

Análisis de los Factores que Favorecen el Desarrollo de Top-Down Cracking en Pavimentos Asfálticos Mediante Modelos de Elementos Finitos

Guerra, Rodrigo^{1,*} ; Gallardo, Rosario¹ ; Monroy, Marian¹ ; Sáez, Reinaldo¹ 

¹Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, La Serena, Chile

Resumen: Estudios han reportado la aparición prematura de grietas en la superficie del pavimento en sentido descendente. Los métodos de diseño de pavimentos consideran el ahuellamiento y el agrietamiento ascendente de la capa asfáltica y no se considera el agrietamiento descendente. La solución conceptual es el aumento de espesor de la capa asfáltica, pero esto no afecta significativamente las tensiones de corte y tracción generadas en la superficie. El objetivo de este trabajo es analizar los factores que favorecen el desarrollo de Top-Down Cracking (TDC) en pavimentos asfálticos mediante modelos de elementos finitos. Se han modelado vías locales chilenas en el software ANSYS y se ha considerado la variación de factores como el módulo de elasticidad de la capa asfáltica, la presión de inflado de los neumáticos y el espesor de la capa de rodado. Se han estudiado las tensiones y deformaciones producidas en la capa asfáltica y se han relacionado con cada una de las variables. Los resultados muestran un bajo impacto del aumento de espesor de la capa asfáltica en la reducción de las tensiones máximas de tracción y corte que producen el agrietamiento TDC. Lo anterior, se repite para valores mayores del módulo de elasticidad, lo que acelera la formación de TDC. Así también, para las distintas presiones de inflado, se observa que en capas de mayor espesor los valores de las tensiones tienden a ser más cercanos entre sí y la presión de inflado deja de tener mayor incidencia en los resultados.

Palabras clave: Top-Down Cracking, Agrietamiento por fatiga, Pavimentos asfálticos, Elementos Finitos, Deterioro de Pavimento

Analysis of the Factors that Favor the Development of Top-Down Cracking in Asphalt Pavements Using Finite Element Models

Abstract: Studies have reported the premature appearance of cracks on the pavement surface in the downward direction. Pavement design methods consider rutting and bottom-up cracking of the asphalt layer and Top-Down Cracking is not considered. The conceptual solution is to increase the thickness of the asphalt layer, but this does not significantly affect the shear and tensile stresses generated on the surface. The aim of this work is to analyze the factors that favor the development of Top-Down Cracking (TDC) in asphalt pavements using finite element models. Local Chilean roads have been modeled in the ANSYS software and the variation of factors such as the elastic modulus of the asphalt layer, tire inflation pressure and the thickness of the road layer have been considered. The stresses and deformations produced in the asphalt layer have been studied and have been related to each of the variables. The results show a low impact of increasing the thickness of the asphalt layer on the reduction of the maximum tensile and shear stresses that produce TDC. The above is repeated for higher values of the elastic modulus, which accelerates the formation of TDC. Likewise, for the different inflation pressures, it is observed that in thicker layers, the stress values tend to be closer to each other and the inflation pressure no longer has a greater impact on the results.

Keywords: Top-Down Cracking, Fatigue cracking, Asphalt pavements, Finite elements, Pavement distress

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos asfálticos requieren de importantes costos de mantención durante la vida útil para asegurar su durabilidad (Alae et al., 2020; Ling et al., 2019). Los factores

medioambientales producen envejecimiento de las mezclas asfálticas y generan daño en el pavimento, lo que reduce la capacidad de servicio y acelera el deterioro de los pavimentos asfálticos. Con ello, se aumentan los costos de mantención o conservación (Alae et al., 2020; Ling et al., 2019; Pirmohammad & Majd-Shokorlou, 2020).

*rguerra@userena.cl

Recibido: 21/11/2024

Aceptado: 25/03/2025

Publicado en línea el 31/05/2025

10.33333/rp.vol55n2.02

CC BY 4.0

Durante su vida útil, los pavimentos presentan distintos tipos de deterioros como ahuellamiento, agrietamientos longitudinales y transversales, baches, entre otros (Yilmaz & Sargin, 2012). El agrietamiento por fatiga inducido por cargas de tráfico repetitivas, es uno de los principales problemas en el diseño y análisis de pavimentos flexibles (Gu et al., 2018). Estas grietas por fatiga comienzan como elementos independientes y adyacentes, las que son propensas a conectarse y forman grietas de tipo cocodrilo (El-Basyouny & Witczak, 2005).

Tradicionalmente, el agrietamiento por fatiga del pavimento de asfalto se modela como un agrietamiento desde abajo hacia arriba o ascendente (Bottom-Up Cracking “BUC” en inglés) que se inicia en el fondo de la capa de asfalto y se propaga hacia arriba (Zhao et al., 2018). Por ello, la mayoría de los métodos de diseño de pavimentos asfálticos suponen que la deformación por tracción, en el fondo de la capa de asfalto, es la respuesta crítica del pavimento que causa agrietamiento por fatiga (Gu et al., 2018; Zhao et al., 2018).

Es por ello, que un pavimento de larga duración está diseñado para reducir la deformación por tracción en el fondo de la capa de asfalto al aumentar el espesor de la capa de rodado, lo que genera un sistema de pavimento robusto. Al usar este concepto, el pavimento asfáltico diseñado tiene una alta resistencia al agrietamiento ascendente por fatiga (Gu et al., 2018; Ling et al., 2020). Sin embargo, de acuerdo a estudios recientes, el agrietamiento descendente o generado desde arriba hacia abajo (Top-Down Cracking “TDC” en inglés) es reconocido como uno de los modos de deterioro predominantes en la falla de pavimentos flexibles (Dinegdae & Birgisson, 2018; Ling et al., 2019; Ling et al., 2020). Esta grieta se inicia próximo a la superficie del pavimento y luego se propaga hacia abajo (Pirmohammad & Majd-Shokorlou, 2020). Este mecanismo no puede ser explicado completamente con el enfoque de análisis convencional de pavimentos (Ling et al., 2020).

En la Figura 1, se pueden ver los puntos críticos analizados tradicionalmente en el diseño de pavimentos asfálticos y también, se muestran los puntos que la literatura reporta como asociados a TDC.

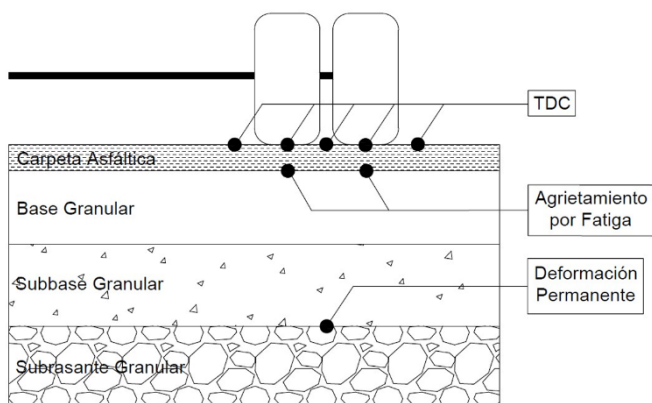


Figura 1. Puntos críticos a analizar en la simulación

El agrietamiento descendente (TDC) en los pavimentos asfálticos se inicia en la superficie y reduce la capacidad de

servicio del pavimento, al permitir que el agua penetre en la estructura y con ello se acelera el deterioro del pavimento (Ling et al., 2019; Zhao et al., 2018). Por ello, se ha generado una gran cantidad de conocimiento como resultado de los estudios internacionales realizados para comprender el mecanismo de generación del agrietamiento TDC y así proponer medidas para prevenir, mitigar y rehabilitar este tipo de deterioro (Wen & Bhusal, 2015; Wu & Muhunthan, 2019). Estudios recientes han demostrado que el agrietamiento TDC es uno de los principales tipos de deterioros del pavimento de asfalto (Zhao et al., 2018).

Numerosos estudios se han realizado para investigar los mecanismos de agrietamiento por fatiga TDC en pavimentos asfálticos. Estos estudios se han enfocado en explicar las bases del agrietamiento TDC mediante trabajos de laboratorio, se han estudiado las mezclas asfálticas que se utilizan en caminos o se han desarrollado campañas de terreno para correlacionar los aspectos teóricos con su desempeño en terreno (Gu et al., 2018; Ling et al., 2019; Zhao et al., 2018).

Otros autores han estudiado el efecto del tráfico de camiones y la generación de tensiones críticas en la superficie del pavimento como responsable del fenómeno de agrietamiento TDC (Dinegdae & Birgisson, 2018). El desarrollo de modelos estructurales de pavimentos mediante elementos finitos ha permitido estudiar el comportamiento de tensiones y deformaciones en la capa asfáltica de rodado (Pirmohammad & Majd-Shokorlou, 2020).

No obstante, el amplio campo de estudio de pavimentos asfálticos aún carece de una buena comprensión de las grietas TDC (Wen & Bhusal, 2015; Wu & Muhunthan, 2019). Específicamente, no se ha llegado a un acuerdo para explicar la causa del agrietamiento TDC o se ha desarrollado un modelo exitoso para predecir su ocurrencia y crecimiento (Ling et al., 2020; Wen & Bhusal, 2015; Zhao et al., 2018). Esta falta de una estrategia definitiva para mitigar el agrietamiento TDC, probablemente, se deba al hecho de que se ha informado de grietas TDC en diferentes zonas climáticas, como también para pavimentos con capas asfálticas gruesas o delgadas y se han utilizado bases blandas o rígidas, lo que ha generado grietas longitudinales o grietas interconectadas, las que se reportan dentro o fuera de la trayectoria de la rueda (Wen & Bhusal, 2015; Wu & Muhunthan, 2019).

El mecanismo principal de generación de agrietamiento TDC son las tensiones y deformaciones de tracción repetitivas, inducidas en la parte superior de la estructura del pavimento a partir de la combinación de la carga de tráfico, la temperatura y el envejecimiento (endurecimiento) del aglomerante de asfalto, lo que puede causar contracción y rigidez diferencial entre la superficie del asfalto y la interfaz de la capa base (Alae et al., 2020; Svasdisant et al., 2002; Zhao et al., 2018).

La primera etapa de un agrietamiento TDC consiste en una única grieta longitudinal corta que aparece justo fuera de la trayectoria de la rueda. Con el tiempo, el agrietamiento TDC crece en una segunda etapa en la cual las grietas cortas longitudinales se alargan y las grietas hermanas se desarrollan paralelas y dentro de 0,30 a 1,00 m de la grieta original.

Finalmente, el agrietamiento TDC evoluciona hacia una tercera etapa en la cual las grietas longitudinales paralelas están conectadas a través de cortos TDC transversales (Svasdisant et al., 2002).

En las Figuras 2 y 3, se muestran algunos ejemplos del efecto del agrietamiento TDC en pavimentos asfálticos. La Figura 2 corresponde a secciones de estudio presentadas en el trabajo de Gu et al. (2018), donde se puede ver el daño de grietas TDC transversales y longitudinales en la dirección de la trayectoria del vehículo. En la Figura 3, tomada del trabajo de Harmelink et al. (2008), se puede ver la generación de la grieta desde la superficie y que se propaga hacia las capas inferiores.

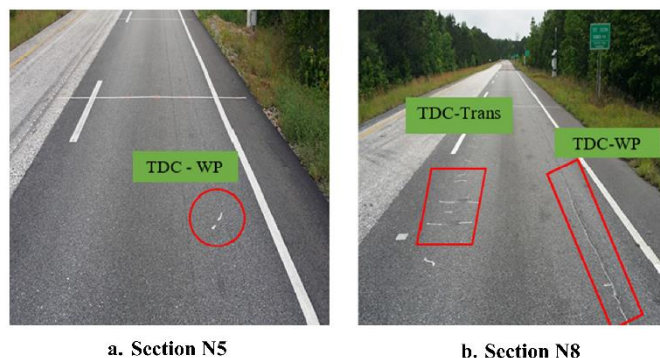


Figura 2. Condiciones superficiales en distintas secciones presentadas por Gu et al. (2018)



Figura 3. Testigo de pavimento existente con grieta típica TDC presentado por Harmelink et al. (2008)

El agrietamiento TDC generalmente se clasifica en dos grupos: a) TDC relacionado con la construcción, que se atribuye a la segregación de la mezcla asfáltica o la pérdida de enlace entre las capas asfálticas; y b) TDC relacionado con la carga, que se debe a los esfuerzos de contacto del pavimento con el neumático y los efectos del envejecimiento del asfalto (Gu et al., 2018; Ling et al., 2019).

Los investigadores han utilizado el método de elementos finitos para analizar los esfuerzos longitudinales y laterales en las bandas de rodadura de los neumáticos y descubrieron que existen esfuerzos o deformaciones de tracción en la superficie del pavimento, que pueden causar grietas TDC (Gu et al., 2018; Pirmohammad & Majd-Shokorlou, 2020; Zhao et al., 2018).

El objetivo del presente trabajo es analizar los factores que favorecen el desarrollo del deterioro Top-Down Cracking

(TDC) en pavimentos asfálticos mediante modelos de elementos finitos.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA SOBRE TOP-DOWN CRACKING (TDC)

No es hasta los años 80s que los investigadores comienzan a considerar seriamente el fenómeno Top-Down Cracking en pavimentos asfálticos (Wu & Muhunthan, 2019). La revisión de la literatura asociada al agrietamiento TDC nos permite advertir que en las últimas décadas se han desarrollado numerosos estudios que han investigado los mecanismos de agrietamiento por fatiga TDC en pavimentos asfálticos tanto en laboratorio, en terreno o a través de modelos numéricos.

Estudios realizados por autores como Harmelink et al. (2008), Zhao et al. (2018), entre otros, se centraron en la investigación de los mecanismos de agrietamiento por fatiga TDC de pavimentos asfálticos. Harmelink et al. (2008) observaron que las grietas TDC parecían ser rectas y paralelas a la carretera y de menor gravedad que las grietas reflejadas. El estudio concluye que se debe hacer cambios en el proceso de diseño de la mezcla, así como aumentar el contenido de cemento asfáltico en la mezcla, lo que parece reducir el potencial de segregación. Zhao et al. (2018) estudiaron los mecanismos de agrietamiento TDC en función de la deformación por tracción horizontal en la superficie. Los resultados mostraron que la deformación horizontal en la dirección longitudinal (Dirección del tráfico) en la superficie del pavimento está en compresión, pero puede producirse una importante mancha horizontal de tracción en la dirección transversal, que es una de las principales causas del agrietamiento TDC. También, observaron que la ubicación crítica de la deformación por tracción está justo afuera de los bordes del neumático.

Dinegdæ y Birgisson (2018) investigaron los efectos del tráfico de camiones en el desempeño del agrietamiento por fatiga TDC de pavimentos flexibles, para ello utilizaron un nuevo marco de análisis basado en la mecánica. Este trabajo integró los espectros de carga por eje y sus parámetros asociados y estableció su impacto en el desarrollo de agrietamiento por fatiga del concreto asfáltico mediante la evaluación de varias secciones de pavimento en terreno. Los autores concluyeron que la caracterización del tráfico en los espectros de carga por eje tiene la mayor influencia en el desarrollo previsto del agrietamiento por fatiga TDC.

Alae et al. (2020) realizaron estudios sobre los efectos de las condiciones de la interfaz de la capa asfáltica en el agrietamiento por fatiga TDC. Concluyeron que para pavimentos de gran espesor con base granular, el efecto de la interfaz de capas completamente unidas es vulnerable a agrietamiento TDC a alta temperatura. Para el pavimento delgado, la pérdida de unión entre la capa asfáltica y la base granular produce la mayor deformación horizontal, mientras que, en el pavimento grueso, la unión de la interfaz entre las capas de concreto asfáltico conduce a la deformación horizontal más crítica. Ling et al. (2019) desarrollaron un modelo basado en mecánica calibrada para el agrietamiento TDC de pavimentos asfálticos. Este trabajo permitió desarrollar un modelo empírico-mecanicista para

agrietamiento TDC de pavimentos asfálticos para predecir el tiempo de inicio de grietas y la vida útil previa a la fatiga. Además, en este estudio se simuló efectivamente las características de envejecimiento de terreno. Se identificó una conexión entre la apariencia y el crecimiento del agrietamiento TDC de baja gravedad y el aumento del crecimiento del agrietamiento de tipo cocodrilo, lo que indica que el agrietamiento TDC es el precursor del agrietamiento por fatiga.

En la misma línea, el estudio de Gu et al. (2018) propone un modelo de inicio de grietas TDC basado en energía para grietas relacionadas con la carga en el pavimento asfáltico. A través de un modelo tridimensional de elementos finitos, se identificaron las respuestas críticas del pavimento relacionadas con el TDC, que incluían la tensión de corte en el borde del neumático relacionado con el agrietamiento longitudinal de la trayectoria de la rueda, la tensión de tracción en la dirección transversal relacionado con el agrietamiento longitudinal fuera de la trayectoria de la rueda y la tensión de tracción en la dirección longitudinal relacionada con el agrietamiento transversal inducido por la carga. Los resultados de la predicción indicaron que el TDC siempre se inicia primero en la trayectoria de la rueda longitudinal. El agrietamiento longitudinal fuera de la trayectoria de la rueda tiene una vida de inicio comparable al agrietamiento transversal. Wu et al. (2019) trabajaron en el estudio del desempeño en terreno del agrietamiento por fatiga TDC para pavimentos asfálticos. Los autores concluyeron que una mayor deformación por falla vertical, resultó en una mejor resistencia al agrietamiento TDC para los pavimentos asfálticos. También establecieron que se tienen valores de resistencia al corte relativamente bajos para el aglomerante asfáltico para la resistencia al agrietamiento TDC.

Canestrari & Ingrassia (2020) realizaron una revisión del agrietamiento TDC en pavimentos asfálticos: causas, modelos, herramientas experimentales y desafíos futuros. En este estudio, se plantea la necesidad de realizar la identificación de un método de prueba confiable y factible para estudiar el desempeño del TDC de mezclas asfálticas y la implementación del TDC en sistemas de gestión de pavimentos a través de la definición de criterios para el reconocimiento del TDC en el campo, así como para la evaluación de la profundidad de la rehabilitación. Posteriormente, Canestrari et al. (2022) trabajaron en el desarrollo de un modelo semiempírico para la predicción de la evolución de la profundidad del TDC para pavimentos de asfalto grueso con capa de fricción de pendiente abierta. Para ello se tomaron una serie de núcleos de diferentes pavimentos de autopistas italianas afectados por TDC y se analizaron en laboratorio. El modelo propuesto, desarrollado sobre la base de los resultados ya disponibles en la literatura y de las conclusiones de la investigación de laboratorio, predice la evolución de la profundidad del TDC en función de las cargas de tráfico aplicadas. Este modelo se puede utilizar en sistemas de gestión de pavimentos para planificar reparaciones de superficies debido a TDC de manera oportuna, lo que minimiza así los daños al pavimento y los costos de mantenimiento.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó una metodología de Modelado y Simulación Numérica para representar un problema de Ingeniería como es la determinación de tensiones y deformaciones en pavimentos asfálticos. Esta metodología implica el uso de técnicas matemáticas y computacionales, como el Método de los elementos finitos (FEM), para desarrollar y resolver modelos numéricos que describen el comportamiento del pavimento. Con este fin, se define la estructura de pavimentos y las cargas del sistema y se crea un modelo matemático que describe el comportamiento del pavimento. La resolución numérica se realiza a través de un software de elementos finitos como es ANSYS y los resultados obtenidos se analizan y visualizan para comprender el comportamiento de la capa de rodado.

El Método de Elementos Finitos (MEF) fue en un comienzo desarrollado en el campo de la ingeniería estructural por los trabajos de Hrennikoff en 1941 y McHenry en 1943, quienes propusieron el uso de líneas unidimensionales para representar elementos como barras o vigas para el cálculo de tensiones en sólidos con sección transversal continua. Posteriormente, el matemático Richard Courant en 1943, utilizó el Método de Rayleigh-Ritz de análisis numérico y minimización de las variables de cálculo para obtener soluciones aproximadas en un sistema de vibración. Poco después, en 1956, M. J. Turner publicó un documento que establecía una definición más amplia del método numérico, centrado en la rigidez y deformación de estructuras complejas. Con ello se logra la implementación de matrices de rigidez para la determinación de armaduras, elementos conformados por vigas y otros cuerpos bidimensionales llamándolo “El Método directo de Rigidez”. Paralelamente, a mediados de los años 50, Zienkiewicz motivado por la formulación específica de elementos para esfuerzo plano, comenzó a investigar elementos relacionados con sólidos, placas curvas y otras formas estructurales, por lo cual se plantean entonces los primeros sistemas de ecuaciones de equilibrio de estructuras (Zienkiewicz & Taylor, 1994).

Para la década del 60, cuando las aplicaciones prácticas de elementos finitos crecieron en tamaño, los requerimientos de tiempo de cálculo y memoria de los ordenadores también crecieron, desarrollándose algoritmos más eficientes para la resolución de sistemas de ecuaciones, produciéndose un mayor ahorro de tiempo y con ello se extendió el uso de los métodos matriciales. Sin embargo, surgen dificultades para estructuras continuas y con geometrías complejas, por lo que comienzan a desarrollarse nuevas técnicas que dan lugar al Método de Elementos Finitos (Linero Segrera et al., 2013; Murillo Martínez, 2018; Olmedo Salazar, 2015; Pezzotti & Antico, 2008; Useche, 2014).

Hasta la fecha han surgido varios softwares de elementos finitos para la resolución de problemas estructurales y con aplicaciones en el área pavimentos. En ese grupo de softwares de elementos finitos están Abaqus, Nastran, EverStress y ANSYS, entre otros.

ANSYS cuenta con herramientas de análisis de elementos finitos, lo que hace posible personalizar y automatizar sus

simulaciones, al permitir el análisis de varios escenarios de un proyecto dado. Además, este software se conecta fácilmente a otras herramientas de análisis, lo que proporciona más realismo al comportamiento y desempeño de productos. Por otra parte, el área de mecánica estructural del software denominada “ANSYS Mechanical”, posee una tecnología de mallado inteligente que permite obtener una malla ideal para cada modelo debido a los algoritmos automáticos e inteligentes que garantiza que se generen mallas de alta calidad (ANSYS, 2022).

Para estudiar el comportamiento de distintos factores asociados al agrietamiento TDC, se ha modelado en el software ANSYS una estructura de pavimento correspondiente a una vía local chilena de capa delgada, que tradicionalmente es diseñada para 200 000 ejes equivalentes y tiene una estructura de pavimento compuesta por una capa asfáltica de rodado, una base granular, una subbase granular y estas capas se apoyan sobre una subrasante. Como elemento de subrasante se ha considerado un material que posee un CBR de diseño de 15 % (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2018). Lo anterior, corresponde a una vía de capa delgada para bajo tránsito y la estructura de pavimento es la correspondiente a vías urbanas basada en el diseño del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile. Esta estructura de pavimento se muestra en la Figura 4.

Se ha incluido el espesor de la capa asfáltica como un elemento de estudio del comportamiento de los factores que favorecen el desarrollo de TDC, para tal efecto, se ha considerado en los modelos un aumento gradual del espesor de la capa asfáltica desde 40 a 70 mm.

3.1 Propiedades de los materiales

Los valores definidos para el módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica para cada espesor en condiciones originales, y de envejecimiento se expresan en la Tabla 1. Cabe destacar que los datos originales corresponden a mezclas asfálticas recién colocadas y se encuentran dentro del intervalo de referencia que reporta la literatura, ya que para una vía local este valor varía entre 1 200 y 4 800 MPa y los datos envejecidos corresponden a aquellas mezclas que se encuentran en uso durante un espacio temporal de 15 a 20 años. Además, en los cálculos posteriores en el software ANSYS, también se considerará el valor medio entre módulos originales y envejecidos para obtener curvas más representativas de los cambios que sufren los pavimentos a través del tiempo.

Tabla 1. Módulos de elasticidad para la carpeta asfáltica

Espesor Carpeta Asfáltica mm	Módulo de Elasticidad Original MPa	Módulo de Elasticidad Envejecido MPa
40	3 360	4 330
50	3 380	4 360
60	3.410	4 400
70	3 440	4 430

Los valores del módulo de elasticidad original y envejecido fueron calculados, utilizando el procedimiento descrito por

Shell basado en la relación entre las propiedades del asfalto con la composición volumétrica de la mezcla. Para este trabajo, se utilizó el software BANDS 2.0 de Shell. Este software tiene una precisión comprobada mediante amplias mediciones en un gran número de mezclas asfálticas (Huang, 2004; Teltayev & Radovskiy, 2018).

Para el Coeficiente de Poisson, en general, se permite el uso de valores típicos en el análisis de pavimentos. Este valor para mezclas asfálticas ha sido estimado basado en las características de los materiales que la componen, así como las de la propia mezcla y la temperatura de la misma. El rango de valores generalmente utilizado del coeficiente de Poisson para mezclas asfálticas es de 0,30 a 0,40, siendo el valor típico 0,35, que es el que se utiliza en este estudio (Corona, 2017; Vila et al., 2021). A pesar de que el coeficiente de Poisson es un valor requerido para el cálculo del modelo de respuesta estructural, el efecto en el cálculo de la respuesta del pavimento no es muy significativo (Rodríguez Calderón & Pallares Muñoz, 2005).

En la misma línea, Gu et al. (2018) realizan una amplia revisión de los parámetros que caracterizan el envejecimiento de mezclas asfálticas e incluye un apartado sobre un modelo de envejecimiento de la rigidez del asfalto. Este modelo determina el Módulo de la mezcla en función de las variaciones de las propiedades del material, estableciendo para todo su estudio un valor del módulo de Poisson de 0,35 y es el que ha sido considerado en la mezcla asfáltica envejecida (Gu et al., 2018).

En la Figura 4, se muestra un esquema con la estructuración del pavimento y las propiedades mecánicas de cada una de las capas de la vía. Se considerará un ancho y largo de la sección a simular de 2 m. Además, los modelos contarán con una altura correspondiente a la suma de los espesores de las capas granulares, es decir, 15 cm para la base y subbase respectivamente, y 50 cm para la subrasante semi-infinita, que se mantendrán constantes en todos los modelos. La capa de rodadura es la que variará desde los 4 cm, que es el espesor de diseño mínimo exigido, hasta los 7 cm de espesor, con el fin de evaluar su impacto.

3.2 Modelo de elementos finitos en ANSYS

Para realizar la modelación del pavimento asfáltico, se ha utilizado el software ANSYS Workbench y se ha dibujado la geometría en la interfaz gráfica Design Modeler de ANSYS. Se han ingresado los materiales, geometrías y demás parámetros involucrados en el estudio para luego generar un adecuado mallado y su posterior resolución.

Cabe destacar, que para refinar la malla existen dos enfoques, uno global y otro local. El enfoque global se basa en refinar todo el modelo y el enfoque local, que se recomienda sobre todo cuando se presentan limitaciones de cómputo y software, es mucho más eficiente con la incorporación de elementos en las zonas donde realmente interesa una malla mucho más fina en las zonas detectadas como críticas. En el presente análisis, estas zonas críticas, se encuentran en el centro del modelo, justo debajo de las áreas que simulan la presión de contacto de los neumáticos del vehículo y se extienden por todas las capas

del pavimento, donde se definió un mallado más fino y una malla menos densa en los bordes de las capas del modelo.

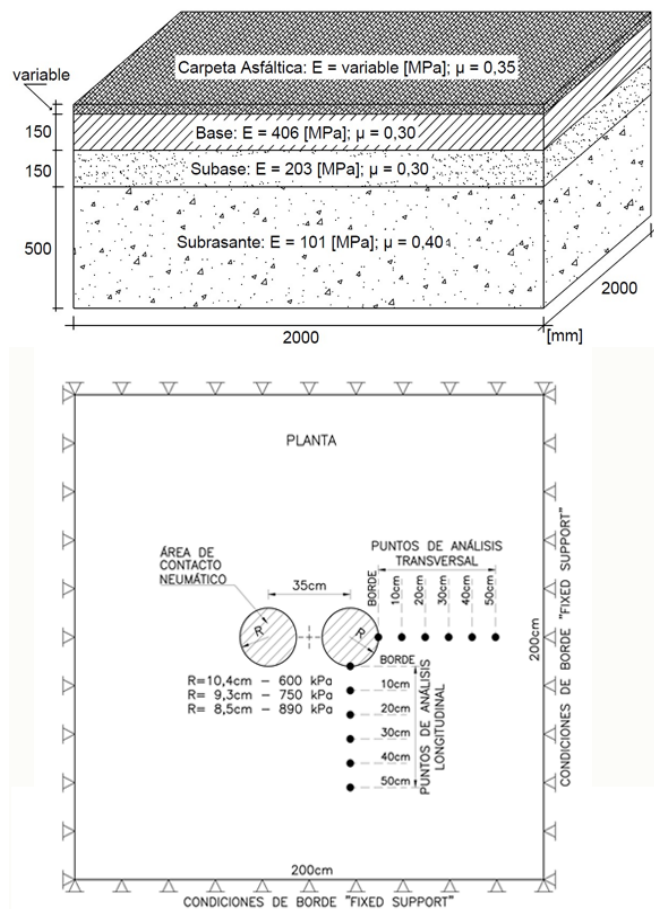


Figura 4. Estructura y propiedades del pavimento a simular

Las dimensiones del modelo elástico se eligieron con el fin de que los efectos de las condiciones de borde no fueran influyentes en los resultados. Se consultaron modelos realizados por otros autores y se definieron las dimensiones utilizadas en este estudio como 2,00x2,00 m (Rodríguez Calderón & Pallares Muñoz, 2005). Los modelos se confinaron lateralmente, al igual que en la base del modelo, ya que las dimensiones no afectan al desarrollo del bulbo de presiones. Para ello, se consideró como condición de borde un “Fixed Support” restringiendo tres grados de libertad por nodo, que corresponden a los desplazamientos en X, Y y Z, sin considerar restricciones en las rotaciones en su formulación basado en el tipo de elemento finito utilizado.

Finalmente, para definir la malla adecuada se ha utilizado un criterio de optimización donde se puede aplicar una regla para que el error relativo del análisis de convergencia sea menor o igual a una tolerancia del 5 %, así es posible reportar los resultados con la última malla refinada del análisis. A medida que se refina la malla, la cantidad de nodos converge a un valor y las tensiones se moverán dentro de un intervalo de valores muy estrechos, considerándose válido y representativo del estudio.

La convergencia del modelo se evaluó por el cambio en el valor de las tensiones de Von Mises, ya que este valor crítico

combina los esfuerzos principales obtenidos en cada modelo y se acotó la tolerancia de las variaciones de dichos resultados. El análisis de convergencia permitió construir la Figura 5.

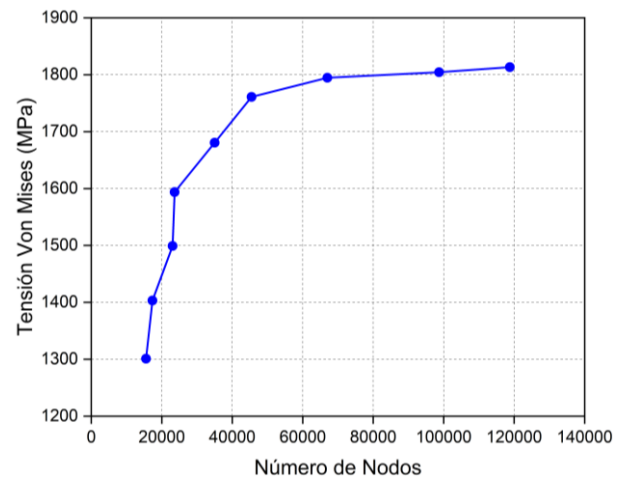


Figura 5. Análisis de convergencia Tensiones

De esta forma, el tamaño de los elementos que componen la malla de la carpeta asfáltica interna será de 40 mm y externa de 50 mm, de la base granular interna será de 50 mm y externa 60 mm, mientras que los elementos de la subbase y subrasante granular interna tendrán las mismas dimensiones y serán de 60 mm y externa de 70 mm. Además, las huellas de los neumáticos tendrán un mallado con elementos de 40 mm. Al considerar estas dimensiones, la cantidad de elementos generados por el software asciende a 16 000 con 88 000 nodos aproximadamente. En definitiva, el análisis de convergencia es una práctica obligatoria para garantizar que la malla no tiene influencia en los resultados, ya que estos tienden o convergen a un valor determinado.

3.3 Tensiones estudiadas en los Modelos de elemento finito

En la siguiente sección, se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el software ANSYS, para luego hacer una comparación de los modelos de pavimentos. Se realizarán las comparaciones entre modelos para analizar su comportamiento mecánico en base a los valores máximos y mínimos. Para facilitar el análisis, se realizó un corte transversal justo al centro de todos los modelos, el que atraviesa las áreas que representan los neumáticos, para estudiar internamente la reacción en todas las capas de los pavimentos, en la cual se observan los puntos de mayor interés para la presente investigación.

- Tensión Horizontal

Las tensiones horizontales se consideraron en la dirección del eje Z, se genera concentración de tensiones de compresión en la carpeta asfáltica bajo la zona de aplicación de carga hasta la parte inferior de esta y que también, se generan tensiones de tracción en la interfaz carpeta asfáltica-base granular y en la superficie del pavimento. Dicha situación se puede observar en la Figura 6, donde se indica en color rojo las máximas tracciones generadas en la interacción indicada y que, según la literatura estudiada, son los puntos claves a analizar ya que favorecen el desarrollo de los deterioros asociado al

agrietamiento por fatiga. Asimismo, es importante destacar las zonas que se observan en amarillo en la Figura 7, ubicadas entre las áreas de neumáticos y a los costados de estos, ya que son tensiones de tracción generadas en la superficie del pavimento y que favorecen el desarrollo del fenómeno denominado TDC.

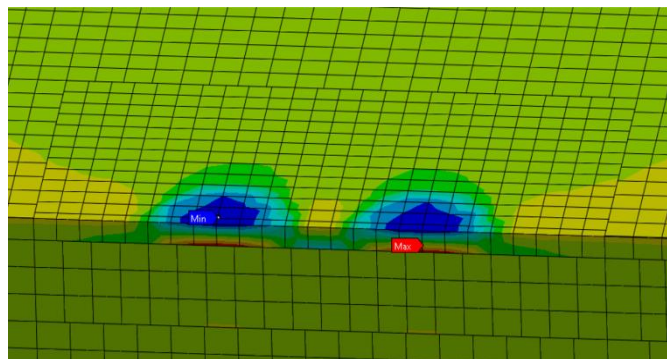


Figura 6. Detalle de tensiones horizontales producidas en la capa asfáltica

- Tensión de Corte

Las tensiones de corte calculadas tienen en consideración solo los sólidos que componen el pavimento. Esto debido a que la evaluación de las tensiones cortantes en la carpeta asfáltica a nivel de superficie es muy importante en la predicción de daños de la vía como el TDC. En la Figura 7 a), se observa que se genera una mayor acumulación de tensiones en la carpeta asfáltica y actúan de manera casi simétrica bajo cada huella de los neumáticos, por lo cual las tensiones producidas son relativamente equivalentes para cada uno de ellos, a pesar de tener un comportamiento independiente. Igualmente, en la vista en planta de la Figura 7 b), se puede ver de mejor forma que la respuesta crítica del pavimento aglomera tensiones en la superficie, en los bordes de las ruedas. Esto reafirma lo planteado anteriormente, que son los puntos relevantes a estudiar y comparar en los modelos simulados en el software ANSYS, ya que es el principal motivo que origina el TDC junto con las tensiones de tracción en la superficie de la carpeta de rodadura.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Asociado al envejecimiento de la mezcla asfáltica, se produce un cambio en la composición y comportamiento reológico del betún, que se caracteriza por el endurecimiento de este y genera dos efectos, por un lado, incrementa la capacidad de soporte de cargas, y por otro, aumenta la resistencia a la deformación de la mezcla, lo que produce un aumento de la rigidez del pavimento. Aunque el aumento de la rigidez hace que el material envejecido muestre menores deformaciones permanentes bajo cargas de tráfico, la pérdida de ductilidad de la mezcla la vuelve más propensa a daños por fatiga y pérdida de su potencial de recuperación. Por lo tanto, a pesar de que la deformación del material envejecido es más pequeña, estos pavimentos fallan más rápido como resultado de la fisuración por fatiga (López Montero & Miró Recasens, 2015).

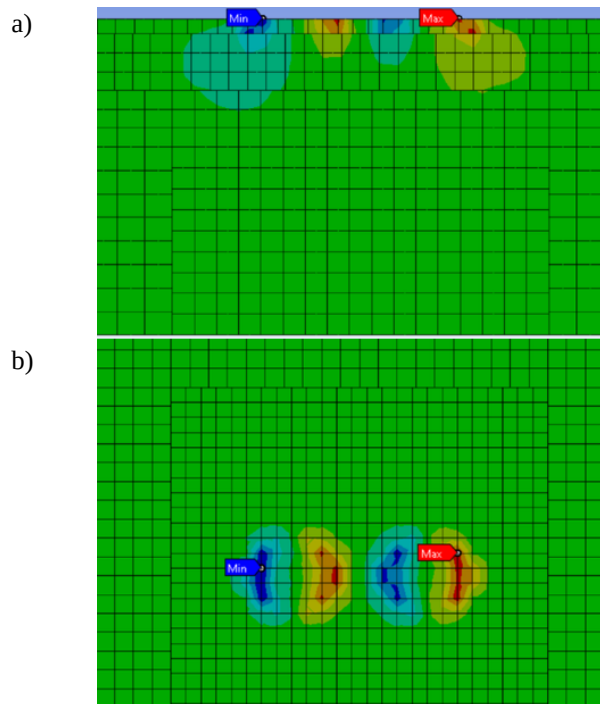


Figura 7. Distribución de tensiones de corte en zonas críticas

Esta falla también llamada agrietamiento descendente, ocurre cuando se generan esfuerzos de tracción en la superficie de la carpeta adyacente a las llantas de los vehículos y tensiones cortantes muy altas en la interfaz neumático-pavimento, producto del tránsito de vehículos pesados con neumáticos a altas presiones de inflado, lo que origina grietas generalmente transversales a la dirección de los vehículos en la rasante, que al ramificarse favorecen el deterioro denominado piel de cocodrilo. Sumado a ello, el envejecimiento de la mezcla asfáltica y el efecto térmico de la zona donde se encuentra la carretera provocan retracciones en el pavimento que potencian el TDC. En este estudio se evalúa la respuesta crítica del pavimento a nivel de superficie como se indicó previamente, por lo cual se consultan en el software las tensiones de tracción en sentido longitudinal y transversal, además de las tensiones cortantes en la interfaz neumático-pavimento. Para tener mayor claridad de la respuesta tensional y la ubicación de esta, es que se evalúan en distintos puntos de la vía, y se considera el centro del área de aplicación de carga, el borde de la huella y zonas contiguas a esta que van desde los 10 a 50 cm. Todo esto, con el objeto de plasmar lo que expresa la teoría con respecto al fenómeno del TDC. Es importante mencionar que de acuerdo a los resultados obtenidos en el software ANSYS, la concentración de tensiones y las zonas de máximos son similares. Por tal motivo se entiende que las vías presentan un comportamiento estructural equivalente y los gráficos que se mostrarán y están divididos por módulos de elasticidad, pero para cada uno de los espesores de la carpeta asfáltica porque se toman valores de las tensiones en distintas ubicaciones de esta.

En la Figura 8, se muestran las tensiones generadas en la superficie de la vía, tanto longitudinal como transversal. Esta es la parte positiva del gráfico, lo que corresponde a tracción y por tanto importante de analizar en la formación del TDC. En

ambas imágenes se puede ver que el centro y borde de las llantas se encuentra en compresión, pero cuando la distancia desde el borde de estas es mayor a 10 cm y 7 cm para tensiones longitudinales y transversales respectivamente, la estructura se encuentra en tracción, por añadidura se observa que las máximas tracciones longitudinales se producen entre los 20 a 30 cm y las máximas tracciones transversales entre los 10 a 20 cm por fuera de la huella del neumático en la superficie. Lo anterior tiene un comportamiento estructural semejante en todos los modelos analizados. También en los esquemas se puede ver que la curva de tracciones sufre un leve descenso en tanto aumenta el espesor de la carpeta asfáltica, pero con la observación de que en todas las gráficas se aprecia que independiente de esta variable, las tensiones de tracción siempre se producirán desde los 7 a 10 cm desde el borde de la rueda en adelante. En otras palabras, las tensiones de tracción serían una respuesta crítica del pavimento al fenómeno de agrietamiento descendente, el cual no se genera en la trayectoria de la rueda, sino más bien a una distancia transversal y longitudinal mínima de 7 a 10 cm de la rueda. Otra situación que se puede analizar en los gráficos es al compararlos en función de sus módulos de elasticidad para un mismo espesor de la carpeta, donde se genera un ligero aumento en las tensiones máximas producidas a medida que el pavimento envejece con la puesta en servicio, es decir que a mayores módulos de elasticidad se generan mayores tracciones y por tanto se aumentaría o aceleraría la formación de TDC según la teoría. Así también, al examinar los esfuerzos que se originan por las distintas presiones de inflado, se ve que en carpetas de menor espesor se generan tensiones mayores y con mayor diferencia entre ellas, que en capas de mayor espesor donde los valores tienden a ser más cercanos entre sí.

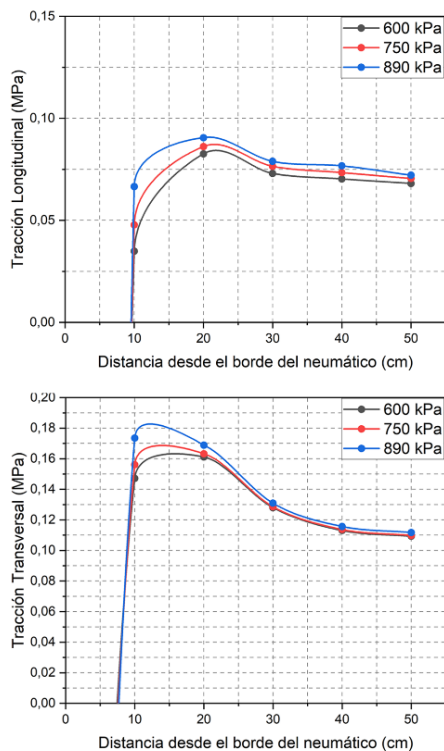


Figura 8. Tensión de Tracción longitudinal y transversal en la superficie de la vía para un espesor de 40 mm y 50 mm con módulo de elasticidad Envejecido

En la Figura 9, se aprecian los gráficos de tensiones de corte generadas en la interfaz neumático-pavimento, donde los valores tensionales máximos se producen en el borde del neumático y entre los 10 a 20 cm de esta. Estos resultados comienzan a disminuir conforme el espesor de la carpeta aumenta, pero se evidencia que las presiones de inflado también tendrían incidencia en las tensiones de corte sobre todo en el borde del neumático, ya que a mayores presiones de inflado se generan esfuerzos cortantes más altos en la carpeta. No se observa lo mismo desde los 10 cm del borde, donde los resultados comienzan a tender a valores similares independiente de la variación de la presión de inflado. Finalmente, los gráficos muestran que un aumento en el módulo elástico de la mezcla asfáltica, es decir que esta envejezca, incrementa las tensiones de corte máximas en el borde de la rueda, lo que excede la energía de deformación de la mezcla y con ello se inicia la grieta descendente que, junto con la acción combinada de tracción, potencian la formación de TDC en la vía.

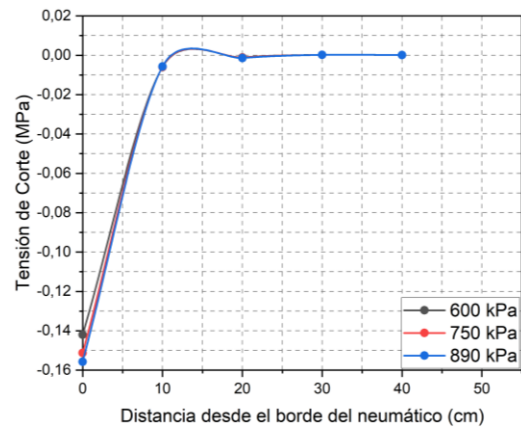


Figura 9. Esfuerzos de corte en la interfaz neumático-pavimento para un espesor de 60 mm y módulo de elasticidad Envejecido

Finalmente, se realiza una comparación de las tensiones, para este fin, se utiliza como ejemplo la carpeta asfáltica con módulo de elasticidad original y sometida a una presión de inflado de 600 kPa, puesto que en general todas las tensiones generadas muestran una tendencia similar. En la Figura 10, se observan los gráficos con dichas tensiones y su variación conforme aumenta el espesor de la capa de rodado.

Para la tracción longitudinal y transversal producida en áreas adyacentes a las ruedas se percibe una disminución en las tensiones que varían entre el 3 a 10 % al aumentar en 10 mm el espesor de la carpeta, lo cual es poco al considerar la parte económica y constructiva que conlleva aumentar en un 25 % el espesor de dicha capa. Por su parte, los esfuerzos de corte generados en la interfaz pavimento-neumático indican una mayor reducción de estos, pero no superarían el 28 % de disminución al aumentar el espesor de la carpeta de rodadura, por lo cual no se observaría una real incidencia del aumento de espesor en una disminución considerable de las tensiones que originan el TDC en el pavimento. Además de que independiente del espesor de la carpeta asfáltica, los esfuerzos siempre se originarían inevitablemente en la misma área. Dicho de otra forma, el problema del TDC no sería realmente solucionado como los demás tipos de deterioros que si se ven

resueltos con un aumento en los espesores de las carpetas asfálticas, aquí más bien habría que analizar el diseño y elaboración de la mezcla propiamente tal, ya que como se indicó anteriormente un aumento en la carpeta asfáltica involucra un valor monetario y constructivo demasiado alto para que esto no se vea reflejado en una disminución considerable de los esfuerzos generados en las zonas estudiadas.

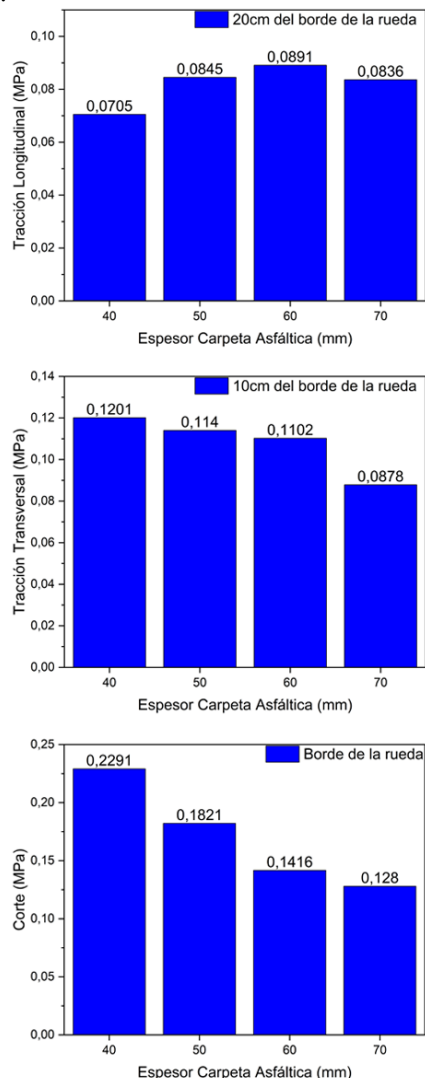


Figura 10. Tensiones generadas en una carpeta asfáltica con módulo de elasticidad original y 600 KPa de presión de inflado

5. CONCLUSIONES

Se estudió la superficie de las zonas adyacentes a las ruedas y se analizó la respuesta crítica del pavimento bajo las ruedas y en el área cercana a estas. Las tensiones de tracción longitudinales en la superficie se originan a una distancia de 10 cm del borde de carga y las tensiones máximas están ubicadas entre los 20 a 30 cm del borde.

En el caso de las tensiones transversales, la tracción se comienza a producir desde los 7 cm del borde, con máximos valores entre los 10 a 20 cm y tienden a disminuir conforme aumenta el espesor de la capa asfáltica. Esto permite alcanzar un máximo de 10 % de reducción. Las presiones de inflado

máximas tienen mayor influencia en carpetas asfálticas de menor espesor, lo que genera mayores tensiones de tracción que podrían alcanzar hasta el doble de su valor, así que al aumentar el espesor de la capa de rodado, se tiende a una disminución de las tensiones entre 20 y 30 %. Lo anterior indica que mayores espesores de la carpeta asfáltica implicarían un aumento leve en la resistencia a las presiones de inflado máximas y menor aún para presiones tradicionales, donde las tensiones solo disminuirán entre un 5 a 10 %. Luego, el factor rigidez de la mezcla incide en el aumento de tensiones, se corrobora la teoría que indica que el envejecimiento también influye en el TDC, donde los resultados muestran que un pavimento envejecido podría aumentar hasta un 50 % la tracción en la superficie de la capa.

Por otro lado, las tensiones de corte que afectan la superficie se producen principalmente en el borde de las ruedas y entre los 10 a 20 cm de estas, donde se observa que el aumento del espesor de la carpeta asfáltica reduciría entre un 10 a 28 % de las tensiones de corte en dicha zona y que las presiones de inflado tendrían una baja influencia. Esto, ya que, en el escenario de un mismo espesor y módulo elástico de la capa asfáltica, la presión máxima usada aumenta hasta en 20 % las tensiones de corte en la carpeta frente a una presión tradicional. En cuanto al envejecimiento de las mezclas asfálticas, los datos obtenidos en ANSYS muestran que el aumento de rigidez de la capa de rodado favorece la formación de corte máximo entre un 6 a 30 % en el borde del neumático. Se concluye que la acción combinada de tracción y corte en zonas adyacentes a las ruedas favorecen el inicio de las grietas en la superficie de la capa, lo que origina una problemática importante para el estudio de los pavimentos, puesto que hay diferentes variables que podrían potenciar o disminuir el TDC de acuerdo a los resultados validados en el software. Es importante tener en cuenta que un aumento en el espesor de la carpeta asfáltica involucra un alto costo y no se ve reflejado en una disminución considerable de las tensiones generadas en las zonas estudiadas.

En diversos estudios, se ha abordado la temática de TDC, pero en pocos se muestra la evolución de las tensiones, al centrarse en estructuras de pavimento de mayor tamaño y de varias capas. El trabajo realizado por Gu et al. (2018) permite evidenciar en parte la tendencia de los resultados obtenidos y además permite confirmar la distancia y lugar donde se generan las máximas tensiones asociadas a TDC. No obstante, la idea de relacionar el aumento de tensiones con la aparición de TDC es una parte del problema y lo más relevante que se concluye de las investigaciones de distintos autores, es que este tipo de daño o deterioro no desaparece al aumentar el espesor de las capas como se realiza en diseños tradicionales de estructuras de pavimento. Lo anterior, si acontece con el ahuellamiento o las grietas ascendentes por fatiga que se producen en la interfaz de la base granular con la mezcla asfáltica y que son los factores que, tradicionalmente, se consideran en los diseños de pavimentos de una importante cantidad de países en el mundo.

El estudio se ha basado en consideraciones que se asocian a vías de bajo tránsito, es decir vías locales que requieren un diseño con una capa asfáltica. Esta limitación hace necesario

extender el estudio a distintas estructuras de pavimento como son vías de más de una capa asfáltica y estudiar el comportamiento de grandes espesores de pavimento. En la misma línea, se propone incorporar variaciones en el Coeficiente de Poisson para sensibilizar los modelos a dicha variable y agregar un mayor número de variables propias de laboratorio o terreno, ampliando el estudio teórico y analítico basado en datos obtenidos de la literatura. En estudios posteriores, se requiere considerar métodos de diseño actuales y que contemplen variables más relacionadas con casos reales, así como un análisis práctico que se enfoque con más profundidad en TDC, ya que actualmente no se sabe, con total precisión, cuál es el origen y cómo se potencia este deterioro en los pavimentos flexibles.

REFERENCIAS

- Alae, M., Zhao, Y., Zarei, S., Fu, G., & Cao, D. (2020). Effects of layer interface conditions on top-down fatigue cracking of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(3), 280–288. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1461870>
- ANSYS. (2022). *Structural Analysis & Simulation Software Solutions*.
- Canestrari, F., & Ingrassia, L. P. (2020). A review of Top-Down Cracking in asphalt pavements: Causes, models, experimental tools and future challenges. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(5), 541–572. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.08.002>
- Canestrari, F., Ingrassia, L. P., & Virgili, A. (2022). A semi-empirical model for Top-Down Cracking depth evolution in thick asphalt pavements with open-graded friction courses. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(2), 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.06.001>
- Corona, C. (2017). *Determinación de módulo de rigidez y caracterización de módulo dinámico de mezcla Superpave*. tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Dinegdae, Y. H., & Birgisson, B. (2018). Effects of truck traffic on top-down fatigue cracking performance of flexible pavements using a new mechanics-based analysis framework. *Road Materials and Pavement Design*, 19(1), 182–200. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1251958>
- El-Basyouny, M. M., & Witczak, M. (2005). Calibration of Alligator Fatigue Cracking Model for 2002 Design Guide. *Transportation Research Record*, 1919(1), 76–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0361198105191900109>
- ESSS. (2022). *Software Ansys*.
- Gu, F., Luo, X., West, R. C., Taylor, A. J., & Moore, N. D. (2018). Energy-based crack initiation model for load-related Top-Down Cracking in asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 159, 587–597. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.008>
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (P. Education (ed.); 2nd Editio). Pearson Education.
- Linero Segrera, D. L., Garzón Alvarado, D. A., & Ramírez Martínez, A. M. (2013). *Análisis Estructural Mediante el Método de los Elementos Finitos* (E. U. N. de Colombia (ed.); Primera Ed).
- Ling, M., Luo, X., Chen, Y., Gu, F., & Lytton, R. (2020). Mechanistic-empirical models for Top-Down Cracking initiation of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(4), 464–473. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1489134>
- Ling, M., Luo, X., Chen, Y., Hu, S., & Lytton, R. L. (2019). A calibrated mechanics-based model for Top-Down Cracking of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 208, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.090>
- López Montero, T., & Miró Recasens, J. R. (2015). *El envejecimiento en mezclas asfálticas*. Plataforma Tecnológica Española de la Carretera.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). *Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación*.
- Murillo Martínez, F. (2018). *Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados de estructuras de autobuses*.
- Olmedo Salazar, J. F. (2015). *Introducción al Método de los Elementos Finitos aplicando MATHCAD, Campo Unidimensional*.
- Pezzotti, S., & Antico, F. (2008). *Introducción a la Teoría de Elementos finitos (Tratamiento de la formulación de elementos unidimensionales a partir del método directo)*. 30.
- Pirmohammad, S., & Majd-Shokorlou, Y. (2020). Finite element analysis of road structure containing top-down crack within asphalt concrete layer. *J. Cent. South Univ.*, 27, 242–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11771-020-4292-3>
- Rodríguez Calderón, W., & Pallares Muñoz, M. R. (2005). Desarrollo de un modelo de elementos finitos para el diseño racional de pavimentos. *Tecnura*, 17, 25–37. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257021014002>
- Svasdisant, T., Schorsch, M., & Baladi, G. Y. (2002). Mechanistic Analysis of Top-Down Cracks in Asphalt Pavements. *Transportation Research Record*, 1809(1), 126–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/1809-15>
- Teltayev, B., & Radovskiy, B. (2018). Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties. *Road Materials and Pavement Design*, 19(8), 1832–1847. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1350598>
- Useche, J. (2014). *Introducción al Análisis por Elementos Finitos en Mecánica de Sólidos*.
- Vila, R. R., Mera, W., & Jaramillo, J. (2021). Evaluation of a rejuvenator as an additive in asphalt. *Revista Ingeniería de Construcción*, 36(2), 222–232. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732021000200222>
- Wen, H., & Bhusal, S. (2015). Development of Phenomenological Top-Down Cracking Initiation Model for Mechanistic – Empirical Pavement Design. *Transportation Research Record*, 2474(1), 12–18. <https://doi.org/10.3141/2474-02>
- Wu, S., & Muhunthan, B. (2019). A mechanistic-empirical

model for predicting top- down fatigue cracking in an asphalt pavement overlay. *Road Materials and Pavement Design*, 20(6), 1322–1353. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1443832>

Wu, S., Wen, H., Zhang, W., Shen, S., Mohammad, L. N., Faheem, A., & Muhunthan, B. (2019). Field performance of top-down fatigue cracking for warm mix asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(1), 33–43. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1248204>

Yilmaz, A., & Sargin, Ş. (2012). Water effect on deteriorations of asphalt pavements. *The Online Journal of Science and Technology*, 2(1), 1–6.

Zhao, Y., Alae, M., & Fu, G. (2018). Investigation of mechanisms of top-down fatigue cracking of asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 19(6), 1436–1447. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1303394>

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (1994). *El Método de los Elementos Finitos Vol. 1*.

BIOGRAFÍA



Rodrigo, Guerra, Ingeniero Civil de la Universidad de La Serena (ULS), titulado el año 1996. Es profesor jornada completa de pregrado para la carrera de Ingeniería Civil y jefe del Área de Construcción, del Departamento de Ingeniería en Obras Civiles en la Universidad de La Serena, Chile. Además, es investigador en

el área de materiales y modelación de problemas en Ingeniería. Ha publicado artículos en revistas científicas en temas de modelación de celdas solares, corrosión, modelación de pavimentos y mecánica de fluidos.



Rosario del Pilar, Gallardo, Ingeniera Civil de la Universidad de La Serena (ULS), titulada el año 2020. Se desempeña labores de jefa de área civil para empresa de montajes Industriales para proyectos de la gran minería en distintas regiones del país.



Marian, Monroy, Ingeniera Civil de la Universidad de La Serena (ULS), titulada el año 2023. Realizó su práctica profesional en el área de vialidad para la Sociedad Concesionaria Ruta del Algarrobo, Sacyr, a cargo de la carretera entre la ciudad de La Serena y Vallenar, Chile. Actualmente, se desarrolla como

ingeniera proyectista, principalmente en cálculos estructurales y sanitarios para tramitaciones y regularizaciones de obras en general de manera independiente. Además, se encuentra en constante formación al realizar cursos de análisis estructural y softwares de diseño para la aplicación en el mismo rubro mencionado.



Reinaldo, Sáez, Ingeniero Civil de la Universidad de La Serena (ULS), titulado el año 2020; es consultor de ingeniería estructural con consultorías en variados rubros productivos, lo que abarca desde la mediana industria minera o la industria salmonera hasta espacios de vivienda y educación. En la actualidad forma parte de

firma consultora de ingeniería estructural con más de 30 años en el desarrollo de ingeniería de especialidad.g

