



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

MODELACIÓN NUMÉRICA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS UTILIZADAS HOY EN DÍA EN LA RED CARRETERA DE MÉXICO.

Omar Viveros Carrera¹, José Rafael Bernal Padilla²,
Vinicio Andrés Serment Guerrero³, Carlos Chávez Negrete⁴

¹ Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México, México, omar.viveros@sict.gob.mx

² Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México, México, jose.bernal@sict.gob.mx

³ Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México, México, vserment@sict.gob.mx

⁴ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, cachavez@umich.mx

Resumen

Actualmente, la red carretera de México, así como diversos países en vías de desarrollo, está migrando hacia estructuras más eficientes con mejores características mecánicas, hidráulicas, de seguridad, etc.; esto debido al crecimiento de la población y el desarrollo del país que detona un incremento del tránsito, las cargas, las velocidades y dimensiones de los vehículos y cuestiones severas como es el cambio climático y el uso desmedido de recursos no renovables. Ante esta situación, es imprescindible buscar opciones de estructuras de pavimento optimizadas. Como parte de las soluciones de reconstrucción, las bases hidráulicas convencionales se han ido sustituyendo por bases con mayor rigidez en su matriz estructural, entre las que destacan: bases estabilizadas o modificadas con cemento Portland, bases estabilizadas con cemento asfáltico espumado, bases estabilizadas o modificadas con asfalto y bases estabilizadas con productos poliméricos. Partiendo de una estructura tipo conocida, se realizaron modelaciones con elementos finitos de distintas opciones de reconstrucción de estructuras de pavimento, determinando su desempeño con base en los esfuerzos de compresión en las terracerías y de tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica, que sirvieron de insumos para obtener el número de repeticiones de carga que cada opción de estructura fue capaz de soportar durante su vida útil. Se obtuvieron resultados sobre la estructura más eficiente para el caso que le confiere, pros y contras de la aplicación de cada una de ellas y más importante, cómo ayudaría a México en la inversión de los activos en infraestructura carretera.

Palabras Clave: Pavimentos, Sustentabilidad, Conservación, Modelación de Pavimentos.

Introducción

Actualmente en México se tienen más de 170, 000 kilómetros pavimentados como parte de la red carretera federal [1], un porcentaje importante se encuentran en un estado físico que requiere ser reconstruido.

Considerando los pilares que toma en cuenta el Foro Económico Mundial para determinar la competitividad de un país [2], la importancia que tiene la infraestructura de un país en su desarrollo es esencial ya que, ocupa el segundo pilar de dicha evaluación, por lo que aumentarla y conservarla en condiciones óptimas es cuestión prioritaria. Para ello requerimos ser capaces de realizar un manejo eficiente de los recursos utilizados y proyectar, diseñar y ejecutar los trabajos en la infraestructura carretera empleando las herramientas necesarias para lograr la ya mencionada eficiencia.

Como parte del avance de la tecnología y su aplicación en el campo de la ingeniería civil, en particular en el diseño de estructuras de pavimentos las herramientas de modelación han ocupado



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

un papel importante, ya que nos permiten identificar comportamientos mecánicos de las estructuras analizadas de una manera rápida y confiable. Ahora bien, como cualquier herramienta digital, se requiere de datos de entrada confiables, reales, medidos y analizados de manera correcta.

En los últimos años a nivel mundial y como parte de la preocupación por el impacto ambiental generado en las obras referentes a la construcción, conservación y modernización de carreteras, se han realizado análisis que permitan obtener como resultado estructuras de pavimentos sustentables, brindando un nivel de servicio adecuado y eficiente al usuario, así como, un manejo eficiente de los recursos financieros.

Con lo anterior es importante el uso metodología de Análisis de Costo de Ciclo de Vida (LCCA, por sus siglas en inglés) esto para implementar el beneficio y reducir costos [3]. Con el creciente enfoque en la sostenibilidad, la industria vial se enfrenta al desafío de considerar prácticas sostenibles [4]. Permitir una transición sostenible requiere altos niveles de inversión. Debido a que las agencias a menudo se ven limitadas por fondos inadecuados para las inversiones, es necesario prestar atención a la evaluación de los costos futuros durante períodos más largos. Teniendo en cuenta las restricciones presupuestarias, las agencias deben utilizar metodologías rigurosas de toma de decisiones que brinden información sobre la viabilidad económica a largo plazo.

Actualmente en México al igual que en muchos países de América Latina vemos como se presentan escenarios que afectan la vida útil de las estructuras de pavimentos de manera acelerada, tales como, exceso de cargas, tasas de crecimiento altas, falta de control de calidad en los procesos, etc. Ante ello la necesidad de realizar estudios como el del presente artículo donde realizando modelaciones en un sistema de elementos finitos podremos determinar la estructura de pavimento más eficiente desde un aspecto mecánico, considerando además las cargas que realmente actúan en los pavimentos. De acuerdo con la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) el efecto de la sobrecarga en la vida útil del pavimento depende de diferentes factores como el tipo de tráfico, la distribución de la carga, la rueda y la suspensión del vehículo [5] y es una realidad que en países en vía de desarrollo se de este fenómeno que afecta los gastos de operación y la seguridad vial a través del deterioro prematuro de su infraestructura carretera.

Así mismo, para esta investigación se obtienen resultados sobre el comportamiento mecánico de las estructuras propuestas para la rehabilitación del caso de estudio y se muestran ventajas y desventajas de cada una de ellas, teniendo como objetivo variar los esfuerzos de acuerdo con lo que pasa en realidad en el sitio, por lo que este análisis busca una opción para encontrar la estructura óptima que presente mayores beneficios en costo, pero sobre todo en desempeño que termina recayendo en la seguridad y confort de la vialidad para los usuarios.

2 Caso de Estudio

Como caso de estudio se utilizó la información de un tramo carretero ubicado en la región oeste de México en el estado de Jalisco, donde la estructura del pavimento se encuentra desplantada y sobre una zona lacustre. La carretera es de dos cuerpos con una faja separadora, tiene un ancho de 11.0 m compuesta por dos carriles de 3.5 m, un acotamiento interno de 1.0 m y un acotamiento externo de 3.0 m perteneciente a las características de un camino tipo A4[6]. La estructura actual del pavimento se encuentra conformada por una Subrasante de 1.0 m de espesor compuesta de material de filtro (roca de origen volcánico de baja densidad), esto con dos fines, siendo el primero, romper el efecto de capilaridad y el segundo, dar nivel a la estructura con un material ligero para las condiciones del terreno. Posteriormente, se tiene una capa de subbase de 0.15 m, seguida de una capa de base estabilizada con cemento Portland de 0.30 m, coronando con una carpeta asfáltica Marshall de 0.06 m de espesor. Esta autopista tiene un Tránsito Promedio Diario Anual (TDPA) de 7434 vehículos con un porcentaje de vehículos de carga del 25.2%, o sea, esta vialidad tiene un tráfico importante.



La estructura existente en dicho tramo se muestra en la Figura 1:

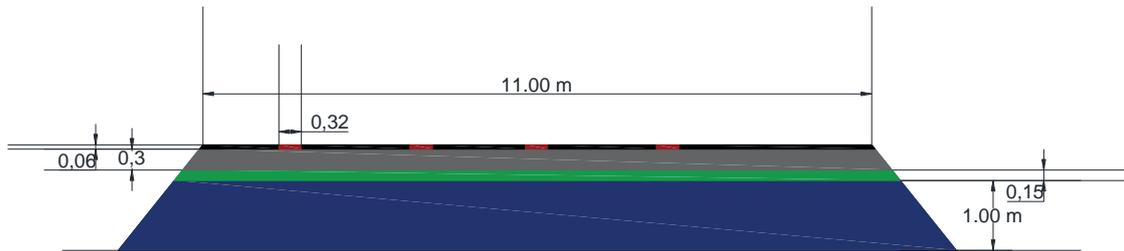


Figura 1. Geometría de la estructura existente.

3 Modelación de Estructuras de Pavimento

Para verificar el efecto de las diferentes propuestas de estructuras para el caso que confiere de este artículo, se hizo una modelación numérica considerando un análisis empírico mecanicista [7]. En la Tabla 1, se presentan los espesores y módulos elásticos de las capas para analizar las propuestas elásticas-lineales del modelo axisimétrico realizado con el software GID 14.0.7 COREBRIGHT 2020 [8]. Para el análisis elastoplástico se utilizó el programa PLAXIS 2D CE V20. Para el análisis axi-simétrico se consideró un radio de aplicación de esfuerzo de 0.16 m, una ley constitutiva elástica y tres diferentes esfuerzos correspondientes a las magnitudes de las cargas aplicadas por el eje equivalente sencillo dual de 8.2 toneladas (5.09 kg/cm² o 500 kN/m²), la carga máxima legal para un eje tándem motriz de 21 toneladas (6.53 kg/cm² o 640 kN/m²) estipulada en la norma mexicana de pesos y dimensiones [9] y por último, una sobrecarga del 35% para el mismo tipo de eje tándem (8.81 kg/cm² o 864 kN/m²). El segundo, es un análisis elasto-plástico basado en la teoría de Mohr-Coulomb en 2D con el cual se representa la estructura en su totalidad con la aplicación de los mismos esfuerzos en una línea de influencia de 0.32 m correspondiente al diámetro donde el par de neumáticos tiene influencia sobre la superficie de la capa de rodadura, este tipo de modelación tiene la finalidad de mostrar los puntos plásticos posibles donde la estructura presenta deformación no recuperables y ver así cuales son las zonas más vulnerables ante los diferentes escenarios de la conformación de la estructura y de las distintos esfuerzos aplicados. En el eje de simetría (coordenada x=0) la condición de frontera aplicada fue con un desplazamiento en el sentido horizontal igual a 0, en el lado derecho de la sección se utilizó la misma condición; en la frontera inferior del pavimento, en la coordenada vertical (y=0) se restringieron los desplazamientos verticales. El dominio se discretizó con elementos triangulares de 6 nodos, considerando triángulos más pequeños en la zona de las cargas, esta condición se extiende hasta la profundidad de la subrasante. Los parámetros de los modelos están definidos en la Tabla 1:

Tabla 1. Parámetros elástico-lineales.

Convencional		Propuesta 1	
Material	Espesor/módulo	Material	Espesor/módulo
Carpeta Asfáltica	0.6 cm/ 2800 MPa	Carpeta Asfáltica	0.6 cm/ 2800 MPa
Base Cementada	30 cm/1000 MPa	Base Hidráulica	30 cm/350 MPa
Subbase	15 cm/ 280 MPa	Subbase	15 cm/ 280 MPa
Subrasante	100 cm/ 350 MPa	Subrasante	100 cm/ 350 MPa
T. Natural	infinito/ 50 MPa	T. Natural	infinito/ 50 MPa



Propuesta 2		Propuesta 3	
Material	Espesor/módulo	Material	Espesor/módulo
Carpeta Asfáltica	0.6 cm/ 2800 MPa	Carpeta Asfáltica	0.6 cm/ 6000 MPa
Base Asfáltica	14 cm/2500 MPa	Base Espumada	25 cm/1500 MPa
Base Hidráulica	25 cm/ 350 MPa	Base Cementada existente	15 cm/ 1000 MPa
Subrasante	100 cm/ 350 MPa	Subbase existente	15 cm/ 280 MPa
T. Natural	infinito/ 50 MPa	Subrasante	100 cm/ 350 MPa
		T. Natural	infinito/ 50 MPa

Tabla 2. Parámetros para modelación elasto-plástica.

Material	Material model	Drainage type	Yunsat	Ysat	C'	Phi	Tension cut-off	Tensile Stress
T. Natural	Mohr-Coulomb	Undrained	12.3	13	55	0		
Subrasante	Mohr-Coulomb	Drained	8.8	11	50	35		
Subbase	Mohr-Coulomb	Drained	21.58	22.3	21	35		
Base Cementada	Mohr-Coulomb	Drained	22.5	23.5	1000	30	si	500
Base Hidráulica	Mohr-Coulomb	Drained	21.5	22.5	35	21		
Base Asfáltica	Linear Elastic	Non-Porous	23.53	23.5	-	-		
Base Espumada	Mohr-Coulomb	Drained	22.35	23.5	250	30	si	700
Carpeta Asfáltica	Linear Elastic	Non-Porous	23.53	23.5	-	-		

En la Figura 3 y Figura 3, se presentan los contornos de deformación unitaria vertical para estructura convencional. Se muestran las deformaciones unitarias horizontales (ϵ_{xx}) y verticales (ϵ_{yy}), siendo estas últimas positivas en sentido hacia abajo. Si se observan dichas figuras, los contornos de deformación vertical se asemejan a los bulbos de esfuerzos verticales, los cuales no se presentan en el artículo. Pero se puede verificar que en cada cambio de capa existen una discontinuidad en los contornos, y es más clara la variación de los módulos. Para calcular la deformación permanente a nivel de la subrasante se utiliza la deformación de compresión, ϵ_c y se puede concluir que mientras mayor sea el módulo de esta capa, disminuye la deformación vertical unitaria. Para el cálculo de la vida a fatiga de la superficie de rodadura se usa la deformación unitaria por tensión (ϵ_t), (deformaciones horizontales, eje de las abscisas) en la interfase de la carpeta asfáltica y la capa inferior donde se observa una deformación unitaria mayor en la mayoría de los casos.

Se analizaron las configuraciones estructurales presentes en ambos segmentos, estimando los ejes equivalentes que soportarían con la aplicación en la carpeta asfáltica. Se determinaron las deformaciones de tensión (ϵ_t) y las deformaciones de compresión vertical (ϵ_c), en la interfase



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

entre la carpeta y la base (algunas variantes que se dan a conocer más adelante) y en la interfase entre la subbase y la subrasante. Se utilizan las ecuaciones 1 y 2, funciones de transferencia generales [7], con los parámetros del Asphalt Institute. Las ecuaciones utilizadas son:

$$Nf = 0.414 \varepsilon_t^{-3.291} E_1^{-0.854} \quad (1)$$

$$Nd = 1.365e^{-9} \varepsilon_c^{-4.477} \quad (2)$$

Donde, N_f es el número de repeticiones permisibles debido a la fatiga, N_d es el número de repeticiones permisibles por deformación permanente, ε_t , es la deformación de tensión unitaria en la parte inferior de la carpeta, ε_c , es la deformación unitaria vertical en la parte superior de la subrasante, E_1 , es el módulo de elasticidad de la carpeta en kN/m² o kPa. En el presente artículo se presentan los esquemas de modelación más representativos que son los de estructura existente. Dentro de los segmentos analizados se manejaron diversas propuestas para explicar la interacción de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento, se enfatiza en la resistencia a fatiga dejando a un lado los posibles efectos de reflexión de grietas de las capas inferiores y drenaje de las capas.

3.1 Estructura Existente

En la Figura 2 y Figura 3 se muestran los resultados de la estructura existente. Se obtuvo una deformación en la capa inferior de la carpeta de 2.77e-5, 4.38e-5 y 6.04e-5 por lo cual se calcula un $N_f = 1048, 231$ y 81 millones de ejes equivalentes y una deformación por compresión en la parte superior de la subrasante de 1.41e-5, 1.77e-5 y 2.31e-5 por lo cual se calcula un $N_d = 240, 81$ y 26 millones de ejes equivalentes para la una aplicación de esfuerzo del eje sencillo dual de 8.2 ton, la máxima carga legal para un eje tándem motriz y una sobrecarga respectivamente, siendo estos los valores de referencia. Esto quiere decir que en este punto la estructura existente presenta una excelente resistencia por fatiga y por deformación permanente independientemente del esfuerzo aplicado, aunque bien se puede ver el decremento al variar dicho esfuerzo. Asimismo, se puede apreciar una subrasante con un nivel de deformación baja para las condiciones de las capas superiores y el terreno natural, siendo que los esfuerzos en gran porcentaje se distribuyen a nivel de base cementada y subbase ayudando a que las deformaciones por compresión tiendan a disminuir. Ahora bien, si se observa nuevamente la Figura 2, se muestra un punto ubicado en la parte superior de la subbase, este punto represente el sitio donde se tienen las mayores deformaciones, esto probablemente se deba a la importante diferencia de rigidez con la capa superior (base cementada). Esto quiere decir, que a pesar de que es una buena estructura, se ve vulnerable por la subbase tanto por el espesor como por el módulo, pudiendo acelerar el proceso de aparición de fisuras y agrietamiento.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

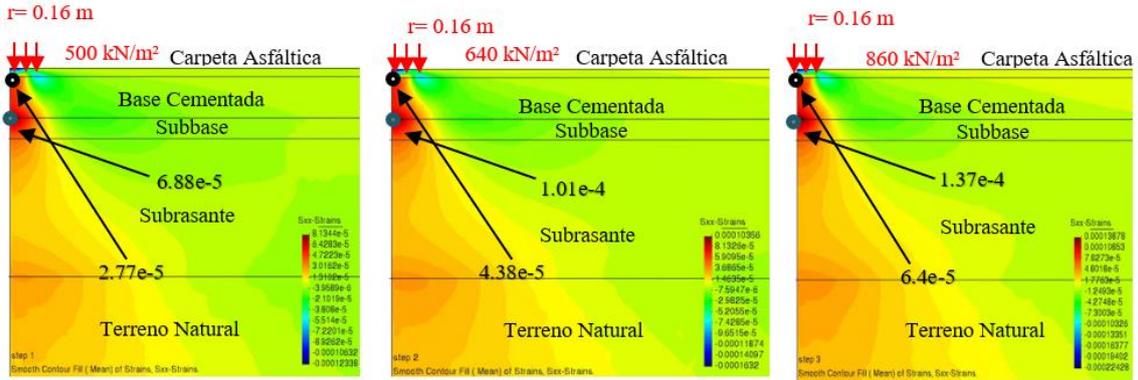


Figura 2. Deformaciones unitarias horizontales ϵ_{xx} .

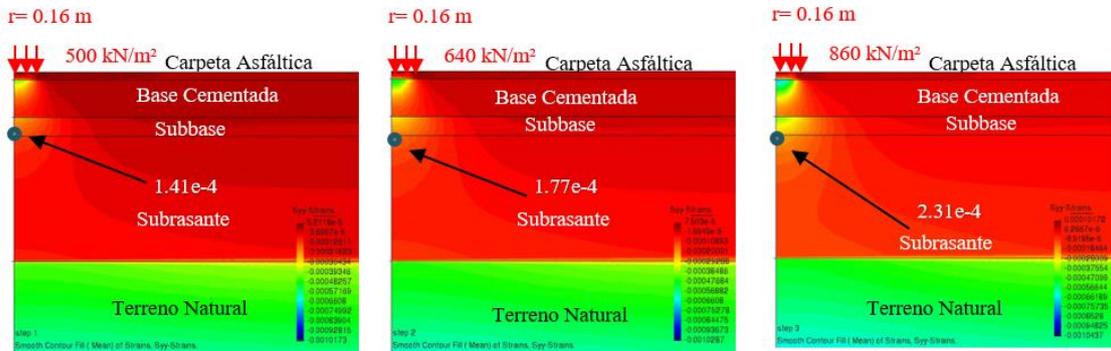


Figura 3. Deformaciones unitarias horizontales ϵ_{yy} .

En la Tabla 3, se pueden observar los resultados de las distintas modelaciones de las estructuras propuestas. La segunda columna se refiere al módulo de la carpeta que para estos casos se consideró por diseño Marshall.

Tabla 3. Resultado de las deformaciones y cantidad de ejes equivalentes que soporta la estructura.

Caso	Esfuerzo	E (kN/m ²)	ϵ_t	ϵ_c	N_f ($\sum L \times 10^6$)	N_d ($\sum L \times 10^6$)
Existente	ESAL	3,570,000	2.77E-05	1.41E-04	1047.82	239.68
	Carga máx. Legal	3,570,000	4.38E-05	1.77E-04	231.27	85.70
	Sobrecarga	3,570,000	6.04E-05	3.13E-04	80.58	6.63
Existente B	ESAL	No aplica	6.88E-05	1.41E-04	No aplica	239.68
	Carga máx. Legal		1.01E-04	1.77E-04		85.70
	Sobrecarga		1.37E-04	2.31E-04		25.98
Propuesta 1	ESAL	3,570,000	1.51E-04	1.88E-04	3.92	65.95
	Carga máx. Legal	3,570,000	2.38E-04	2.38E-04	0.88	22.66
	Sobrecarga	3,570,000	3.29E-04	3.13E-04	0.30	6.63
Propuesta 1 A	ESAL	No aplica	2.08E-04	1.88E-04	No aplica	65.95
	Carga máx. Legal		2.69E-04	2.38E-04		22.66
	Sobrecarga		3.61E-04	3.13E-04		6.63
	ESAL	3,570,000	9.03E-06	1.15E-04	41860.64	594.89



Propuesta 2	Carga máx. Legal	3,570,000	1.37E-05	2.07E-04	10667.38	42.42
	Sobrecarga	3,570,000	1.88E-05	1.83E-04	3740.52	73.29
Propuesta 2 A	ESAL	3,185,000	9.09E-05	1.15E-04	23.08	594.89
	Carga máx. Legal	3,185,000	1.38E-04	2.07E-04	5.85	42.42
	Sobrecarga	3,185,000	1.89E-04	1.83E-04	2.08	73.29
Propuesta 3	ESAL	3,570,000	7.80E-08	3.26E-05	259166096811.24	167705.02
	Carga máx. Legal	3,570,000	1.43E-05	8.57E-05	9294.22	2202.33
	Sobrecarga	3,570,000	2.30E-05	1.06E-04	1926.22	863.51
Propuesta 3 A	ESAL	No aplica	6.78E-08	3.26E-05	No aplica	167705.02
	Carga máx. Legal		3.33E-05	8.57E-05		2202.33
	Sobrecarga		4.46E-05	1.06E-04		863.51

La propuesta 1 y 1A en la Tabla 3, tiene que ver con una consideración de una base hidráulica convencional en vez de la base cementada de la estructura existente manteniéndose los mismos parámetros a excepción claro del módulo y de la relación de poisson. La propuesta 1, como el caso anterior se muestran los resultados de Nf de la parte inferior de la carpeta asfáltica y de Nd de la parte superior de la subrasante. Se demuestra un número bajo de aplicación de ejes equivalentes para todos los casos de fatiga, resaltando los resultados de sobrecarga en fatiga. Asimismo, para el caso de la propuesta 1A donde se obtuvo la máxima deformación por tensión entre la capa de subbase y base hidráulica, sin embargo, ya no aplica la ecuación ya que solo es para la carpeta pero se aprecian valores de deformación en color rojo bastante más altos, esto bien puede decrementar la resistencia a la fatiga de manera importante. Esto demuestra el por qué una base hidráulica convencional ya no es conveniente para un camino de altas especificaciones y menos con una capa inferior con un bajo espesor aunque el material sea de buena calidad.

La propuesta 2 y 2A representa una estructura de prueba ya construida como parte de las soluciones de modernización y reconstrucción. Para el caso de la propuesta 2 se pueden observar valores de deformación muy bajos, por tanto, valores de Nf muy grandes y de Nd también pero en menor escala. La parte inferior de la carpeta asfáltica se comenta que no presenta deformación por tensión sino por compresión y muy baja y no es hasta la base asfáltica que se comienzan a presentar las deformaciones por tensión. El modelo prácticamente toma como una sola capa la carpeta asfáltica y la base asfáltica debido a sus similitudes estructurales. Es por eso, que de manera hipotética si se tomara como una sola capa el conjunto de la capa de base asfáltica y carpeta asfáltica (módulos entre 2 800 000 y 3 500 000 kN/m² promedio 3 185 000 kn/m²) las mayores deformaciones por tensión se presentan entre la base asfáltica y la base hidráulica como se muestra con la flecha en la Figura 4, demeritando en buena medida la vida por fatiga de esta estructura como se muestra en la Tabla 3. A pesar de que lo último mencionado solo es una suposición, deja ver nuevamente que la interacción de capas de pavimento con diferencias importantes de rigidez tienden a disminuir las aportación de las capas estabilizadas, por lo que se piensa es conveniente considerar una transición modular adecuada.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

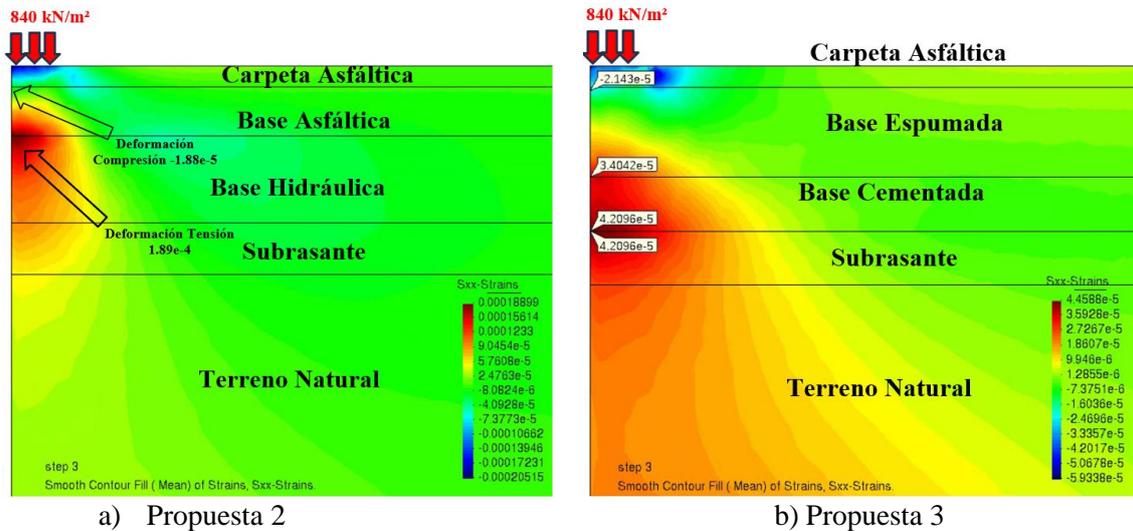


Figura 4. Contornos de deformación para la propuesta 2 y 3.

Para el caso de la propuesta 3, los valores que se muestran en la Tabla 3 expresan deformaciones por tensión y por compresión muy pequeñas que llevan a calcular valores de N_f y N_d exorbitantes, donde ya el modelo de ecuación del Asphalt Institute ya no es eficiente para casos como este y el anterior, pero si reflejan una vida por repeticiones de carga en ejes equivalentes alta, donde es más complejo que la estructura falle, cuando menos ante las condiciones utilizadas para estas modelaciones. Como se puede observar en la Figura 4 b) en esta propuesta pasa lo mismo que el caso anterior, las deformaciones horizontales en la parte inferior de la carpeta resultan por compresión, la capa más vulnerable es la subrasante, es ahí donde se presentan las mayores deformaciones, la diferencia radica en que esas deformaciones son pequeñas y no representan una disminución importante de la vida por fatiga y deformación permanente de la estructura en ninguno de los 3 casos de aplicación de esfuerzos, no hay que dejar de lado que la estructura tiene 0.10 m más de espesor respecto de las anteriores propuestas, esto lleva a una problemática distinta (mayor peso) que se abordará en el siguiente apartado. No obstante, nuevamente se observa que la transición de rigideces entre capas debe ser un factor a considerar en el diseño. Esta propuesta de estructura con una base espumada seguida de una base cementada resulta ser la opción más eficiente, habría que ver en terminos de costo-beneficio si lo justifica.

3.2 Modelo Elasto-Plástico

Para este caso, se realizaron modelos en 2D de las propuestas ya mencionadas con anterioridad, la diferencia es que estos son modelos elasto-plásticos donde se representa la totalidad de las dimensiones de las estructuras con un espesor considerable de terreno natural (30 m) para comprender mejor el comportamiento de la estructura conjunta y minimizar el efecto de frontera. Para estos modelos se consideran supuestos de acuerdo con el tipo de material de cada capa de ángulo de fricción y cohesión, los pesos específicos y las resistencias son valores de laboratorio. En la Figura 5, se presenta la configuración geométrica del modelo, para los casos de las propuestas representa los mismos datos del modelo axisimétrico. Sin embargo, las cargas representan ahora la totalidad del ancho del par de llantas de un eje tándem de un tractocamión (0.32 m en vez de 0.16 m). Cada aplicación de esfuerzo representa el par de neumáticos de un tractocamión por lo que las cuatro aplicaciones representan el paso de dos tractocamiones simultáneos sobre la corona. En estas modelaciones el enfoque radica en los posibles puntos de falla o puntos plásticos que estarán representados en la estructura en color rojo, mientras que los puntos en color blanco muestran las zonas donde se generan tensiones de acuerdo con los 3 tipos de esfuerzos que se han manejado a lo largo de este documento. Ahora bien, las cargas en un



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

pavimento son cargas dinámicas que para este caso particular no se modeló de esa manera, sin embargo, estas modelaciones y los puntos plásticos lo que dicen es que la carga aplicada a la estructura excede la carga que es capaz de soportar pero, al ser cargas que se aplican en fracción de segundos en realidad no va a tener una falla súbita; lo que sí pasa es que se presenta un daño y este se va acumulando justo en esas zonas plásticas, causando problemas (deterioros) a largo plazo.

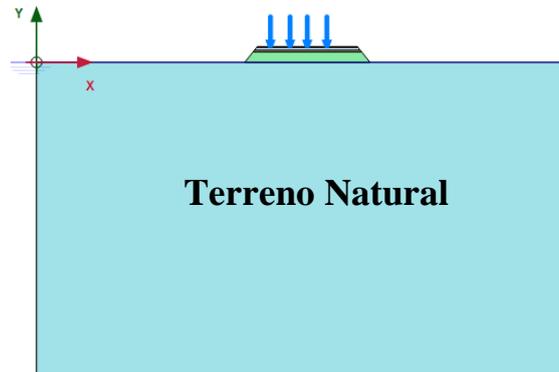
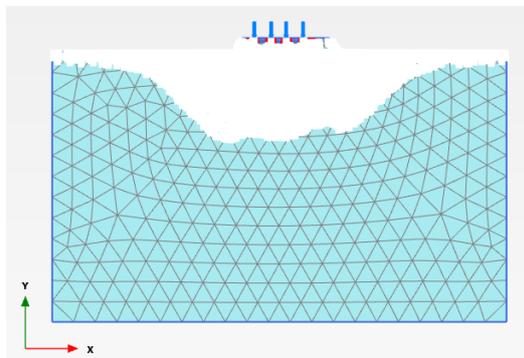


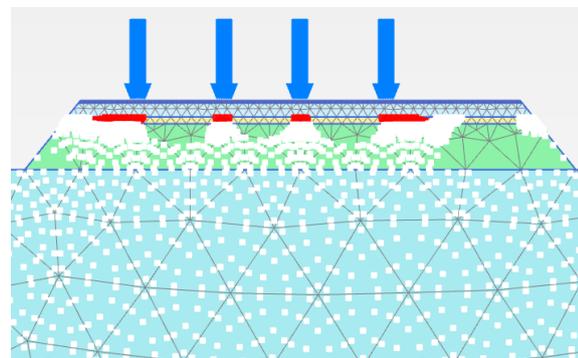
Figura 5. Configuración geométrica del modelo

3.2.1 Modelo con estructura existente

La estructura existente de acuerdo con el modelo presenta posibles puntos de falla en la capa de subbase y se intensifica con el incremento de esfuerzos hasta llegar en buena medida a la capa de subrasante. También se puede observar la generación de tensiones por debajo de la capa de subbase y hasta un porcentaje considerable de profundidad del suelo de desplante, así como, a los costados de la estructura. No obstante, no se presentan puntos plásticos debajo de la estructura de pavimento debido a que para el caso de origen el suelo ya está consolidado por el paso del tiempo, el peso de la estructura y la aplicación de esfuerzos ocasionados por el tránsito vehicular.



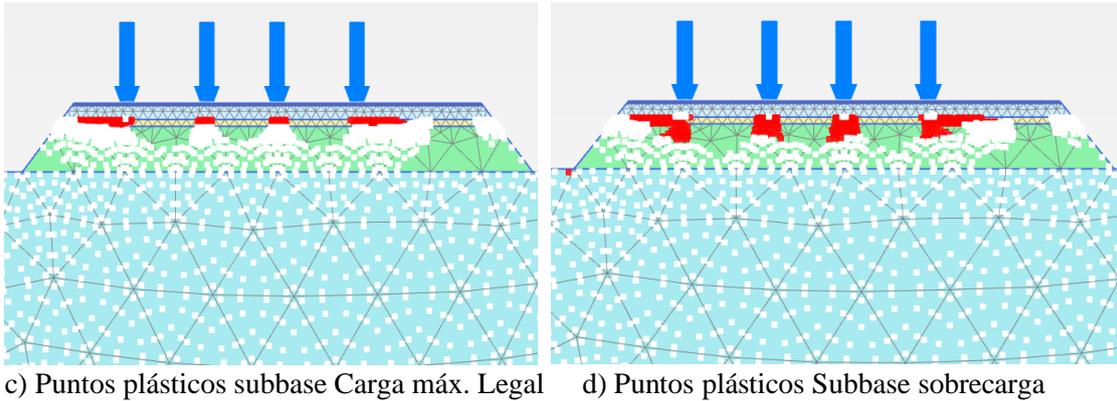
a) Estructura completa



b) Puntos plásticos en la subbase carga ESAL



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.



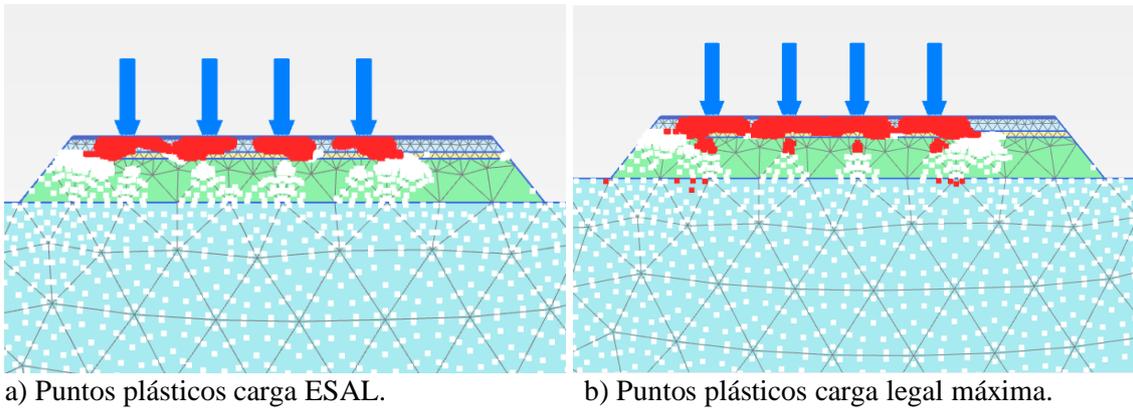
c) Puntos plásticos subbase Carga máx. Legal

d) Puntos plásticos Subbase sobrecarga

Figura 6. Representación de las zonas plásticas para la estructura existente.

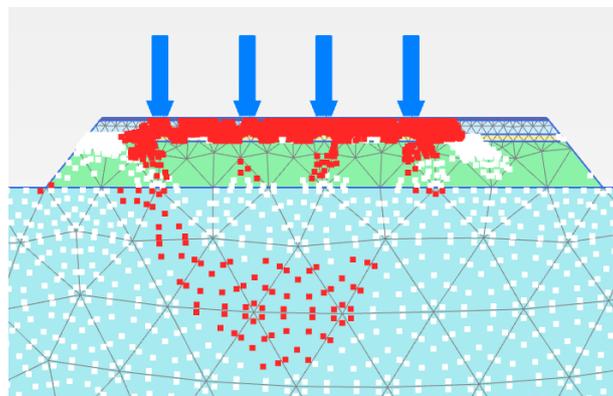
3.2.2 Modelo con estructura propuesta 1

Esta estructura como ya se ha comentado anteriormente, representa la estructura anterior, pero con una base hidráulica convencional en vez de la base cementada existente. Se puede observar de la Figura 7 que los puntos plásticos se presentan a partir de la base hasta el terreno natural para la Figura 7 b) y c).



a) Puntos plásticos carga ESAL.

b) Puntos plásticos carga legal máxima.



b) Puntos plásticos sobrecarga.

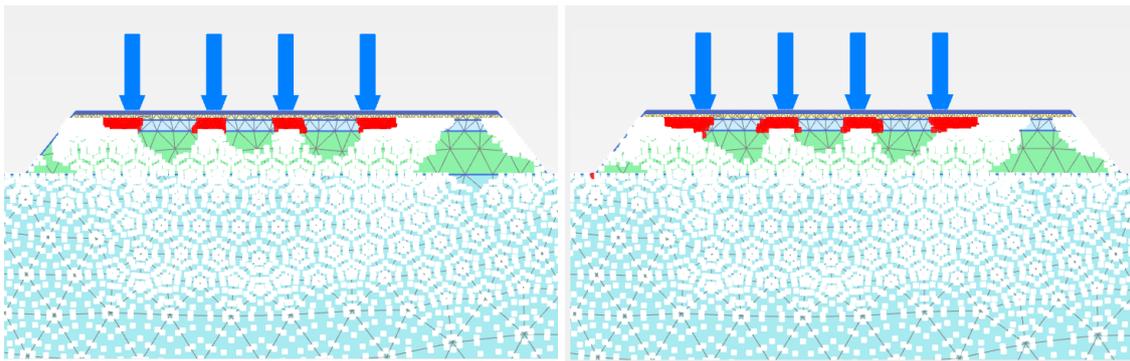
Figura 7. Representación de las zonas plásticas para la estructura propuesta 1.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

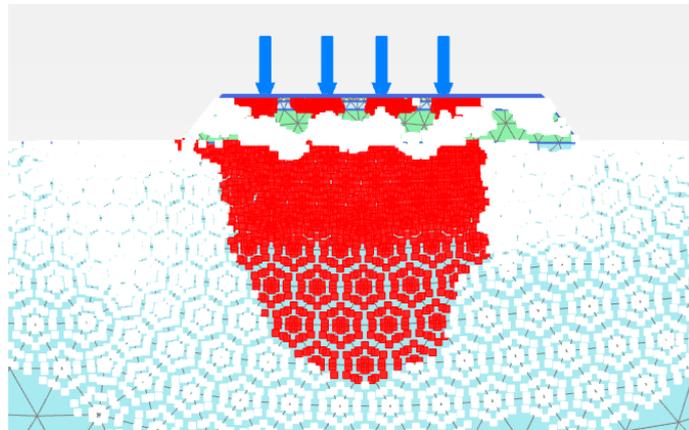
3.2.3 Modelo con estructura propuesta 2

Para este caso donde se tiene una capa estabilizada con cemento asfáltico sobre una base, los puntos plásticos se presentan justamente en la base hidráulica y para el caso de la sobre carga se tienen puntos plásticos en el terreno natural. A pesar de que la estructura es buena, el cambio de rigideces se piensa representa un cambio importante y posiblemente por el nuevo peso ahora de la estructura y el efecto de la sobrecarga se dan movimientos bajo la estructura del pavimento, esto hasta llegar a su nuevo equilibrio (consolidación).



a) Puntos plásticos carga ESAL.

b) Puntos plásticos carga legal máxima.



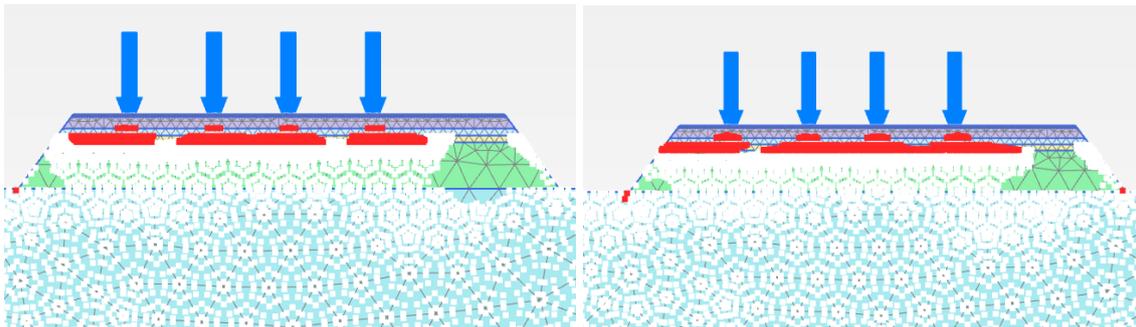
c) Puntos plásticos sobrecarga.

3.3.4 Modelo con estructura propuesta 3

Para la propuesta 3, se considera una estructura un tanto más robusta aplicando una base con cemento asfáltico espumado. La estructura presenta puntos plásticos en la subbase y en la base espumada, no así en la base cementada, esto por la alta rigidez. Además, es interesante observar que aún con la aplicación de una sobrecarga no existen puntos plásticos bajo la estructura aun siendo más pesada, esto quiere decir, que la base espumada absorbe bastante bien los esfuerzos, aunque para ello presenta algunos puntos plásticos en ella.

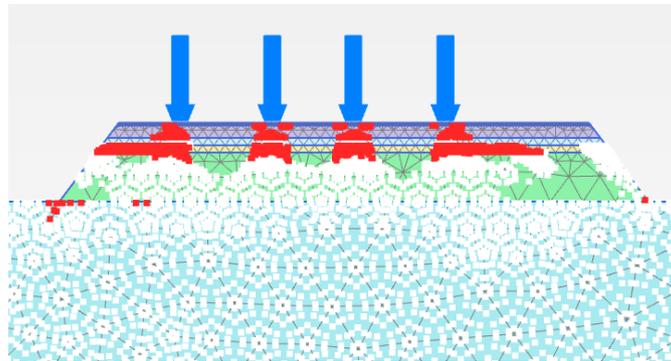


Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.



a) Puntos plásticos carga ESAL

b) Puntos plásticos carga legal máxima.



a) Puntos plásticos sobrecarga.

5 Conclusiones

Sin duda es sumamente importante buscar la eficiencia en el manejo de los recursos utilizados en los trabajos de diseño, construcción y conservación de red carretera para lograr tener una infraestructura con el nivel de servicio necesario y satisfacer las necesidades de los usuarios.

En este caso de investigación se observa que el uso de capas de pavimento estabilizadas tiene un desempeño bueno, sin embargo, es evidente la importancia de evaluar sobre qué tipo de capa reposarán, ya que el cambio brusco de rigideces tiende a cambiar el comportamiento de la estructura pudiendo mermar la eficiencia de las capas estabilizadas. Es importante que los diseños para pavimentos nuevos y reconstrucciones se tome en cuenta la transición de rigideces entre las capas. La estructura más eficiente de acuerdo con los datos obtenidos es la propuesta con la base espumada ya que absorbe los esfuerzos en mayor porcentaje. Las bases espumadas son una opción viable para la reconstrucción de pavimentos. La estructura actual tiene un comportamiento bueno, sin embargo, de acuerdo con los datos obtenidos la capa de subbase por su espesor y cambio de rigidez merma la eficiencia de la capa cementada presentándose agrietamientos naturales por la rigidez de la capa y quizá por la falta de soporte de la capa inferior. Es importante destacar que al seleccionar la estructura óptima, se apuesta por tener mayor seguridad y confort en la vialidad, por lo que, el análisis presentado en este trabajo puede ser útil en la selección de la estructura que aporte mayores beneficio.

Las zonas plásticas presentes en los modelos elasto-plásticos ubican donde se da la acumulación del daño en las capas que pueden ser las más vulnerables. Por otro lado, es de suma importancia tomar en cuenta en los modelos las distintas magnitudes de los esfuerzos aplicados debido a las cargas vehiculares, a fin de cuentas, los modelos con elemento finito lo que tratan de representar en lo posible es la realidad presente en las estructuras o piezas a modelar.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

Como trabajo futuro, se pretenden implementar LCCA para definir la estructura de pavimento con una perspectiva de desempeño a mediano y largo plazo satisfactoria, así como programar los trabajos de conservación necesarios para cumplir con la vida útil del tramo carretero analizado, sin embargo, también conlleva un reto importante su uso, derivado de la información requerida.

6 Referencias

- [1] *Gobierno de México*. (2023). Obtenido de <https://www.gob.mx/imt/articulos/aumenta-en-29-819km-la-longitud-total-de-la-red-nacional-de-caminos#:~:text=Por%20su%20parte%2C%20102%2C719km,San%20Luis%20Potos%20C3%AD%20y%20Zacatecas>.
- [2] Instituto Mexicano para la Competitividad, A. (2022). *Índice de Competitividad Internacional*. México. Obtenido de <https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2022/09/Indice-de-Competitividad-Internacional-2022.pdf>
- [3] Ognjenovic, S., Ishkov, A., Cvetkovic, D., Peric, D., & Romanovich, M. (2016). Analises of costs and benefits in the pavement management systems. *ELSEVIER*, 6. doi:doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.805
- [4] Ding, T., Sun, L., & Chen, Z. (2013). Opyimal strategy of Pavement Preventive Maintenance Considering Life-Cycle Cost Analysis. *ELSEVIR*, 7. doi:doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.190
- [5] (PIARC), A. M. (2022). *Overweight Vehicles: Impact on Road Infraestructure and Safety*. The Columbian .
- [6] Técnicos, D. G. (2018). *Manual de Proyecto Geométrico*. México: SCT.
- [7] Huang, Y. (2004). *Pavement Analisis and Design* (Second edition ed.). University of Kentucky, EE.UU., New Jersey: Pearson.
- [8] CATALUÑA, U. P. (2023). *CODE_BRIGHT USER GUIDE*. Departamento de ingeniería civil y ambiental, Cataluña.
- [9] GOBIERNO, S. D. (2017). NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. Diario Oficial de la Federación. Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5508944&fecha=26/12/2017#gsc.tab=0.