



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA VÍA FÉRREA CON LA INCLUSIÓN DE CAPAS TRATADAS CON CEMENTO ASFÁLTICO

Juan Carlos Valenzuela¹, Maribel Trujillo²,
Alexandra Ossa López³

¹ Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México, México, JValenzuelaM@iingen.unam.mx

² Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México, México, MTrujilloV@iingen.unam.mx

³ Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México, México, AOssaL@iingen.unam.mx

Resumen

El uso de material granular como sub-balasto en vías férreas es una opción eficaz y económica para soportar la superestructura ferroviaria, destacándose por su versatilidad y bajo costo inicial. Sin embargo, aunque ofrece ventajas como alta capacidad de amortiguamiento, buen drenaje y absorción de ruido, enfrenta desafíos en escenarios donde la subrasante tiene suelos con calidad marginal, acumulación de agua debido al deterioro de la capacidad de drenaje y filtración de agua de la subrasante al sub-balasto por la presencia de finos.

Para abordar estos problemas y prolongar la vida útil de la vía férrea, una alternativa actual en el diseño y rehabilitación es el uso de capas tratadas con materiales asfálticos, que han ganado atención por su alta resistencia mecánica, durabilidad, impermeabilidad y capacidad de amortiguación ante cargas.

En este artículo se compara el comportamiento de una vía férrea con una capa de sub-balasto de material granular y otra capa tratada con materiales asfálticos. Para esta comparativa se realiza un análisis multicapa utilizando el software de elementos finitos Plaxis 3D. Finalmente, se evalúa la influencia de la inclusión de la capa de concreto asfáltico en distintos espesores, analizando los esfuerzos desviadores y los asentamientos en la subrasante.

Palabras Clave: Capas tratadas, concreto asfáltico, esfuerzo desviador, asentamiento.

1 Introducción

Fomentar el uso de materiales innovadores en la construcción de vías férreas es esencial debido a los beneficios económicos que puede ofrecer a la industria. Estos materiales, tanto nuevos como alternativos, se aplican principalmente en las capas de la subestructura de la vía (balasto, sub-balasto y subrasante), mejorando las propiedades de los materiales convencionales y aumentando el rendimiento y la durabilidad de las vías férreas.

Se recomienda la selección de un material alternativo cuando los diseños convencionales no cumplen con los requisitos necesarios para su funcionamiento y mantenimiento adecuados [1]. Esta recomendación surge de la limitada comprensión de la eficacia y cuantificación del uso de estos materiales en la estructura de la vía férrea [2]. Una vez que se ha optado por un material alternativo, es crucial entender la problemática y el mecanismo de falla que su implementación resolverá. Además, se debe garantizar que esta solución no genere problemas adicionales, para asegurar un diseño exitoso.

Uno de los principales desafíos en las vías férreas es la presencia de una subrasante blanda, ya que las vías construidas sobre este tipo de terreno experimentan deformaciones excesivas y son propensas a fallas [3]. Para mitigar este problema, se busca aumentar la capacidad de carga de la estructura



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

ferroviaria. En la práctica profesional, para incrementar la capacidad de carga se han utilizado capas de concreto asfáltico, tierra reforzada con geotextiles y geomallas, capas estabilizadas con cemento, y membranas impermeables [1].

La capa de concreto asfáltico es una de las alternativas más utilizadas debido a su buen desempeño como elemento rigidizador de la vía, además de sus ventajas en el control de vibraciones, reducción de ruido, y su bajo costo en comparación con otras alternativas [4]. Sin embargo, la literatura sobre su desempeño es escasa, lo que motiva la realización de este estudio.

Este artículo ofrece una descripción de las capas de concreto asfáltico empleadas en vías férreas, discute la configuración de una vía que incorpora esta capa, analiza consideraciones clave para su implementación, y presenta los resultados de un estudio que evalúa cómo el uso de esta capa afecta los esfuerzos y asentamientos en la subrasante. El estudio se llevó a cabo mediante simulaciones tridimensionales con el programa de elementos finitos Plaxis 3D.

2 Capa de concreto asfáltico

Una capa de concreto asfáltico en vías férreas se configura tradicionalmente de dos maneras: como una capa superior, colocada entre los durmientes y el sub-balasto en lugar del balasto, o como una capa subyacente al balasto, reemplazando el sub-balasto o formando parte de este. Estas configuraciones se ilustran en la Figura 1. En la práctica, se prefiere la configuración subyacente al balasto, especialmente en vías con cargas pesadas. Según Ghasemi-Fare et al. (2024), esta disposición es más efectiva, ya que reduce significativamente las deformaciones en la subrasante y experimenta menores esfuerzos de tensión en su base. Además, mantener la capa de balasto permite ajustes en la geometría de la vía según sea necesario. El cemento asfáltico, al estar cubierto por el balasto, también está protegido de la luz y sufre menos variaciones de temperatura. Sin embargo, en áreas con un nivel freático superficial, se recomienda incluir una capa de sub-balasto entre el concreto asfáltico y la subrasante.

El uso de una capa asfáltica subyacente al balasto en vías férreas tiene varios objetivos: aumentar la rigidez de la vía para distribuir y reducir los esfuerzos antes de que lleguen a la subrasante; actuar como una capa impermeable que desvía el agua de lluvia hacia las cunetas laterales, evitando que penetre y debilite el suelo subyacente; y prevenir la migración de finos desde la subrasante hacia el balasto. No obstante, el uso de concreto asfáltico para impedir la penetración de agua en una subrasante de bajo rendimiento será difícilmente efectivo si la capa no está diseñada adecuadamente para soportar las cargas de la vía y el paso de los trenes.

Esta alternativa puede ser considerada en vías férreas donde la subrasante tiene una calidad marginal y no puede soportar adecuadamente el peso del balasto y las cargas dinámicas de los trenes. También es recomendable en vías con problemas de drenaje o dificultades para evitar la penetración de agua subterránea en las capas granulares, así como en áreas que experimentan grandes esfuerzos, como cruces de carreteras, accesos a puentes y túneles, y juntas de riel.

Al igual que con otros materiales alternativos, el éxito del uso de concreto asfáltico requiere un conocimiento adecuado de su correcta aplicación. Esto incluye un entendimiento profundo de la tecnología del cemento asfáltico para garantizar el diseño adecuado de la mezcla, la configuración apropiada de la sección de la vía, el transporte del cemento asfáltico y las técnicas de colocación.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

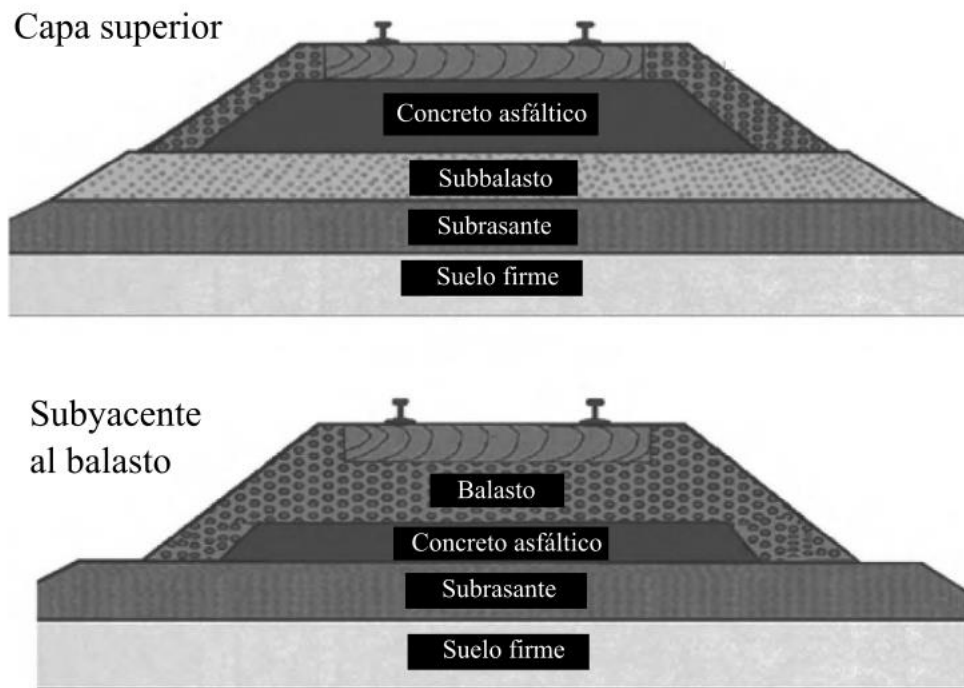


Figura 1. Configuraciones de vía férrea con capa de concreto asfáltico, modificado de [5]

3 Consideraciones en la aplicación de concreto asfáltico en vías férreas

El uso de concreto asfáltico, tanto en carreteras como en vías férreas, debe cumplir con especificaciones básicas de control de calidad para garantizar su rendimiento mecánico durante el servicio. Entre los componentes del concreto asfáltico, el cemento asfáltico desempeña un papel crucial debido a su naturaleza viscoelástica, que varía según la temperatura y el tiempo de carga. Por lo tanto, es fundamental caracterizar su comportamiento de manera integral para su aplicación en cualquier diseño.

Sin embargo, el concreto asfáltico en vías férreas presenta diferencias y particularidades, por ejemplo: (1) El concreto asfáltico para vías férreas requiere un agregado angular de mayor tamaño en comparación con las gradaciones comunes para carreteras. (2) Es esencial gestionar adecuadamente la logística de transporte del material en camiones y mantener la temperatura del cemento asfáltico durante su colocación, especialmente porque las vías férreas suelen construirse en áreas remotas, lo que puede presentar desafíos adicionales. (3) Lograr la densidad compactada deseada puede ser particularmente difícil sobre una subrasante blanda, ya que esta puede deformarse bajo las cargas de compactación, afectando la durabilidad y el rendimiento a largo plazo del concreto asfáltico.

4 Diseño de la vía con capa de concreto asfáltico

En el diseño de una vía férrea con capa de concreto asfáltico, uno de los principales desafíos es estimar la distribución y magnitud de los esfuerzos transmitidos a la subrasante, así como su deformación al implementar la capa. Este problema se aborda generalmente con software de análisis de vías férreas,



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

como KENTRACK o GEOTRACK, que proporcionan soluciones analíticas para determinar la respuesta elástica de la vía férrea.[6]. Sin embargo, estos programas tienen limitaciones.

Por esta razón, este artículo propone la utilización del software de elementos finitos PLAXIS 3D, que ofrece una representación precisa del fenómeno físico. PLAXIS 3D proporciona ventajas como la caracterización elastoplástica de los materiales, mayor flexibilidad en la colocación de cargas y la representación de los componentes de la superestructura de la vía férrea como elementos volumétricos, lo que mejora la precisión en la estimación del comportamiento de la vía.

5 Modelación numérica

En este artículo, se evalúa la incidencia de la capa de concreto asfáltico en el comportamiento de la vía férrea mediante la modelación de una capa de concreto asfáltico subyacente al balasto, con una capa de subbalasto debajo de ella, utilizada en escenarios donde el agua de la subrasante afecta la capa de concreto asfáltico. Además, se varía el espesor de la capa de concreto asfáltico en un rango de 10 a 25 cm, abarcando así los espesores comúnmente utilizados en vías férreas de Estados Unidos y Europa [2].

5.1 Modelo numérico

El modelo utilizado se presenta en la Figura 2. Se modeló una geometría de vía convencional con rieles separados por un escantillón de 150 cm, apoyados en 17 durmientes de concreto espaciados a 60 cm. Las capas de balasto, subbalasto y subrasante están inclinadas adecuadamente para garantizar el correcto drenaje de la capa de concreto asfáltico. El modelo mantiene un espesor constante para la capa granular de 45 cm (15 cm de balasto y 30 cm de sub-balasto), con la capa de concreto asfáltico, reemplazando parcialmente el espesor del sub-balasto.

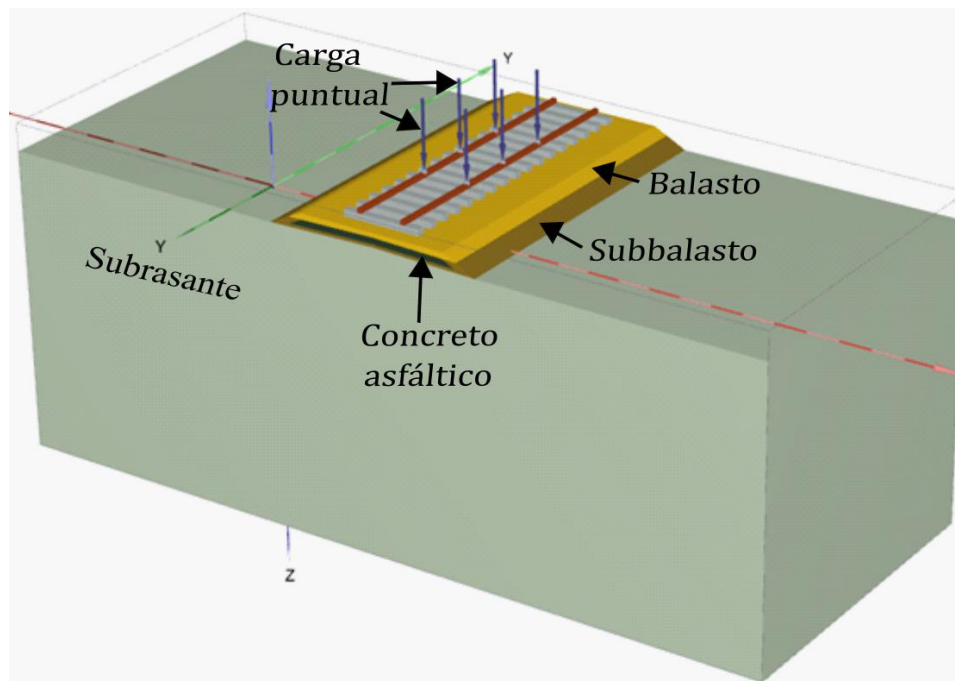


Figura 2. Configuraciones de vía férrea con capa de concreto asfáltico.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Para simular el paso del tren, se consideraron tres cargas puntuales representativas de la carga de la rueda, cada una de 170 kPa, espaciadas a 180 cm. El modelo no incluye la presencia de un nivel freático. Se utiliza una malla fina para los rieles, durmientes y capas granulares, mientras que la subrasante se modeló con malla de densidad media. A pesar del refinamiento de la malla, no se observaron diferencias significativas en los resultados, solo un aumento en el tiempo de cálculo, por lo que no se implementó el refinamiento en los modelos finales. Las fronteras se restringieron en las direcciones vertical y horizontal en la base, y en dirección horizontal en los laterales. El tipo de análisis utilizado fue un análisis plástico.

En este análisis, los rieles y los durmientes se modelaron con un comportamiento elástico lineal, el subbalasto y la subrasante con un modelo constitutivo Mohr-Coulomb, y el balasto con un modelo constitutivo Hardening Soil. Los parámetros para estos materiales se presentan en la Tabla 1 y se obtuvieron de la literatura [7]. La capa de concreto asfáltico se caracterizó con un comportamiento elástico lineal. Se sabe que el módulo de Young de una capa asfáltica depende de la temperatura, siendo mayor a temperaturas bajas y menor a temperaturas altas. Para este análisis, se tomó un valor promedio del módulo de Young de 3000 MPa. La relación de Poisson y el peso específico para la capa de concreto asfáltico fueron 0.35 y 2400 kg/m³, respectivamente.

Tabla 1. Propiedades de los materiales que componen la vía férrea

	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	c (kN/m ²)	ϕ	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ode}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	m, k_0^{nc}, R_f
Riel	31.54	206843	0.15	-	-	-	-	-	-
Durmiente de concreto	25	31026	0.15	-	-	-	-	-	-
Balasto	17.3	275	0.3	0	58.47	21.34	21.34	64.02	0.5, 0.3, 0.9
Sub- Balasto	18.8	138	0.35	0	35	-	-	-	-
Subrasante	18.8	41	0.35	5.5	24	-	-	-	-

5.1 Resultados

Para evaluar la eficiencia de la inclusión de la capa de concreto asfáltico en la mejora del rendimiento de la vía férrea sobre subrasantes compuestas de suelo blando, así como el efecto del espesor de dicha capa, se comparó la distribución de los esfuerzos desviadores en la superficie de la subrasante en un corte transversal a la vía. Este corte se encuentra debajo de las cargas puntuales intermedias y corresponde a la sección con mayores esfuerzos desviadores. Los resultados de esta comparación se presentan en la Figura 3.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

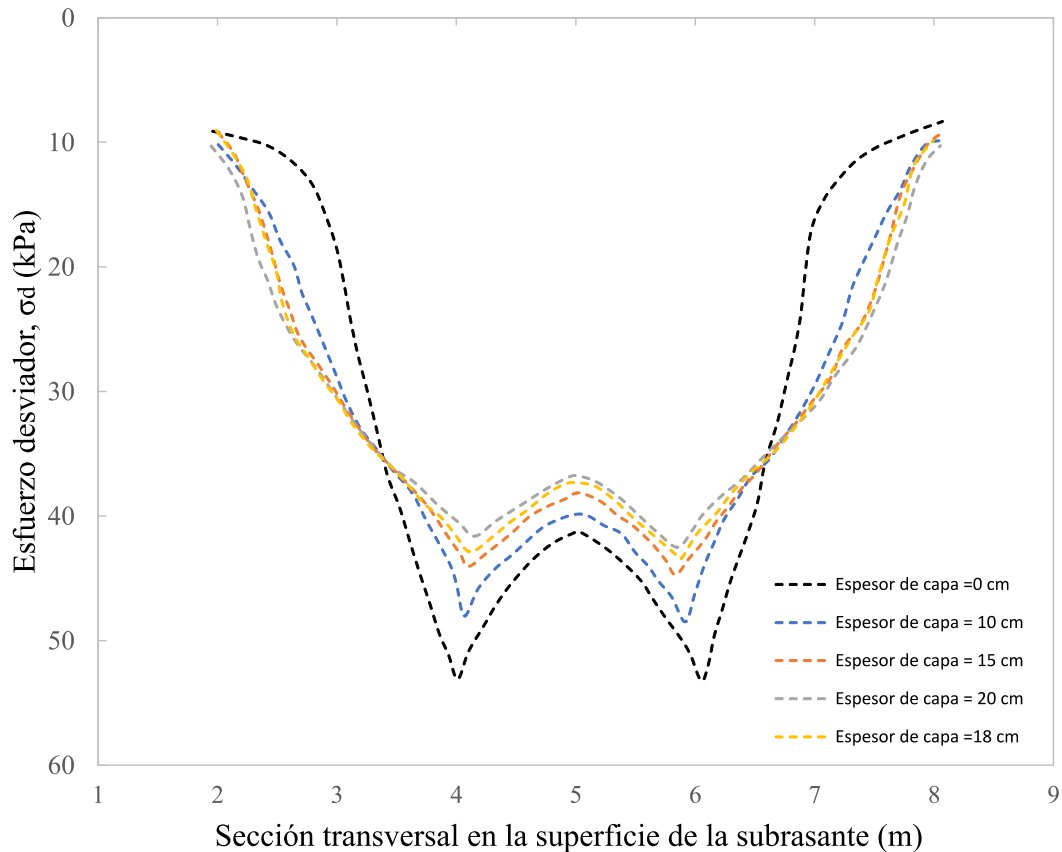


Figura 3. Distribución del esfuerzo desviador en la superficie de la subrasante para distintos espesores de concreto asfáltico.

La Figura 3 muestra que al sustituir parte del subbalasto por una capa de concreto asfáltico, se logra una reducción en los esfuerzos desviadores, la cual se intensifica al aumentar el espesor de dicha capa. Los porcentajes de reducción respecto al esfuerzo desviador máximo en el modelo sin la capa de concreto son de 14%, 20%, 23%, 25%, y 26% para espesores de 10 cm, 15 cm, 18 cm, 20 cm, y 25 cm, respectivamente.

Esto demuestra que la incorporación de una capa de concreto asfáltico produce una reducción notable en los esfuerzos desviadores, y un mayor espesor de la capa genera una disminución adicional. Sin embargo, esta relación no es lineal, llegando a un punto en el que un aumento significativo del espesor no conlleva una reducción igualmente significativa del esfuerzo desviador.

Además, la Figura 3 muestra que con la inclusión y aumento del espesor de la capa de concreto asfáltico, la distribución de los esfuerzos desviadores se vuelve más uniforme, alejándose de la distribución bimodal observada en el modelo sin la capa de concreto, y adquiriendo una forma más suavizada.

El análisis del esfuerzo desviador en la superficie de la subrasante es fundamental, ya que varios autores [7] [8] [9] han identificado este parámetro como el principal factor que provoca fallas bajo carga cíclica, especialmente la falla de corte progresivo. Esta falla, común en suelos blandos, se caracteriza por el desplazamiento gradual del suelo en la superficie de la subrasante debido al cizallamiento y remoldeo provocados por esfuerzos repetidos. Como consecuencia de la falla, se



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

generan deficiencias en el drenaje y se afecta el rendimiento óptimo de la vía férrea [10]. Para prevenir la falla de corte progresivo, es esencial reducir los esfuerzos desviadores en la superficie de la subrasante, siendo la incorporación de una capa de concreto asfáltico una opción viable según los resultados presentados en la Figura 3.

Posteriormente, se compararon los asentamientos obtenidos en la subrasante para el mismo corte transversal del análisis previo, considerando modelos con y sin capa de concreto asfáltico. Estos resultados se presentan en la Figura 4.

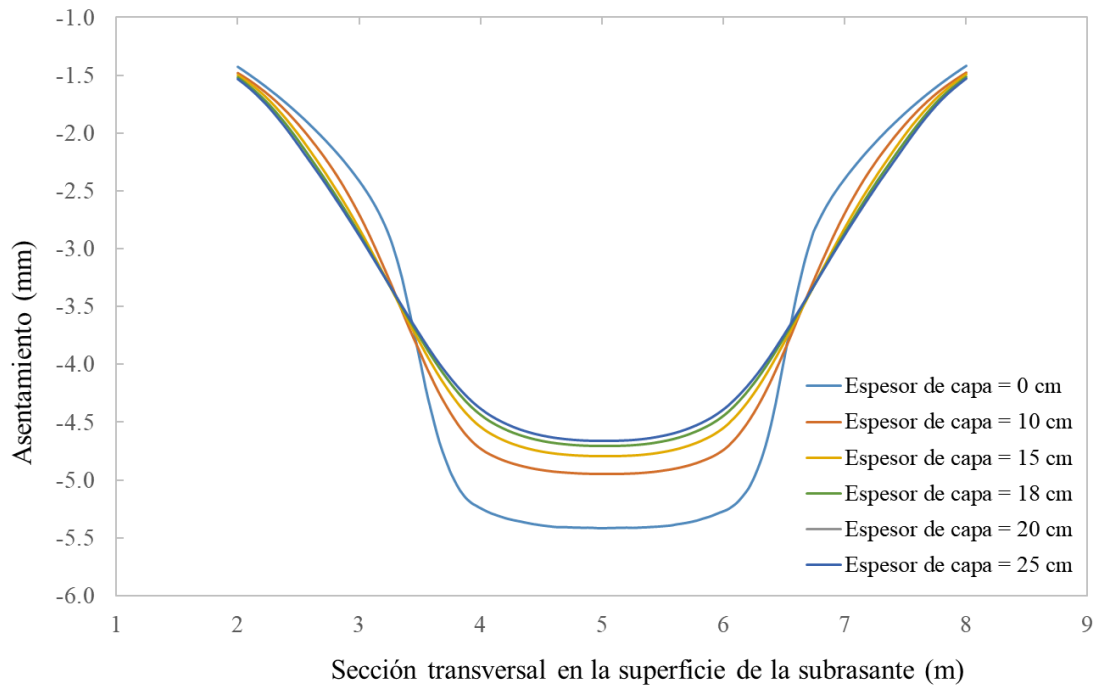


Figura 4. Asentamiento de la subrasante para distintos espesores de la capa de concreto asfáltico.

En la Figura 4 se observa que al reemplazar parte del subbalasto con una capa de concreto asfáltico, los asentamientos de la subrasante disminuyen, y esta reducción se acentúa a medida que aumenta el espesor de la capa de concreto. Los porcentajes de reducción del asentamiento máximo, en comparación con el modelo sin la capa de concreto, son del 9%, 12%, 14%, 15% y 17% para espesores de 10 cm, 15 cm, 18 cm, 20 cm y 25 cm, respectivamente. Es importante destacar que la disminución de los esfuerzos desviadores es mayor que la de los asentamientos en la modelación realizada. Además, el incremento del espesor de la capa de concreto asfáltico favorece una distribución más uniforme de los asentamientos.

El análisis de los asentamientos en la subrasante es fundamental en el estudio de vías férreas, ya que esta capa es la principal fuente de asentamientos en suelos blandos. Estos asentamientos afectan negativamente el rendimiento de la vía de varias maneras. Primero, los asentamientos diferenciales a lo largo de la vía dificultan la circulación de los trenes. Segundo, un aumento excesivo de los asentamientos plásticos, al superar un umbral crítico, puede conducir a una falla por asentamiento plástico excesivo, lo que genera acumulación de balasto en "bolsas de balasto" y formación de elevaciones en los costados de la vía, deteriorando las condiciones de drenaje. Para garantizar el buen funcionamiento y mantenimiento de la vía, es crucial minimizar los asentamientos de la subrasante y



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

mantenerlos por debajo del umbral crítico para evitar la falla por asentamiento plástico excesivo. Según lo presentado en la Figura 4, la incorporación de una capa de concreto asfáltico se presenta como una alternativa viable para este propósito.

Al implementar una capa de concreto asfáltico en una vía férrea, es crucial garantizar su integridad estructural. Cada capa tiene una deformación admisible bajo la cual su comportamiento es adecuado [4]. Por ello, este análisis incluye el estudio de las deformaciones de tensión longitudinales y transversales en la base de la capa de concreto asfáltico, con variación en el espesor de la misma. Los resultados se presentan en la Figura 5.

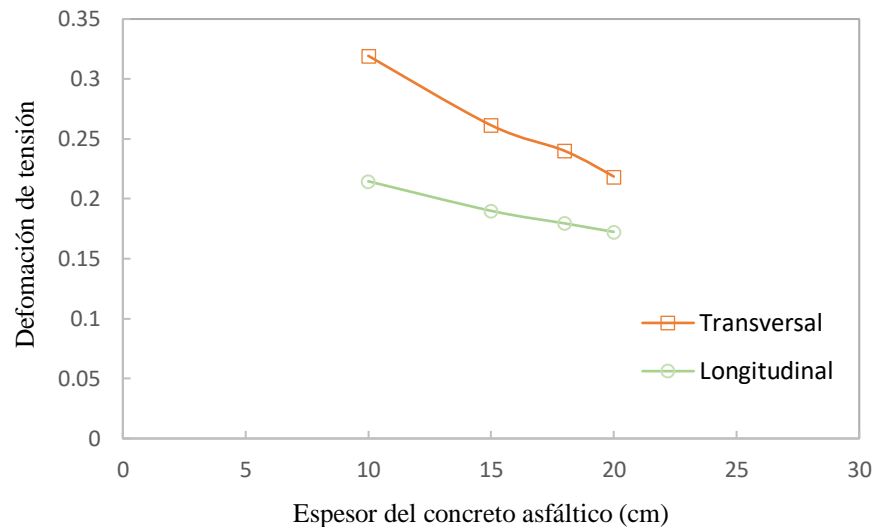


Figura 5. Deformación de tensión en la base de la capa de concreto asfáltico para distintos espesores.

En la Figura 5 se observa que, conforme incrementa el espesor de la capa asfáltica, las deformaciones de tensión máximas tanto longitudinales como transversales disminuyen, con una reducción más acelerada en las deformaciones transversales. Este comportamiento debe considerarse al diseñar el espesor de la capa asfáltica, ya que es crucial garantizar un desempeño óptimo de la capa. Para que su implementación sea efectiva y no cause nuevos problemas, las deformaciones de tensión deben mantenerse por debajo de un valor admisible.

5 Conclusiones

El empleo de una capa de concreto asfáltico mejora significativamente el rendimiento de las vías férreas al reducir tanto los esfuerzos desviadores como los asentamientos en la subrasante. Esta capa también ofrece beneficios adicionales, como la atenuación de las vibraciones generadas por el paso de los trenes, la impermeabilización de la subrasante, y la prolongación de la vida útil de la vía férrea.

A medida que aumenta el espesor de la capa de concreto asfáltico, se observa una disminución en los esfuerzos desviadores y en los asentamientos de la subrasante. Sin embargo, esta reducción es menos pronunciada en comparación con los beneficios iniciales obtenidos al incorporar la capa de concreto asfáltico. Por lo tanto, la determinación del espesor óptimo debe considerar factores como el costo del aumento del espesor y las tensiones inducidas en la base de la capa.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Los análisis revelan que, al incrementar el espesor de la capa de concreto asfáltico, las deformaciones por tensión en su base disminuyen, lo cual es esencial para asegurar el rendimiento óptimo de la capa en la vía férrea.

Además, la rigidez añadida por la capa de concreto asfáltico permite reducir el espesor de la capa granular en comparación con lo necesario al utilizar materiales convencionales, lo que resulta particularmente útil en situaciones con restricciones de altura o profundidad de excavación.

En este estudio, la capa de concreto asfáltico se modeló utilizando un enfoque constitutivo elástico lineal. No obstante, dado que el comportamiento real de esta capa puede diferir de dicho modelo, se recomienda que futuros análisis consideren la caracterización de la capa utilizando modelos constitutivos elastoplásticos o viscoelásticos, según los objetivos específicos del estudio.

3 Referencias

- [1] D. Li, J. Hyslip, T. Sussmann, and S. Chrismer, *Railway Geotechnics*. CRC Press, 2016.
- [2] O. Ghasemi-Fare, T. Wattanapanalai, and A. Roghani, "Evaluating the Effectiveness of Asphalt Layer in Improving Railway Track Stiffness through 3D Numerical Simulations," in *Geo-Congress 2024*, 2024, vol. 3, no. Usace 2018, pp. 266–275.
- [3] A. Roghani and M. T. Hendry, "Quantifying the impact of subgrade stiffness on track quality and the development of geometry defects," *J. Transp. Eng.*, vol. 143, no. 7, pp. 1–10, 2017.
- [4] M. Fang, S. F. Cerdas, and Y. Qiu, "Numerical determination for optimal location of sub-track asphalt layer in high-speed rails," *J. Mod. Transp.*, vol. 21, no. 2, pp. 103–110, 2013.
- [5] J. G. Rose, "Selected In-Track Applications and Performances of Hot-Mix Asphalt Trackbeds," in *2013 Joint Rail Conference*, 2013, pp. 1–10.
- [6] D. Mishra, S. Sharma, A. Shrestha, D. Li, and C. Basye, "GEOTRACK-2015: AN UPGRADED SOFTWARE TOOL FOR RAILROAD TRACK ANALYSIS," *Proc. 2016 Jt. Rail Conf. JRC2016*, pp. 1–10, 2016.
- [7] B. Indraratna, W. Salim, and C. Rujikiatkamjorn, *Advanced rail geotechnology - Ballasted track*. 2011.
- [8] M. A. Sayeed and M. A. Shahin, "Design of ballasted railway track foundations using numerical modelling. Part I: Development1," *Can. Geotech. J.*, vol. 55, no. 3, pp. 353–368, 2018.
- [9] D. Li and E. T. Selig, "Cumulative Plastic Deformation for Fine-Grained Subgrade Soils," *J. Geotech. Eng.*, vol. 122, no. 12, pp. 1006–1013, 1996.
- [10] D. Li and E. T. Selig, "Method for Railroad Track Foundation Design I: Development," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 124, no. April, pp. 316–322, 1998.