



PAVANALYZER BETA: SOFTWARE WEB PARA EL DISEÑO Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE PAVIMENTOS RECICLADOS Y CONVENCIONALES

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 reciclado de pavimentos asfálticos es una estrategia clave para reducir el impacto ambiental de la infraestructura vial. Sin embargo, para que estas tecnologías sean viables, es fundamental evaluar su durabilidad y desempeño estructural. Este trabajo presenta PavAnalyzer Beta, una plataforma web innovadora para el análisis y diseño de pavimentos, eliminando las limitaciones de los programas de escritorio tradicionales.

El software está alojado en un servidor, permitiendo su acceso desde cualquier dispositivo con conexión a Internet, incluyendo teléfonos móviles. Esto facilita la actualización continua sin necesidad de descargas o instalaciones adicionales. PavAnalyzer Beta integra métodos de cálculo de ejes equivalentes, considerando tanto el enfoque de la UNAM como el de la AASHTO. Asimismo, incorpora el diseño de pavimentos mediante la teoría multicapa de Burmister, permitiendo 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 Beta y el software KENLAYER para su validación, mostrando que ambos programas generan resultados similares en el análisis estructural de pavimentos flexibles. Además, se propone una metodología para comparar estructuras de pavimento, basada en la evaluación de pruebas de fatiga y módulo dinámico. Esta metodología no es exclusiva para pavimentos reciclados, pero permitirá analizar su desempeño frente a estructuras convencionales y proporcionar un criterio técnico para su implementación.

La viabilidad ambiental de estos métodos no solo depende de la reducción en el uso de materiales vírgenes, sino también de su desempeño estructural a lo largo del tiempo. Con esta solución, es posible implementar y optimizar el diseño de pavimentos reciclados, con el fin de fomentar su adopción en la industria, promoviendo así una infraestructura vial más sustentable y eficiente.

Palabras Clave: Análisis de pavimentos, Reciclado, Desempeño estructural, Impacto ambiental

1 Introducción

El diseño de pavimentos flexibles en México enfrenta retos técnicos y ambientales importantes. Por un lado, es indispensable garantizar estructuras durables capaces de resistir las solicitaciones inducidas por el tránsito; por otro, se requiere incorporar materiales reciclados o tecnologías verdes que reduzcan el impacto ambiental de la infraestructura vial. En este contexto, surge la necesidad de contar con herramientas digitales que permitan evaluar de forma exacta y comparativa el comportamiento estructural de diversas alternativas tecnológicas, mediante modelos matemáticos de gran exactitud como la teoría multicapa de Burmister.



PavAnalyzer es una plataforma web diseñada para responder a las nuevas exigencias en el análisis estructural de pavimentos. A diferencia de los programas tradicionales que requieren instalación en equipos específicos, este software opera directamente desde el navegador, por lo que es compatible con cualquier dispositivo que tenga conexión a internet. La página es totalmente responsiva, lo que garantiza una visualización óptima desde celulares, tabletas o computadoras.

La herramienta puede calcular ejes equivalentes, esfuerzos y deformaciones en estructuras de cualquier número de capas. Sin embargo, en la versión web se ha limitado el modelado a un máximo de siete capas, al considerarse suficiente para la mayoría de los casos prácticos. Basada en la teoría multicapa de Burmister, PavAnalyzer permite ajustar parámetros del análisis numérico para mejorar la precisión, aplicar modelos de fatiga y deformación permanente, y evaluar la vida estructural del pavimento bajo distintas condiciones de carga.

Adicionalmente, PavAnalyzer permite analizar el tránsito mediante el cálculo de ejes equivalentes a través de dos enfoques: el método de la UNAM, que considera la NOM-012-SCT-2017 y permite calcular los daños inducidos por tránsito a cualquier profundidad z , además de incluir factores como sobrecarga y sobrepresión de neumáticos; y el método de la AASHTO, que también se ha adaptado a la normativa mexicana vigente para reflejar condiciones de operación del autotransporte en México.

Como parte de la validación del módulo estructural, se realizó una comparativa entre los resultados obtenidos con PavAnalyzer y el software KENLAYER, observándose una alta concordancia en los esfuerzos y deformaciones calculados para estructuras multicapa bajo cargas circulares. Esto respalda la precisión de la implementación basada en la teoría de Burmister.

El presente trabajo expone la metodología implementada en PavAnalyzer para comparar el desempeño de mezclas asfálticas convencionales frente a tecnologías recicladas, basándose en parámetros de laboratorio conforme al protocolo AMAAC nivel IV.

2 Presentación de la plataforma web

PavAnalyzer es una plataforma web con diseño moderno y compatible con cualquier dispositivo conectado a Internet. Su interfaz es clara, fácil de usar y permite realizar análisis estructurales completos sin necesidad de instalar ningún programa.

2.1 Página principal

La página de inicio muestra las principales características de PavAnalyzer: eficacia, practicidad y facilidad de uso. También ofrece acceso a artículos técnicos que sirven como referencia para conocer el desarrollo de la herramienta, como se muestra en la Figura 1. En la parte superior se encuentra la barra de navegación, que agrupa las distintas secciones disponibles dentro de la plataforma.

La sección de Cálculos permite acceder a los diferentes módulos de análisis estructural que ofrece PavAnalyzer, incluyendo el método de ejes equivalentes UNAM, el método AASHTO, y la teoría de Burmister, que al desplegarse permite seleccionar estructuras de dos hasta siete capas. También se incluye una opción para el análisis de espectros de carga, actualmente en desarrollo.

Otras secciones disponibles son Creadores, donde se muestra información sobre las personas que desarrollaron el programa; Blog, que contiene artículos técnicos, validaciones, ejemplos de uso y novedades del sistema; y finalmente, Contacto, una sección destinada a que el usuario pueda enviar sugerencias, comentarios u observaciones, con el objetivo de mejorar continuamente la plataforma en función de la experiencia del usuario.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

PAVIMENTANDO
EL CAMINO
HACIA UN
FUTURO
SOSTENIBLE



Figura 1. Página de inicio

2.2 Sección de ejes equivalentes UNAM

El módulo de ejes equivalentes bajo el método UNAM permite estimar el número total de ejes que circularán durante el periodo de diseño, considerando las condiciones reales del tránsito. Este módulo, basado en la NOM-012-SCT-2-2017, solicita al usuario el ingreso de diversos parámetros clave, como



el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), la tasa de crecimiento anual, el porcentaje de vehículos cargados, el factor de utilización de carril, el periodo del proyecto, el tipo de camino, así como los porcentajes de sobrecarga y sobrepresión de neumáticos. Además, se permite definir las profundidades de evaluación para los análisis de fatiga y deformación permanente, a cualquier profundidad con resolución milimétrica.

También se incluye la sección Composición del tránsito, donde se introduce el porcentaje de participación de cada tipo de vehículo.

Una vez completados los campos, el usuario puede calcular el total de ejes equivalentes a cualquier valor de z como se muestra en la Figura 2.

2.3 Sección de ejes equivalentes AASHTO

El módulo AASHTO permite calcular los ejes equivalentes, siguiendo lineamientos adaptados a la normativa mexicana. Para ello, el usuario debe ingresar parámetros relacionados con el tránsito, como el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), la tasa de crecimiento anual, el periodo de proyecto, el porcentaje de vehículos cargados, el factor de utilización de carril, el tipo de camino, el nivel de serviciabilidad terminal y si desea el usuario puede añadir un porcentaje de sobrecarga. Asimismo, el sistema solicita la composición del tránsito, clasificando los vehículos en categorías tipo A, B, C, T-S y T-S-R, con sus respectivas subconfiguraciones, tal como se observa en la Figura 2. Una vez procesados los datos, se obtiene el número total de ejes para el periodo de diseño definido.

The image displays two side-by-side screenshots of the PAVANALYZER software interface, showing the calculation of equivalent axes for the UNAM and AASHTO methods.

Top Section (Navigation Bar): Both screenshots show a dark header with the PAVANALYZER logo and navigation links: Cálculos, Creadores, Blog, and Contacto.

Left Screenshot (Cálculo de ejes equivalentes UNAM):

- Datos de Tránsito:** A form titled "Ingrese los siguientes datos" with input fields for: Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), Periodo de proyecto (Años), Tasa de Crecimiento Anual (%), Porcentaje de vehículos cargados (%), Factor de utilización de carril (%), Factor de sobrecarga (%), Tipo de camino (Tipo A), and Nivel de serviciabilidad terminal (%).
- Composición del Tránsito:** A form titled "Introduzca el porcentaje de cada tipo de vehículo" with input fields for percentages of various vehicle types: Vehículos tipo A, B2, B3, B4, C2, C2-R2, C2-R3, C2-R4, C3, C3-R2, C3-R3, T2-S1, T2-S2, T2-S3, T2-S1-R2, T2-S2-R2, T2-S3-R2, T2-S1-R3, T2-S2-R3, T2-S3-R3, T2-S2-R4, T2-S3-R4, T2-S2-S2, T2-S3-S2, T3-S1, T3-S2, T3-S3, T3-S1-R2, T3-S2-R2, T3-S3-R2, T3-S2-R3, T3-S3-R3, T3-S2-R4, T3-S3-R4, T3-S2-S2, T3-S3-S2, and T3-S3-S3.
- Footer:** "Todos los derechos Reservados 2025".

Right Screenshot (Cálculo de ejes equivalentes AASHTO):

- Datos de Tránsito:** A form titled "Ingrese los siguientes datos" with input fields for: Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), Periodo de proyecto (Años), Tasa de Crecimiento Anual (%), Porcentaje de vehículos cargados (%), Factor de utilización de carril (%), Factor de sobrecarga (%), Tipo de camino (Tipo), and Nivel de serviciabilidad terminal (%).
- Composición del Tránsito:** A form titled "Introduzca el porcentaje de cada tipo de vehículo" with input fields for percentages of various vehicle types: Vehículos tipo A, B2, B3, B4, C2, C2-R2, C2-R3, C2-R4, C3, C3-R2, C3-R3, T2-S1, T2-S2, T2-S3, T2-S1-R2, T2-S2-R2, T2-S3-R2, T2-S1-R3, T2-S2-R3, T2-S3-R3, T2-S2-R4, T2-S3-R4, T2-S2-S2, T2-S3-S2, T3-S1, T3-S2, T3-S3, T3-S1-R2, T3-S2-R2, T3-S3-R2, T3-S2-R3, T3-S3-R3, T3-S2-R4, T3-S3-R4, T3-S2-S2, T3-S3-S2, and T3-S3-S3.
- Footer:** "Todos los derechos Reservados 2025".

Figura 2. Página de cálculo de ejes equivalentes por el método de la UNAM
y página de cálculo de ejes equivalentes por el método de la AASHTO



2.4 Sección análisis de pavimentos por la teoría de Burmister

El módulo basado en la teoría de Burmister permite calcular esfuerzos y deformaciones en estructuras multicapa sometidas a cargas circulares. El usuario puede seleccionar entre configuraciones de 2 a 7 capas, definiendo tanto los datos de carga como los parámetros del pavimento. En cuanto a la carga, se debe ingresar la magnitud (q en kPa), el radio de aplicación (a en cm) y las coordenadas X , Y del centro de carga. Además, es posible agregar hasta cinco cargas simultáneas, lo que permite modelar configuraciones más complejas como múltiples ruedas o ejes. Para cada capa del pavimento, se especifican el tipo de material, el espesor, el módulo y la relación de Poisson; la última capa, correspondiente a la subrasante, se considera semi infinita y no requiere espesor definido. Finalmente, el usuario puede ajustar los parámetros de análisis numérico, incluyendo el número de ciclos de integración, la tolerancia absoluta y relativa, las coordenadas X , Y de evaluación y el intervalo de cálculo, es decir, cada cuántos centímetros se desea obtener resultados de acuerdo a lo mostrado en la Figura 3.

Figura 3. Página de análisis de pavimentos



2.5 Modelo de deterioro

El usuario puede activar el cálculo de vida estructural por fatiga y deformación permanente. PavAnalyzer ofrece varios modelos predefinidos (Instituto del Asfalto, Shell, TRRL, BRRC) o la opción de ingresar un modelo personalizado definiendo las constantes de la f_1 a f_5 .

Este módulo permite calcular con precisión los puntos críticos del pavimento y obtener los valores de vida a fatiga (Nf) según la Ecuación 1 y vida a deformación permanente (Nd) por la Ecuación 2 según la configuración de carga y materiales seleccionados.

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

Dónde, 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 [1].

3 Metodología para la Comparación de Mezclas Asfálticas

La plataforma permite realizar comparaciones estructurales entre mezclas asfálticas convencionales y tecnologías recicladas mediante un flujo de trabajo que parte del ingreso de propiedades mecánicas y parámetros de carga representativos. Para cada mezcla se modela la estructura del pavimento, definiendo el número de capas, sus módulos, espesores y coeficientes de Poisson, así como las condiciones de carga, incluyendo magnitud, radio y ubicación.

Una vez ingresados estos datos, se activa el modelo de deterioro y se introducen los coeficientes específicos de fatiga y deformación permanente obtenidos en laboratorio. El sistema calcula los valores de vida a fatiga (Nf) y vida a deformación permanente (Nd), y a partir de ellos, estima la vida útil estructural con base en el número anual de cargas proyectadas.

El diseño final consiste en la utilización de la hipótesis de Miner a través de la Ecuación 3, comparando el número de repeticiones esperadas de tránsito durante el periodo de diseño del pavimento con el número de repeticiones permisibles en la carpeta asfáltica y en las capas granulares derivados de los modelos de deterioro [2].

$$D = \sum \frac{n}{N} \quad (3)$$

Donde D es el daño acumulado, n es el número de repeticiones de aplicación de carga y N es el número de repeticiones admisibles deducidos de los modelos de deterioro.

La comparación entre tecnologías puede abordarse de dos maneras: manteniendo un espesor constante para evaluar cuál mezcla proporciona una mayor vida útil estructural —es decir, cuál resiste un mayor número de repeticiones de carga, o bien, estableciendo un periodo de diseño fijo y ajustando el espesor de cada mezcla hasta que ambas alcancen un desempeño equivalente. Este enfoque permite identificar, de forma objetiva y técnica, las soluciones más eficientes. En particular, brinda un sustento cuantitativo para justificar el uso de tecnologías recicladas o ecológicas, siempre garantizando que no se comprometa la durabilidad estructural del pavimento.

4 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 la Tabla 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 evaluaron fue a un eje equivalente el cual ejerce un esfuerzo de contacto de $5.8 \frac{kg}{cm^2}$ (568.78 kPa) con 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 [3] 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 4. 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	1443.45	1443.45	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	113.9	-1073.25	-1073.25	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	-60.9416	-60.9416	142.0875	-60.9416
40	34.36	-21.87	-21.87	0.0	0.0248	-68.16	-68.16	129.0037	-68.16
45	27.97	-28.81	-28.81	0.0	0.0242	-74.0663	-74.0663	125.0358	-74.0663
50	23.4	-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	16.6	-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	0.021	-63.7234	-63.7234	106.7679	-63.7234
75	10.95	-15.24	-15.24	0.0	0.0205	-68.685	-68.685	108.0816	-68.685

Tipo de análisis	Profundidad (cm)	Repeticiones de carga soportada	ϵ_t (microstrain)	ϵ_z (microstrain)
Fatiga	15.0	3753817	-96.99284	—
Deformación permanente	75.0	118790121	—	164.54867

Exportar a Excel

Figura 4. 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 5, 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.

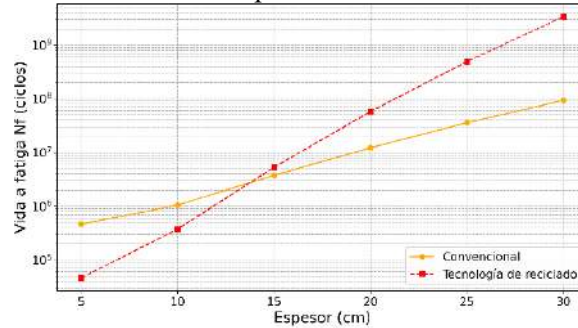


Figura 5. Comparación de vida a fatiga entre mezcla asfáltica convencional y con tecnología de reciclado

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 6 se muestra la distribución de esfuerzos, en la Figura 7 se presenta la distribución de deformaciones, y en la Figura 8, las deformaciones en el eje z. Estas gráficas permiten realizar observaciones clave y extraer conclusiones relevantes sobre el desempeño comparativo de las tecnologías evaluadas.

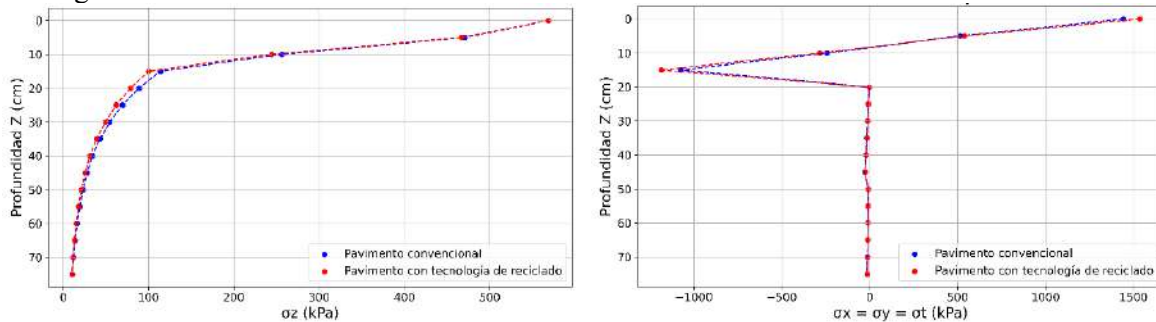


Figura 6. Distribución de esfuerzos verticales y horizontales en pavimentos convencionales y reciclados en función de la profundidad

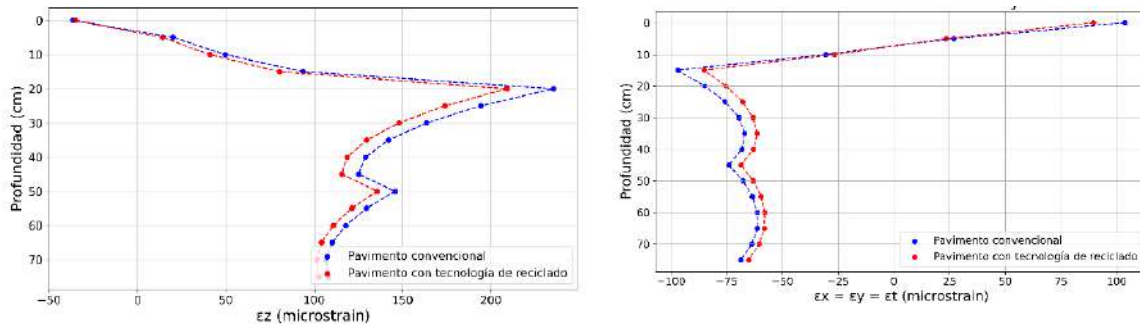


Figura 7. Distribución de deformaciones verticales y horizontales en pavimentos convencional y reciclado en función de la profundidad

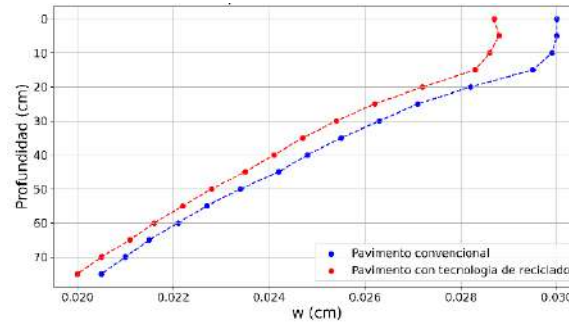


Figura 8. Distribución de deformaciones horizontales en pavimentos convencional y reciclado

5 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 9, 10 y 11, 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.

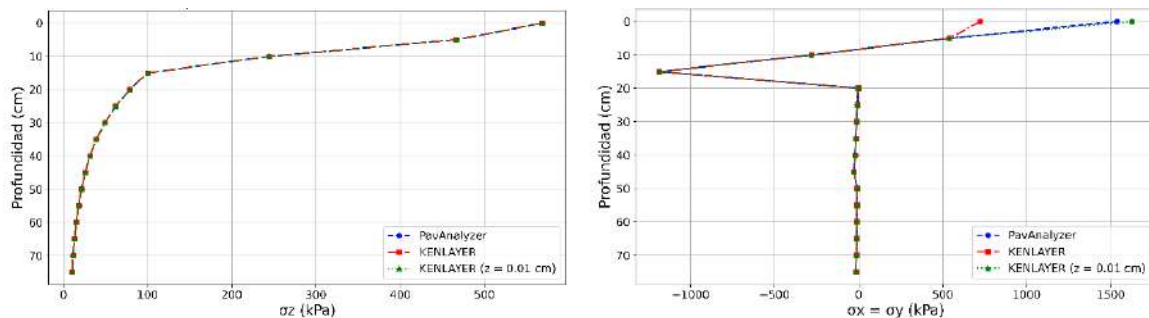


Figura 9. Validación de esfuerzos: PavAnalyzer vs KENLAYER

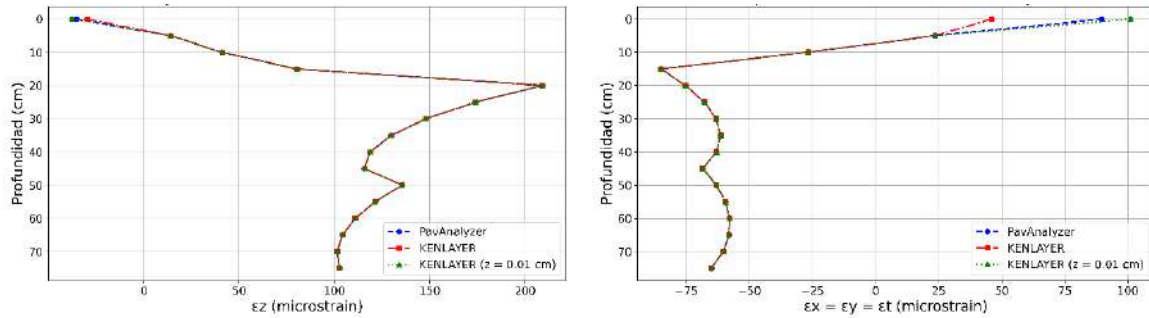


Figura 10. Validación de deformaciones: PavAnalyzer vs KENLAYER

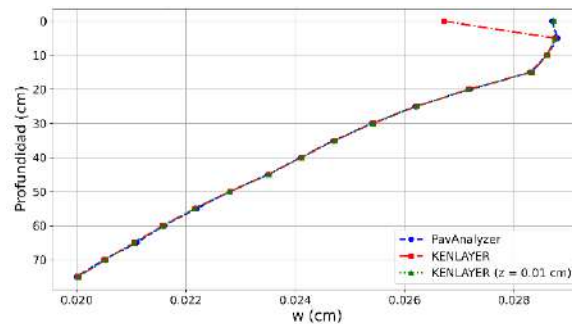


Figura 11. Validación de desplazamientos verticales: PavAnalyzer vs KENLAYER

6 Conclusiones

PavAnalyzer Beta es una herramienta innovadora desarrollada como plataforma web que permite analizar y comparar estructuras de pavimento convencional y con tecnologías de reciclado, eliminando la necesidad de instalación y facilitando su acceso desde cualquier dispositivo con conexión a Internet.

El programa integra modelos de cálculo basados en la teoría multicapa de Burmister y métodos para estimar ejes equivalentes conforme a las metodologías de la UNAM y AASHTO, ambas adaptadas a las condiciones reales del tránsito en México.

PavAnalyzer permite modelar estructuras de hasta siete capas y realizar análisis estructurales personalizados, gracias al ajuste de parámetros numéricos como el número de ciclos de integración, tolerancia absoluta y relativa, y la activación de modelos de deterioro por fatiga y deformación permanente.

Se desarrolló una metodología estructurada para comparar el desempeño de mezclas asfálticas convencionales frente a tecnologías recicladas, considerando parámetros obtenidos en laboratorio según el protocolo AMAAC Nivel IV, con base en el cálculo de vida útil estructural (N_f y N_d) para un número proyectado de ejes equivalentes.

El ejemplo de aplicación presentado en este trabajo mostró cómo utilizar la plataforma PavAnalyzer para comparar dos estructuras de pavimento bajo condiciones idénticas y también cómo analizar de manera individual el desempeño estructural de una mezcla específica mediante los resultados de esfuerzos, deformaciones y vida estructural.



PavAnalyzer permite la visualización gráfica de resultados clave (esfuerzos, deformaciones, desplazamientos), lo que facilita el análisis técnico y la toma de decisiones en el diseño de estructuras de pavimento, considerando criterios de desempeño estructural.

En la validación realizada frente al software KENLAYER, PavAnalyzer mostró una alta concordancia en todos los parámetros analizados, con diferencias mínimas atribuibles a la implementación numérica y al tratamiento de la superficie ($z = 0$).

Las diferencias observadas en la superficie ($z = 0$) podrían estar relacionadas con la sensibilidad de ese punto en los cálculos por integración numérica. Para evitar estas variaciones, se recomienda realizar validaciones a una profundidad cercana ($z = 0.01$ cm).

PavAnalyzer ofrece al usuario una plataforma robusta, flexible y de acceso universal, que apoya el diseño estructural de pavimentos con enfoque en sostenibilidad, facilitando la evaluación técnica de tecnologías recicladas y convencionales.

7 Referencias

- [1] Huang, (2004). Pavement Analysis and design (2da ed.). EUA.
- [2] Coria, (2012). Modelo de la respuestas estructural multicapa para diseño de pavimentos flexibles UMich PAV. Morelia, México.
- [3] Asphalt Institute. (2007). Thickness Design: Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads (2ª ed.). Lexington, KY.