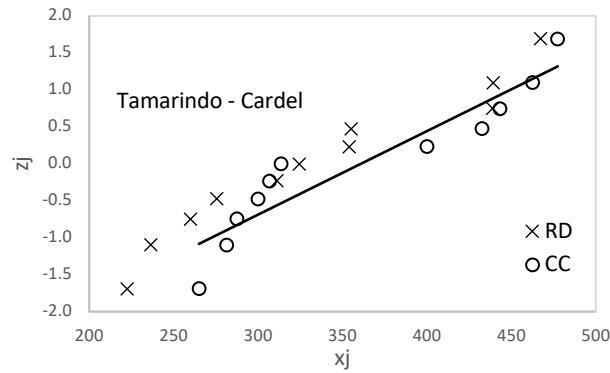


Figura 3. Gráfica de normalidad tramo Tamarindo Cardel

Para la prueba Shapiro Wilk, se hace uso de dos hipótesis. La primera es la hipótesis nula que indica que los datos se ajustan aproximadamente a una distribución normal, ecuación 1, y la segunda es la hipótesis alternativa que indica que los valores no se ajustan a la normalidad del conjunto de datos, ecuación 2. Calculando la media y la varianza de cada conjunto y considerando un valor de significancia de 0.05 se hizo uso de las tablas de Shapiro Wilk, donde se obtuvieron los siguientes resultados que se presentan en la Tabla 2.

$$H_0: X_i \approx N(\mu, \sigma^2) \quad (1)$$

$$H_1: X_i \neq N(\mu, \sigma^2) \quad (2)$$

Donde H0 La distribución es normal (hipótesis nula) y H1 La distribución es anormal (hipótesis alternativa).

Tabla 2. Resultados de la prueba Shapiro Wilk

Tramo	Fortín – Conejos	Libramiento Cardel	Tamarindo – Cardel
SWc	0.92	0.850	0.931
SWt	0.850	0.850	0.850
p-value	0.375	0.050	0.438



SWc: Coeficiente de correlación; indica en qué porcentaje se relacionan los datos de los conjuntos de cada tramo, donde se desea verificar la normalidad.

SWt: Coeficiente de correlación mínimo requerido.

p-value: Valor *P* de verdadera significancia del coeficiente SWc.

Puede observarse que los resultados obtenidos de la prueba de Shapiro Wilk, indican que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula, por lo que los valores de cada conjunto de datos de mediciones de deflexiones se ajustan a una distribución normal. Del mismo modo, los valores *P* de verdadera significancia indican que son mayores al valor de significancia de 0.05 analizado para la prueba, corroborando la hipótesis nula.

2.3 Análisis de igualdad de varianzas de dos conjuntos

El análisis para verificar si existe igualdad entre las varianzas de dos conjuntos de datos se realizó mediante la prueba de *Distribución F de Fisher*, la cual, nos permite saber si estadísticamente dos varianzas son iguales o distintas.

Para realizar la distribución *F de Fisher* se deben de cumplir dos requisitos: 1) las muestras deben de ser aleatorias independientes, y 2) las poblaciones deben de ser normales. Para ello, se calcularon parámetros estadísticos básicos como el tamaño de la muestra, media, desviación estándar, grados de libertad y varianza. La ecuación 3 presenta la expresión para calcular el *F de Fisher*.

$$F = S_1^2 / S_2^2 \quad (3)$$

Donde S_1^2 es la desviación estándar de la muestra 1, S_2^2 es la desviación estándar de la muestra 2 y *F* es el valor *F* de la distribución de Fisher

La ecuación 4 representa el cálculo del valor de *F* teórico.

$$1 - \alpha = P(F \leq f_{\alpha}, v_1, v_2) \quad (4)$$

Donde α es significancia, considerada de 0.05, v_1 son los grados de libertad del numerador, v_2 son los grados de libertad del denominador, f_{α} es el *F* teórico de Fisher el cual depende del grado de significancia seleccionado.

De la prueba de distribución *F de Fisher* se obtuvieron los siguientes resultados que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la Distribución *F de Fisher*

Tramo	Fortín – Conejos	Libramiento Cardel	Tamarindos – Cardel
α	0.05	0.05	0.05
Fc	1.142	2.748	1.076
Ft	2.978	2.978	2.978

En las Figuras 4 a 6, se presentan las gráficas de la distribución *F de Fisher* de cada tramo, donde los resultados indican que existe una igualdad estadística de las desviaciones estándar.

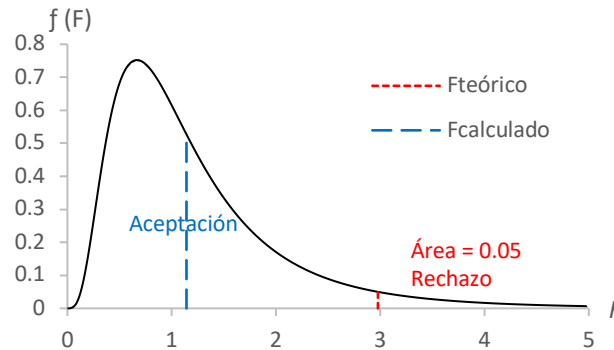


Figura 4. Gráfica de la distribución F de Fisher tramo Fortín – Conejos.

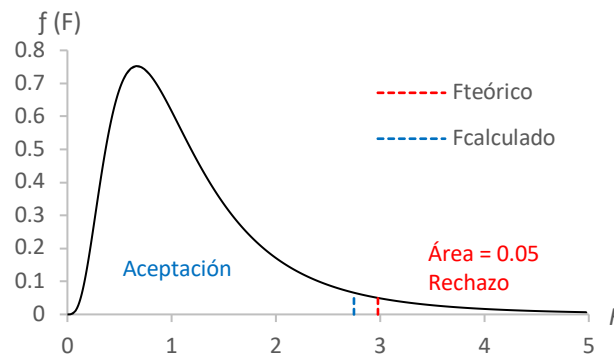


Figura 5. Gráfica de la distribución F de Fisher tramo Libramiento Cardel.

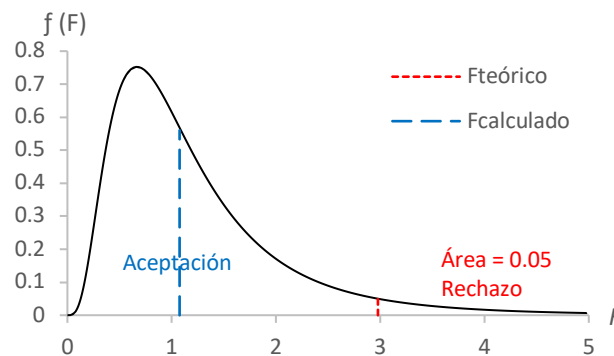


Figura 6. Gráfica de la distribución F de Fisher tramo Tamarindo – Cardel.

2.4 Gráficas de probabilidad de ocurrencia

Con ayuda del Software Minitab, se realizaron gráficas de probabilidad de distribución normal. Se observa la intersección de los rangos de probabilidad de ocurrencia para ambos conjuntos por cada tramo estudiado. En las Figuras 7 a 9 se observan los resultados obtenidos.

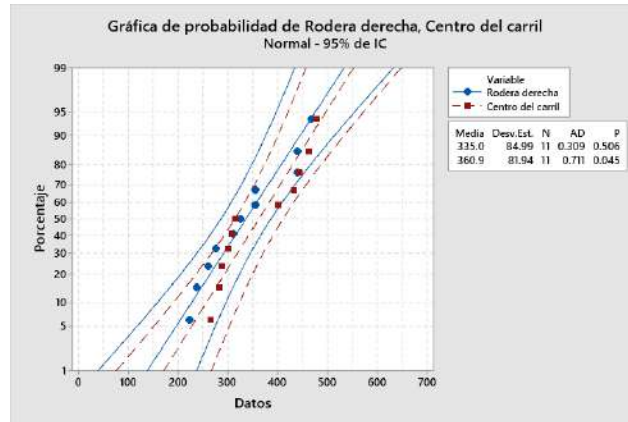


Figura 7. Gráfica de probabilidad de ocurrencia de la distribución normal para el tramo Fortín – Conejos.

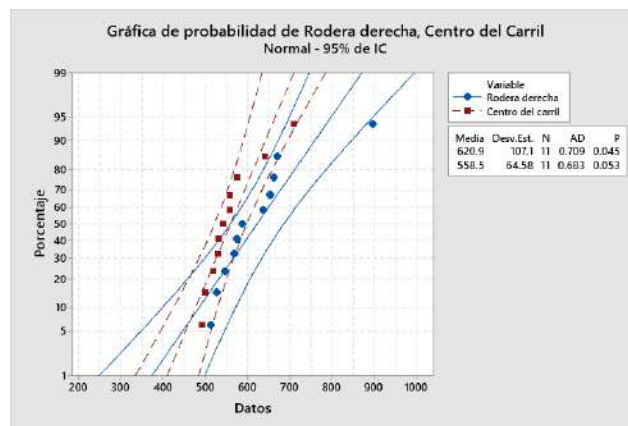


Figura 8. Gráfica de probabilidad de ocurrencia de la distribución normal del tramo Libramiento Cardel.

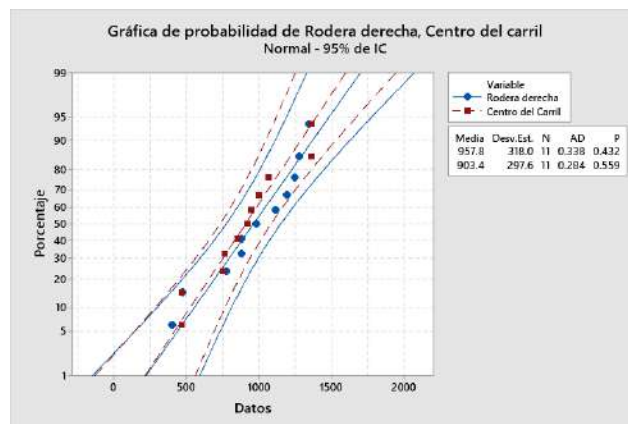


Figura 9. Gráfica de probabilidad de ocurrencia de la distribución normal del tramo Tamarindo – Cardel.



3 Conclusiones

La deflexión de un pavimento está firmemente relacionada con la capacidad estructural con la que cuenta el arreglo de las capas y los materiales que componen dicha estructura, esta Respuesta/Deformación, puede denotar una resistencia apropiada o desfavorable biyectivamente asociada a las condiciones de carga a la que dicho arreglo de pavimento será sometido, es decir, una misma respuesta estructural puede representar una buena, regular o mala condición del pavimento según sea las necesidades y demanda a la que será sometido el pavimento.

Con base en los diferentes análisis estadísticos realizados, se puede observar que los tres tramos analizados presentan una distribución normal para las mediciones de sus deflexiones en la rodera derecha como al centro del carril.

Las pruebas de normalidad realizadas de manera gráfica pueden ser escasas de información ya que no dan la certeza de que los datos analizados representen una distribución normal, no obstante, el método de la distribución F de Fisher presenta gran confiabilidad y mostro un indicio de que el tramo del libramiento Cardel se encontraba al límite aceptable de la igualdad de sus varianzas, por otro lado, los tramos Fortín – Conejos y Tamarindo – Cardel presentaron mejores resultados en cuanto a la igualdad de varianzas, resultando por arriba del 90% de correlación entre sus conjuntos de datos.

Así mismo, el análisis con el software Minitab para la elaboración de las gráficas de probabilidad de ocurrencia indica que los resultados son congruentes con el análisis del método de la distribución F de Fisher, esclareciendo más a detalle el caso del tramo Libramiento Cardel el cual se considera que entre sus mediciones hay menos igualdad, pero es aceptable. No obstante, con ayuda de los diferentes análisis estadísticos empleados para la elaboración de este artículo se puede llegar a la conclusión de que los conjuntos de datos de deflexiones en la rodera derecha y al centro del carril de los tres tramos estudiados son significativamente iguales.

Esto ocurre porque la estructura del pavimento se comporta como un medio continuo cuando agentes externos no hayan modificado la estructura interna de cada capa que lo conforma, una vez que cualquiera de las capas que conforman dicho pavimento llega a un estado de falla sea por deformación o agrietamiento, se vuelve un medio discontinuo, incapaz de replicar la respuesta estructural aun cuando se tengan las mismas condiciones de carga, humedad y temperatura, dado que la respuesta estructural no sigue el patrón de respuesta asociado a las teorías de diseño de pavimentos actuales y tendría que analizarse de forma particular cada deflexión.

Por último, es recomendable procurar que las mediciones de las deflexiones siempre se midan en la zona crítica, es decir, en la rodera derecha del carril de estudio siempre y cuando la seguridad de los operadores no se vea comprometida y la geometría de la carpeta asfáltica favorezca las mediciones in-situ, no obstante, cuando el lugar no favorezca la medición se deberá tener cuidado de que la estructura del pavimento no presente falla por deformación o agrietamiento para que el medio donde se realiza la prueba de deflexión se comporte como un medio continuo, y con ello los resultados sean significativamente similares aun cuando se realicen al centro del carril.

4 Referencias

- [1] D.S. Gedafa, M. Hossain, R. Miller, T. Van (2010). *Estimation of remaining service life of flexible pavements from surface deflections*, J. Transp. Eng. 136 (4) 342–352.
- [2] J. Bryce, G. Flintsch, S. Katicha, B. Diefenderfer (2013). *Developing a network-level structural capacity index for asphalt pavements*, J. Transp. Eng. 139 (2) 123–129.
- [3] M. Saleh, (2016). *A mechanistic empirical approach for the evaluation of the structural capacity and remaining service life of flexible pavements at the network level*, Can. J. Civ. Eng. 43 (8) 749–758.
- [4] Hasanuddin, A. Setyawan, B. Yulianto (2018). *Evaluation of road performance based on international roughness index and falling weight deflectometer*, IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 333, 012090.



- [5] Y. Deng, X. Luo, Y. Zhang, R.L. Lytton (2020). *Determination of complex modulus gradients of flexible pavements using falling weight deflectometer and artificial intelligence*, Mater. Struct. 53 (4) 100.
- [6] G.M. Hadjidemetriou, S.E. Christodoulou (2019). *Vision- and entropy-based detection of distressed areas for integrated pavement condition assessment*, J. Comput. Civil Eng. 33 (3) 04019020.
- [7] V. Vyas, V.J. Patil, A.P. Singh, A. Srivastava (2019). *Application of infrared thermography for debonding detection in asphalt pavements*, J. Civil Struct. Health Monitor. 9 (3) 325–337.
- [8] B.H. Nam, J. An, M. Kim, M.R. Murphy, Z. Zhang (2016). *Improvements to the structural condition index (SCI) for pavement structural evaluation at network level*, Int. J. Pavement Eng. 17 (8) 680–697.
- [9] C. Plati, P. Georgiou, V. Papavasiliou (2016). *Simulating pavement structural condition using artificial neural networks*, Struct. Infrastruct. Eng. 12 (9) 1127–1136.
- [10] O. Elbagalati, M. Elseifi, K. Gaspard, Z. Zhang, (2018). *Development of the pavement structural health index based on falling weight deflectometer testing*, Int. J. Pavement Eng. 19 (1) 1–8.
- [11] AASHTO (2020). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*, American Association of State Highway and Transportation Officials, [Washington D.C.].
- [12] A. Kavussi, M. Abbasghorbani, F. Moghadas Nejad, A. Bamdad Ziksari (2017). *A new method to determine maintenance and repair activities at network-level pavement management using falling weight deflectometer*, J. Civil Eng. Manage. 23 (3) 338–346.
- [13] V. Vyas, A.P. Singh, A. Srivastava (2021). *Prediction of asphalt pavement condition using FWD deflection basin parameters and artificial neural networks*, Road Mater. Pave. Des. 22 (12) 2748–2766.
- [14] M.F. Rabbi, D. Mishra (2021). *Using FWD deflection basin parameters for network-level assessment of flexible pavements*, Int. J. Pavement Eng. 22 (2) 147–161.
- [15] B. Xu, S.R. Ranjithan, Y.R. Kim (2002). *New relationships between falling weight deflectometer deflections and asphalt pavement layer condition indicators*, Transp. Res. Rec. 1806 (1) 48–56.
- [16] M. Li, H. Wang (2018). *Prediction of asphalt pavement responses from FWD surface deflections using soft computing methods*, J. Transport. Eng. Part B: Pavements 144 (2) 04018014.
- [17] Y.R. Kim, C. Castorena, Y. Wang, A. Ghanbari, J. Jeong (2018). *Comparing Performance of Full-depth Asphalt Pavements and Aggregate Base Pavements in NC*, North Carolina Department of Transportation, FHWA/NC/2015-02.
- [18] M-MMP-4-07-020/17. 2017. *Determinación de las Deflexiones con Equipo de Impacto en Pavimentos Flexibles*. Secretaria de Infraestructura de Comunicaciones y Transportes. Coyoacán 1895, CD MX.