



PAVANALYZER BETA: PLATAFORMA WEB PARA EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE

Fernando Trejo¹, Carlos Chávez², Jorge Alarcón³

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Morelia, México, 2023174g@umich.mx

² Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Morelia, México, cachavez@umich.mx

³ Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Morelia, México, jorge.alarcon@umich.mx

Resumen

El análisis comparativo del desempeño estructural de diferentes tecnologías de pavimentación es fundamental para mejorar los procesos de diseño y rehabilitación de vialidades. Este trabajo presenta PavAnalyzer Beta, una plataforma web innovadora para el análisis y diseño de pavimentos flexibles. El software está alojado en un servidor, lo que permite su acceso desde cualquier dispositivo con conexión a Internet, incluidos teléfonos móviles.

PavAnalyzer Beta integra métodos de cálculo de ejes equivalentes, considerando tanto el enfoque de la UNAM como el de la AASHTO, e incorpora el análisis de espectros de carga obtenidos a partir de datos de estaciones de pesaje dinámico. Estos datos son procesados mediante técnicas de Machine Learning, lo que permite depurar, clasificar y organizar grandes volúmenes de información en segundos, generando distribuciones de carga por tipo de eje (sencillo, dual, tandem y tridem). Permite el diseño de pavimentos mediante la teoría de Burmister, posibilitando la modelación de estructuras con hasta siete capas y la modificación de leyes de fatiga y deformación permanente para un análisis personalizado.

En este artículo, se presenta una comparativa entre los resultados obtenidos con PavAnalyzer y el software KENLAYER con fines de validación, demostrando que ambos programas generan resultados similares en el análisis estructural de pavimentos. Adicionalmente, se presenta una metodología para la comparación de estructuras de pavimento basada en la evaluación de pruebas de fatiga y módulo dinámico.

La plataforma permite analizar y comparar tanto tecnologías convencionales como mezclas con tecnología de reciclado. Evaluando su desempeño estructural en condiciones equivalentes. La viabilidad de estas soluciones no solo depende de su composición, sino también de su comportamiento mecánico a lo largo del tiempo. A través de esta solución, es posible implementar y optimizar el diseño de pavimentos reciclados, proporcionando un recurso técnico para la evaluación de su desempeño en proyectos reales.

Palabras Clave: Análisis de pavimentos, Ejes equivalentes, Espectros de carga, Machine learning

1 Introducción

El diseño de pavimentos flexibles enfrenta en la actualidad importantes retos técnicos, económicos y ambientales. Por un lado, es indispensable garantizar estructuras durables capaces de resistir el tránsito y las condiciones de sobrecarga que predominan en muchos países de Latinoamérica; por otro, resulta fundamental incorporar tecnologías sustentables como mezclas recicladas, con RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) o con polvo de hule predigerido, que contribuyan a reducir el consumo de materiales vírgenes y el impacto ambiental asociado a la infraestructura vial.

Tradicionalmente, la estimación del daño inducido por el tránsito se ha realizado mediante el concepto de ejes equivalentes (ESALs), simplificando el efecto de los vehículos a un único tipo de carga. Este enfoque, si bien práctico, no siempre refleja la variabilidad real de las cargas ni las diferencias entre configuraciones de ejes (sencillos, duales, tandem o tridem). Ante esta limitación, el análisis de espectros de carga se ha convertido en una herramienta más representativa, ya que permite incorporar directamente los pesos registrados por tipo de eje y proyectar de manera más precisa el daño acumulado.

En este contexto, se desarrolló PavAnalyzer Beta, una plataforma web que integra en un solo entorno accesible los métodos de cálculo de ejes equivalentes de la UNAM y de la AASHTO, espectros de carga, junto con el análisis estructural basado en la teoría multicapa de Burmister. La plataforma permite modelar estructuras de hasta siete capas, incorporar leyes de fatiga y deformación permanente, y estimar la vida útil del pavimento con base en modelos de deterioro ampliamente reconocidos.

El presente trabajo muestra el funcionamiento de PavAnalyzer Beta y su validación frente al software de referencia KENLAYER. Asimismo, se presenta una metodología para la comparación de mezclas asfálticas convencionales y con tecnología de reciclado, basada en parámetros de laboratorio y en la simulación de cargas equivalentes y espectros reales, con el fin de evaluar objetivamente su desempeño estructural bajo condiciones de operación similares.

2 Descripción de PavAnalyzer Beta

PavAnalyzer Beta es una plataforma web desarrollada para el análisis y diseño de pavimentos flexibles, concebida para superar las limitaciones de los programas de escritorio tradicionales. Al estar alojada en un servidor, puede ejecutarse directamente desde un navegador web y accederse desde cualquier dispositivo con conexión a Internet, incluidos teléfonos móviles, lo que facilita su actualización y disponibilidad universal. La herramienta integra en un mismo entorno tres módulos principales.

2.1 Análisis del tránsito

2.1.1 Método UNAM

Basado en la NOM-012-SCT-2-2017, considera factores como sobrecarga, sobrepresión de neumáticos, porcentaje de vehículos cargados, factor direccional y de carril, así como profundidades específicas para el análisis de fatiga y deformación permanente, las cuales pueden ser calculadas con una precisión de 0.1 cm.

2.1.2 Método AASHTO

Adaptado a la normativa mexicana, permite obtener el número total de ejes equivalentes en función del tránsito diario promedio anual (TDPA), la tasa de crecimiento, el periodo de diseño y el nivel de serviciabilidad terminal.

2.1.3 Espectros de carga

Además de los métodos anteriores, PavAnalyzer incorpora el análisis de espectros vehiculares obtenidos a partir de datos de pesaje dinámico. Estos registros son procesados con técnicas de Machine Learning para clasificar y depurar grandes volúmenes de datos, generando distribuciones de carga por tipo de eje (sencillo, dual, tandem y tridem), produce además el espectro de carga con su ajuste log-normal. A partir de los espectros se calculan los Factores de Espectro de Carga (LSF), los ESALs y los ejes equivalentes por configuración, permitiendo reflejar la variabilidad real del tránsito.

2.2 Análisis estructural multicapa

Basado en la teoría de Burmister [1], el módulo permite modelar estructuras de hasta siete capas, definiendo espesores, módulos elásticos y relaciones de Poisson. El usuario puede especificar cargas individuales o múltiples, así como parámetros de integración numérica (número de ciclos, tolerancias) y puntos de evaluación. El sistema calcula los esfuerzos y deformaciones verticales, radiales y tangenciales, además de desplazamientos en distintos niveles de la estructura. Cabe señalar que el código fue desarrollado con la capacidad de resolver estructuras de hasta n capas de pavimento; sin embargo, para fines prácticos en la plataforma web se ha limitado a un máximo de siete capas, al considerarse que este número resulta suficiente para representar con precisión la gran mayoría de estructuras de pavimento en proyectos reales.

2.3 Modelos de deterioro y estimación de vida útil

El software incluye modelos reconocidos como los del Instituto del Asfalto, Shell, Transport and Road Research Laboratory (TRRL) y Belgian Road Research Centre (BRRC). Además de la opción de ingresar modelos personalizados mediante los coeficientes f_1 a f_5 . Con estos se calcula el número de repeticiones admisibles para fatiga (N_f) y deformación permanente (N_d), y se aplica la hipótesis de Miner para proyectar el deterioro acumulado en función del tránsito esperado.

En conjunto, estos módulos convierten a PavAnalyzer en una plataforma integral que combina accesibilidad, rigor técnico y flexibilidad, permitiendo analizar de manera comparativa pavimentos convencionales y con tecnología de reciclado. En la Figura 1 se muestra la página de inicio.



Figura 1. Página de inicio de PavAnalyzer

3 Espectros de carga vehicular

El uso de ejes equivalentes es práctico y común en el diseño de pavimentos, pero reduce todo a un eje estándar de 8.2 t, con un radio de aplicación de 15 cm, sin reflejar la variabilidad de los demás. Para mayor precisión se emplean los espectros de carga de estaciones de pesaje dinámico, aunque su aplicación suele ser limitada por la cantidad de datos y la infraestructura requerida.

El módulo de PavAnalyzer resuelve este reto: limpia registros con Machine Learning, clasifica configuraciones y genera espectros por tipo de eje, además de tablas, parámetros de ajuste, LSF, ESALs, gráficas y estadísticas descriptivas. Con solo cargar un archivo .xlsx o .csv y dar clic en “Generar espectro”, el sistema procesa en segundos millones de datos y entrega un paquete comprimido (.zip) con toda la información lista para el análisis, en la Figura 2 se muestra la página de espectros de carga. Esta metodología se vincula después con la teoría de Burmister, logrando un modelado más realista del tránsito en el diseño estructural.



Figura 2. Página de espectros de carga

4 Metodología para el análisis comparativo

La metodología integra la caracterización del tránsito (vía ejes equivalentes o vía espectros de carga), el análisis multicapa de Burmister y la acumulación de daño según la ley de Miner, con el fin de estimar la vida útil y comparar tecnologías de mezcla.

4.1 Ruta A: Cálculo con ejes equivalentes

En el enfoque convencional, eje equivalente se determinan directamente utilizando el método de la UNAM [2].

Con esta información, el programa estima el número total de ejes equivalentes, tanto para el criterio de fatiga (deformación por tensión debajo de la carpeta asfáltica) como para el de deformación permanente (deformación por compresión en la subrasante). Esta ruta es directa y aprovecha la disponibilidad de aforos vehiculares tradicionales, que suelen contar con registros de varios años.

Una vez determinados los ejes equivalentes de proyecto, se incorpora la carga correspondiente al eje estándar de 8.2 toneladas, la cual se transforma en presión (kPa) y se asigna con un radio de aplicación sobre el pavimento (generalmente 15 cm). A partir de esta carga se calcula la deformación por tensión ε_t en la base de la carpeta asfáltica, asociada al criterio de fatiga, conforme a la ecuación 1. Además, se calcula la deformación por compresión ε_z en la parte superior de la subrasante, asociada al criterio de deformación permanente, según la ecuación 2.

Con estas deformaciones se aplican las ecuaciones clásicas:

$$Nf = f_1 * \varepsilon_t^{-f_2} * E_{AC}^{-f_3} \quad (1)$$

Donde, Nf es el número de repeticiones admisibles, ε_t es la deformación unitaria por tensión debajo de la carpeta asfáltica, E_{AC} es el módulo de la carpeta asfáltica en kPa, f_1, f_2, f_3 son los coeficientes determinados en laboratorio por ensayos de fatiga.

$$Nd = f_4 * \varepsilon_z^{-f_5} \quad (2)$$

Dónde, Nd es el número de repeticiones admisibles para prevenir la deformación permanente, ε_z es la deformación unitaria por compresión arriba de la capa de la subrasante, f_4, f_5 son los coeficientes determinados mediante observación en campo [3]. Finalmente, se aplica la ley de Miner para acumular el daño:

$$D_r = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad (3)$$

Donde D_r es la relación de daño (daño acumulado) al final del año r ; n_{ij} es el número de repeticiones de aplicación de carga para la carga j en el periodo i ; N_{ij} es el número de repeticiones admisibles de carga, deducidos de los modelos de deterioro; p es el número de periodos y m es el número de grupos de carga.

La falla se alcanza cuando $D_r \geq 1$. La vida de diseño es igual a $1/D_r$, se evalúa tanto para la fatiga como para la deformación permanente, y la que resulte en una vida útil más corta es la que controla el diseño [4]. Este procedimiento se aplica a dos estructuras de pavimento que difieren únicamente en su mezcla asfáltica: una convencional y otra reciclada con RAP u otra tecnología de reciclado. La diferencia radica en los valores del módulo dinámico y en la ley de fatiga propia de cada mezcla. De esta manera, se determina cuál

tecnología proporciona mayor vida estructural bajo las mismas condiciones de tránsito, permitiendo una evaluación objetiva del desempeño de las mezclas recicladas frente a las convencionales.

4.2 Ruta B: cálculo con espectros de carga

A diferencia del cálculo convencional de ejes equivalentes, que resume todo el tránsito en un único eje estándar de 8.2 toneladas, el análisis con espectros de carga permite diferenciar el efecto de cada configuración de eje (sencillo, sencillo dual, tandem y tridem). Para ello se emplean registros de pesaje dinámico, que aportan miles de datos de vehículos en condiciones reales.

El desarrollo de este enfoque se remonta a la Prueba de Carreteras AASHO, donde se observó que el impacto de cada eje sobre el pavimento flexible podía estimarse con la llamada ley de la cuarta potencia [5], la cual establece que el daño en el pavimento aumenta de manera exponencial conforme se incrementa la carga por eje. Esta relación se conoce como Factor de Equivalencia de Carga (LEF) que se muestra en la ecuación 4 y constituye la base del análisis:

$$LEF = \left(\frac{X_r}{L_s} \right)^m \quad (4)$$

Donde X_r es la carga del eje en cuestión, L_s es la carga del eje estándar (sencillo = 8.2 toneladas, tandem = 15 toneladas y tridem = 23 toneladas [6]) con el mismo número de ejes que X_r , m es la potencia a la que se eleva el daño relativo (comúnmente es 4, aunque en PavAnalyzer puede modificarse, al igual que las cargas L_s para cada uno de los ejes).

Cuando se trabaja con grandes volúmenes de datos, las cargas se agrupan en intervalos para calcular el Factor de Espectro de Carga (LSF), que representa el daño promedio relativo de un tipo de eje, como se denota en la ecuación 5:

$$LSF = \sum_{r=1}^R \left(\frac{X_r}{L_s} \right)^m q_r \quad (5)$$

En donde R es el número total de intervalos de carga y q_r es la frecuencia normalizada de carga o el ancho de clase. Si se multiplica LSF por el número de ejes de la carga dada se obtienen los ESALs, como se ve en la ecuación 6.

$$ESALs = N \sum_{r=1}^R \left(\frac{X_r}{L_s} \right)^m q_r \quad (6)$$

Donde N es el número total de ejes. Adicionalmente, si se desea determinar el crecimiento del tránsito a lo largo del periodo de diseño, puede utilizarse la formulación propuesta por la UNAM [7] para el coeficiente de acumulación del tránsito C_T , expresada como:

$$C_T = \left[\frac{(1+r)^n - 1}{r} \right] 365 \quad (7)$$

Donde C_T es el coeficiente de acumulación del tránsito, n son los años de servicio, r es la tasa de crecimiento anual.

Mediante la ecuación 8 podemos obtener los ejes equivalentes por tipo de eje, considerando los cuatro tipos de ejes que representan de manera más precisa la geometría y la carga.

$$\Sigma L = ESALS * TDPA * C_T \quad (8)$$

Donde ΣL es el número total de ejes equivalentes acumulados en el periodo de diseño debido al tipo de eje y TDPA es el Tránsito Diario Promedio Anual en el carril de proyecto. Con los ejes equivalentes determinados para cada configuración, el siguiente paso consiste en aplicar las cargas al pavimento definiendo su magnitud y radio de aplicación. A diferencia del método convencional, se consideran los cuatro tipos de ejes (sencillo, sencillo dual, tandem y tridem), cada uno con su correspondiente número de repeticiones y su carga representativa.

PavAnalyzer permite colocar múltiples cargas simultáneamente en distintas coordenadas, siguiendo el principio de superposición. Para efectos de análisis estructural, cada carga se evalúa por separado en cuanto a sus deformaciones, obteniendo en cada caso:

- La deformación por tensión (ϵ_t) en la base de la carpeta asfáltica (criterio de fatiga).
- La deformación por compresión (ϵ_z) en la parte superior de la subrasante (criterio de deformación permanente).

Una vez conocidas las deformaciones para cada eje, se calculan las repeticiones admisibles aplicando las leyes correspondientes de fatiga y deformación permanente. Posteriormente, el daño acumulado se evalúa con la ley de Miner, considerando ahora cuatro términos (uno por cada configuración de eje). En este caso, cada fracción n/N representa la proporción de vida consumida por un tipo de eje: si existiera únicamente un tipo de eje, la falla ocurriría cuando $n/N \geq 1$. Sin embargo, en una vialidad circula una mezcla de ejes (sencillo, sencillo dual, tandem y tridem), por lo que cada uno aporta una fracción de daño y la combinación de todas estas fracciones determina la vida útil de la estructura. De esta manera, la condición de falla estructural se alcanza cuando la suma de las contribuciones de los cuatro tipos de eje es mayor o igual a la unidad, como se expresa en la ecuación 9:

$$D_r = \sum_{i=1}^p \frac{n_{sencillo,i}}{N_{sencillo,i}} + \frac{n_{dual,i}}{N_{dual,i}} + \frac{n_{tandem,i}}{N_{tandem,i}} + \frac{n_{tridem,i}}{N_{tridem,i}} \quad (9)$$

Donde $n_{sencillo,i}$, $n_{dual,i}$, $n_{tandem,i}$, $n_{tridem,i}$ son el número de repeticiones proyectadas para el periodo i de los ejes sencillo, sencillo dual, tandem y tridem respectivamente. $N_{sencillo,i}$, $N_{dual,i}$, $N_{tandem,i}$, $N_{tridem,i}$ son las repeticiones admisibles (a fatiga o a deformación permanente) por cada tipo de eje en el periodo i , obtenidas a partir de las deformaciones críticas y las leyes de deterioro.

De esta forma, el pavimento se evalúa considerando explícitamente la contribución independiente de cada tipo de eje, reflejando con mayor realismo la geometría de aplicación de las cargas y la variabilidad del tránsito pesado.

4.3 Integración con PavAnalyzer

En la práctica, este procedimiento sería complejo por la gran cantidad de datos. Sin embargo, PavAnalyzer lo automatiza: limpia los registros de pesaje, clasifica las configuraciones vehiculares con Machine Learning, construye los espectros y entrega directamente los valores de LSF y ESALs por tipo de eje, junto con los archivos y gráficas correspondientes.

La metodología presentada no transforma todo el tránsito en un único eje estándar, sino que integra los espectros de carga con la teoría multicapa de Burmister. De este modo que cada tipo de eje se modela de forma independiente, permitiendo obtener el análisis estructural para cada eje.

De esta manera, se obtiene la vida útil estructural considerando explícitamente el efecto diferenciado de cada configuración de eje. Este procedimiento representa la integración en este trabajo: unir el análisis

detallado de los espectros de carga con el modelo estructural de Burmister, permitiendo proyectar de forma más precisa el deterioro del pavimento bajo condiciones de tránsito real.

5 Ejemplo de aplicación: comparación entre mezcla convencional y mezcla con tecnología de reciclado

Se comparan dos estructuras de pavimento con igual configuración de capas, diferenciándose únicamente en las propiedades mecánicas de la carpeta asfáltica: una con mezcla convencional y otra con una tecnología de reciclado (polvo de hule predigerido). El objetivo es analizar su desempeño estructural bajo las mismas condiciones de carga. Las características de cada estructura se presentan en las Tablas 1 y Tabla 2, mientras que los coeficientes utilizados para los modelos de fatiga y deformación permanente se muestran en la Tabla 3. La carga a la cual se evaluó fue a un eje equivalente de 8.2 toneladas, el cual ejerce un esfuerzo de contacto de $5.8 \frac{kg}{cm^2}$ (568.78 kPa) en un radio de aplicación de 15 cm.

Las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, tales como los módulos y las leyes de fatiga, fueron proporcionadas por la empresa Neotech Asphalt. En este caso la mezcla con tecnología de reciclado corresponde a una mezcla aditivada con polvo de hule predigerido. Para el análisis de deformación permanente, se utilizó la formulación desarrollada por el Instituto del Asfalto [8] como referencia técnica.

Tabla 1. Características del pavimento convencional

Capa	Espesor (cm)	Módulo (kPa)	Poisson
Mezcla asfáltica convencional	15	8,098,000	0.30
Base	30	385,000	0.35
Subbase	30	200,000	0.35
Subrasante	Semi infinita	70,000	0.40

Tabla 2. Características del pavimento con tecnología de reciclado

Capa	Espesor (cm)	Módulo (kPa)	Poisson
Mezcla asfáltica reciclada	15	10,099,000	0.30
Base	30	385,000	0.35
Subbase	30	200,000	0.35
Subrasante	Semi infinita	70,000	0.40

Tabla 3. Constantes para fatiga y deformación permanente para ambos pavimentos

Tecnología	f1	f2	f3	f4	f5
Convencional	8.466×10^{-9}	3.649	0.0	1.365×10^{-9}	4.477
Reciclada	4.495×10^{-23}	7.143	0.0	1.365×10^{-9}	4.477

El programa genera una tabla con los esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z, así como el desplazamiento vertical w, como se muestra en la Figura 3. El usuario puede definir el intervalo de cálculo, por ejemplo, cada centímetro, y exportar los resultados a Excel mediante el botón correspondiente. Si se activa el modelo de deterioro, es necesario indicar la capa donde se calculará la vida a fatiga (en su límite inferior) y la capa para la vida a deformación permanente (en su parte superior).

Z (cm)	σ_z (kPa)	σ_x (kPa)	σ_y (kPa)	τ_{xz} (kPa)	w (cm)	ϵ_x (microstrain)	ϵ_y (microstrain)	ϵ_z (microstrain)	ϵ_t (microstrain)
0	568.78	1.443.45	1.443.45	0.0	0.03	103.7025	103.7025	-36.7118	103.7025
5	470.94	512.97	512.97	0.0	0.03	26.8955	26.8955	20.1475	26.8955
10	256.22	-243.01	-243.01	0.0	0.0299	-30.4977	-30.4977	49.6447	-30.4977
15	113.90	-1.073.25	-1.073.25	0.0	0.0295	-96.9928	-96.9928	93.5854	-96.9928
20	88.97	-2.42	-2.42	0.0	0.0282	-84.9712	-84.9712	235.4899	-84.9712
25	69.72	-7.22	-7.22	0.0	0.0271	-75.5754	-75.5754	194.2216	-75.5754
30	54.83	-11.65	-11.65	0.0	0.0263	-69.5252	-69.5252	163.6148	-69.5252
35	43.25	-16.36	-16.36	0.0	0.0255	-66.9416	-66.9416	142.0875	-66.9416
40	34.36	-21.87	-21.87	0.0	0.0248	-68.1600	-68.1600	129.0037	-68.1600
45	27.97	-28.81	-28.81	0.0	0.0242	-74.0663	-74.0663	125.0358	-74.0663
50	23.40	-8.21	-8.21	0.0	0.0234	-67.6334	-67.6334	145.7293	-67.6334
55	19.66	-8.94	-8.94	0.0	0.0227	-63.4695	-63.4695	129.5914	-63.4695
60	16.60	-9.95	-9.95	0.0	0.0221	-61.3987	-61.3987	117.8387	-61.3987
65	14.14	-11.28	-11.28	0.0	0.0215	-61.4232	-61.4232	110.2048	-61.4232
70	12.25	-13.01	-13.01	0.0	0.0210	-63.7234	-63.7234	106.7879	-63.7234
75	10.95	-15.24	-15.24	0.0	0.0205	-68.6850	-68.6850	108.0816	-68.6850

Tipo de análisis	Profundidad	Repeticiones de carga soportada	ϵ_t (microstrain)	ϵ_z (microstrain)
Fatiga	15.0	3753817	-96.99284	-
Deformación permanente	75.0	118790121	-	164.54887

Exportar a Excel

Figura 3. Resultados de la respuesta esfuerzo deformación de la estructura de pavimento con mezcla asfáltica convencional

A partir del cálculo de vida a fatiga, se observó que, bajo las mismas condiciones de espesor y carga, la mezcla reciclada es capaz de soportar 1,554,152 ejes equivalentes adicionales, como se muestra en la Tabla 4. Este resultado permite adoptar dos enfoques de optimización estructural:

1. Mantener el espesor de la carpeta asfáltica reciclada para obtener una vida útil superior a la proyectada (enfoque conservador).
2. Reducir el espesor de la mezcla reciclada hasta igualar la vida estructural de la mezcla convencional, lo que representaría un ahorro en materiales y costos. En este caso, el espesor podría disminuirse en 0.6 cm sin comprometer el desempeño esperado.

Tabla 4. Vida a fatiga y a deformación permanente de ambas estructuras de pavimento

Tecnología	Nf	Nd
Convencional	3,753,817	118,790,121
Reciclada	5,307,969	149,721,449

Esta flexibilidad en la interpretación de resultados facilita la toma de decisiones fundamentadas en criterios de desempeño estructural, alineados con objetivos técnicos, económicos y de sostenibilidad. Además, permite evaluar distintas propuestas de solución para una misma vialidad, mediante la variación

de espesores y el análisis comparativo de su desempeño. Este enfoque se ejemplifica en la Figura 4, donde se presenta un análisis de vida a fatiga para ambas tecnologías en función del espesor de la carpeta. Este tipo de representación gráfica apoya la realización de análisis de sensibilidad, permitiendo identificar los rangos óptimos de diseño y cuantificar el impacto de los cambios estructurales sobre la durabilidad del pavimento.

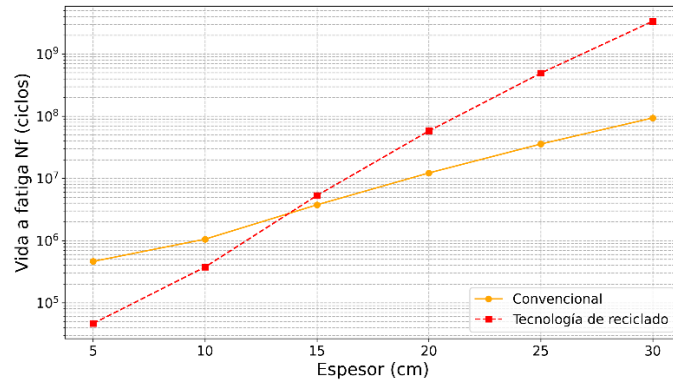


Figura 4. Comparación de vida a fatiga entre mezcla asfáltica convencional y con tecnología de reciclado

Contar con la respuesta esfuerzo-deformación de ambos pavimentos permite realizar representaciones gráficas que facilitan la interpretación del comportamiento estructural. Por ejemplo, en la Figura 5 se muestra la distribución de esfuerzos, en la Figura 6 se presenta la distribución de deformaciones, y en la Figura 7, las deformaciones en el eje z. Estas gráficas permiten realizar observaciones clave y extraer conclusiones relevantes sobre el desempeño comparativo de las tecnologías evaluadas.

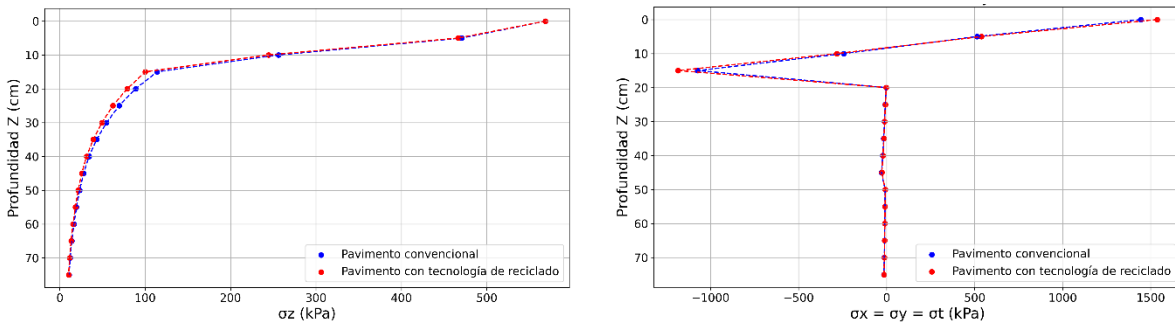


Figura 5. Distribución de esfuerzos verticales y horizontales en pavimentos convencionales y reciclados en función de la profundidad

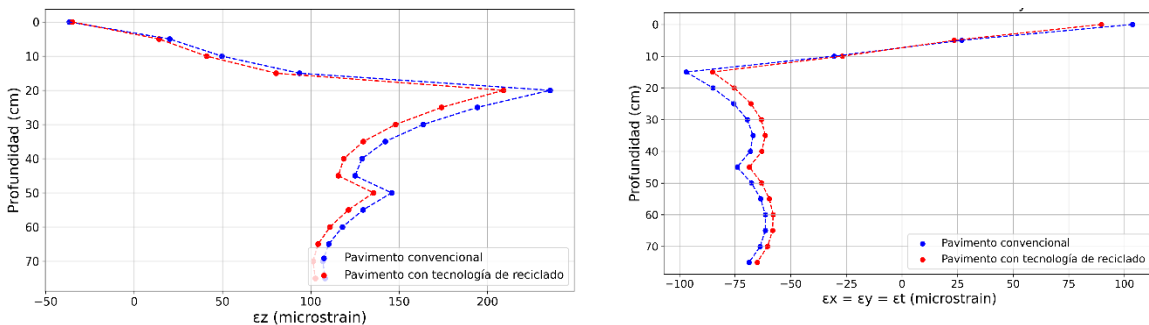


Figura 6. Distribución de deformaciones verticales y horizontales en pavimentos convencional y reciclado en función de la profundidad

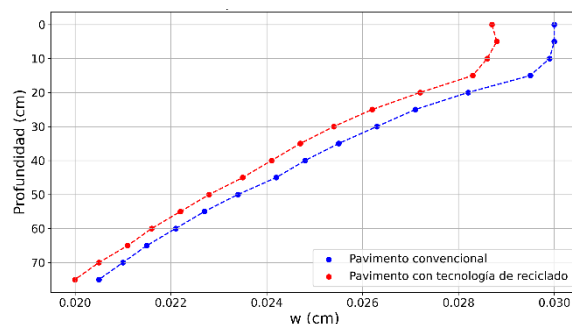


Figura 7. Distribución de deformaciones horizontales en pavimentos convencional y reciclado

6 Validación

Para validar los resultados generados por el programa PavAnalyzer, se emplearon los datos de la Tabla 1. Se compararon los resultados obtenidos con los del software de referencia KENLAYER, considerando: esfuerzos verticales, esfuerzos laterales, deformaciones verticales, deformaciones horizontales y desplazamientos verticales.

Durante la validación se observó que las diferencias más notables ocurrieron en la superficie ($z = 0$). Esta discrepancia podría estar relacionada con la forma en que Kenlayer trata el cálculo en dicho punto, ya que es probable que aplique una condicional de programación. Dado que estos resultados se obtienen mediante integración numérica, es posible que el punto $z = 0$ sea especialmente sensible a los parámetros de integración.

Para una comparación más precisa, se recalcularon los resultados en KENLAYER a una profundidad muy cercana ($z = 0.01$ cm), observándose que los valores se acercan notablemente a los arrojados por PavAnalyzer, lo cual sugiere una alta concordancia entre ambos modelos numéricos.

En el resto de las profundidades evaluadas, los resultados muestran una coincidencia muy cercana entre ambos programas, con desviaciones mínimas que pueden atribuirse a diferencias en el método de integración o en el redondeo de resultados. Esto se evidencia en las Figuras 8, 9 y 10, donde las curvas prácticamente se superponen en todos los parámetros analizados.

Cabe destacar que, al igual que KENLAYER, el programa PavAnalyzer permite al usuario ajustar los parámetros numéricos del análisis, incluyendo el número de ciclos de integración, así como la tolerancia absoluta y relativa. Esto otorga flexibilidad para controlar la precisión de los resultados y adaptar el modelo a las condiciones particulares de cada estructura o estudio.

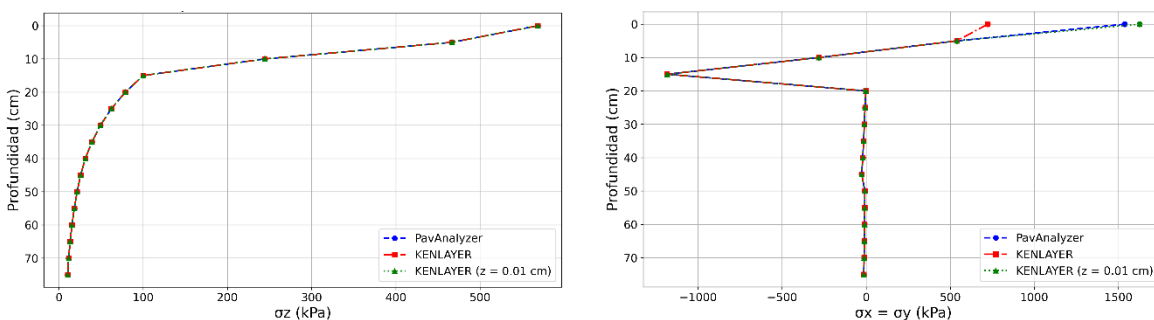


Figura 8. Validación de esfuerzos: PavAnalyzer vs KENLAYER

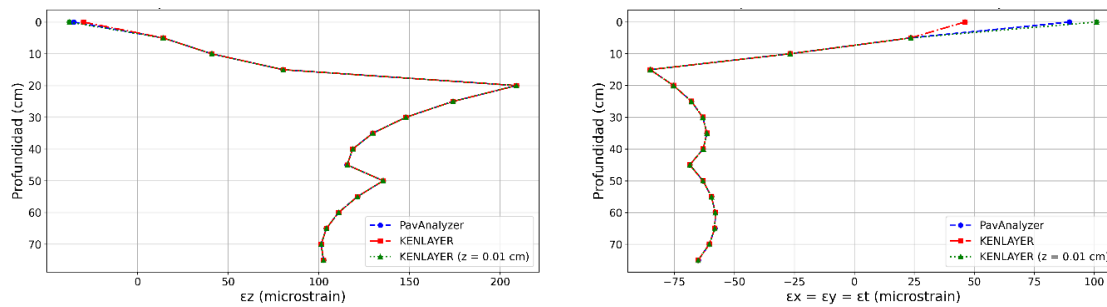


Figura 9. Validación de deformaciones: PavAnalyzer vs KENLAYER

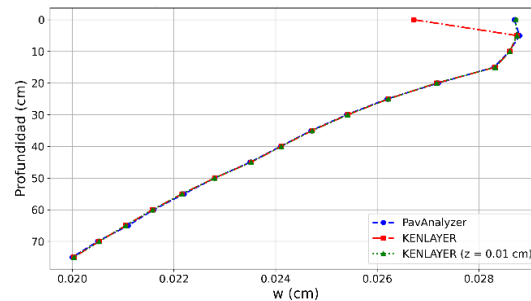


Figura 10. Validación de desplazamientos verticales: PavAnalyzer vs KENLAYER

7 Conclusiones

PavAnalyzer Beta integra en una sola plataforma el cálculo con ejes equivalentes, espectros de carga y la teoría multicapa de Burmister, reduciendo a segundos procesos que antes requerían horas.

El uso de espectros de carga procesados con Machine Learning permite modelar de manera independiente los distintos tipos de eje y obtener una proyección más realista de la vida útil del pavimento.

La comparación entre mezclas convencionales y recicladas mostró que la herramienta es capaz de evaluar objetivamente tecnologías de pavimentación, considerando módulo dinámico y leyes de fatiga.

Los resultados de PavAnalyzer son consistentes con KENLAYER, confirmando la confiabilidad del modelo implementado.

El análisis de fatiga mostró que la mezcla con tecnología de reciclado soporta 1,554,152 ejes equivalentes adicionales, lo que permite ya sea aumentar su vida útil o reducir 0.6 cm de espesor con ahorro de materiales.

8 Referencias

- [1] Burmister, D. M. (1944). The general theory of stresses and displacements in layered systems. Columbia University, New York.
- [2] Universidad Nacional Autónoma de México (1981). Instructivo para diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- [3] Huang, (2004). Pavement Analysis and design (2da ed.). EUA.
- [4] Huang, (2004). Pavement Analysis and design (2da ed.). EUA.
- [5] AASHTO (1993). Guide for design of pavement structures. Washington D.C., EUA.
- [6] IMT (2021). Caracterización de espectros de carga en la red carretera mexicana. Querétaro, México.
- [7] Universidad Nacional Autónoma de México (1981). Instructivo para diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- [8] Asphalt Institute. (2007). Thickness Design: Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads (2ª ed.). Lexington, KY.