

Prospectiva de los métodos de análisis por elementos finitos vs métodos racionales en el diseño de pavimentos flexibles y rígidos

Prospective of methods of analysis by finite elements and rational methods in the design of flexible and rigid pavements

Fernando Mogollón Mogollón¹; Octavio Vega Castro²

¹Ingeniero Civil y Topográfico, Esp. Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, Magister en Ingeniería Civil.

²Ingeniero Civil y Topográfico, Esp. Diseño Construcción y Conservación de vías.

FECHA DE RECEPCIÓN:15/07/2020

FECHA DE ACEPTACIÓN:09/09/2020

Página

44

ESING

REVISTA INGENIEROS MILITARES
número 14, Año 2019, ISSN 2145-3144 / BOGOTÁ-COLOMBIA

RESUMEN

El desarrollo de diseños de estructuras de pavimento en el contexto colombiano, requiere innovarse en cuanto a las metodologías, ya que las actualmente utilizadas se han quedado estancadas, no permiten obtener datos relacionados directamente con la realidad, ni enmarcadas con las condiciones técnicas propias del entorno de las áreas de intervención, ocasionándose así, la imposibilidad de estimar la vida útil de las estructuras de manera más óptima y real, que permita planear las labores de mantenimiento tanto de los proyectos de naturaleza nueva, como los que ya se encuentran en operación; adicionalmente, es importante resaltar que esta situación genera mayor gasto de recursos pero menor satisfacción de los usuarios de la vialidad. En este sentido, mediante el presente artículo se busca explorar el estado actual de la implementación de modelos numéricos en el diseño de estructuras de pavimento, mediante la revisión y análisis de artículos y otros documentos de rerumenautores especializados en el tema, para de esta manera, crear una visión general de las bondades que proporciona la implementación de estas nuevas metodologías, sus requisitos de operación e información y sus alcances en cuanto a los posibles resultados a obtener.

PALABRAS CLAVE

Pavimentos, Elementos Finitos, Modelos Numéricos, Metodologías de diseño, Métodos Racionales, Ansys, Abacus.

ABSTRACT

The development of pavement structure designs in the Colombian context requires innovation in terms of methodologies. This is primarily due to the fact that those currently used have become stagnant as they do not allow obtaining data directly related to reality, nor framed with the technical conditions of the environment of the intervention areas. Therefore, causing the impossibility of estimating the useful life structures in a more optimal and realistic way which enables the planning of maintenance work of both new projects and those that are already in operation. Furthermore, it is important to note that this situation generates higher expenditure of resources but lower satisfaction of road users. In this sense, this article seeks to explore the current state of the implementation of numerical models in the design of pavement structures by reviewing and analysing articles and other documents. This is done by the authors specialized in the subject in order to create an overview of the benefits provided through the implementation of these new methodologies, their operation and information requirements and their scope in terms of the possible results to be obtained.

KEYWORDS

Pavements, Finite Elements, Numerical Models, Design Methodologies, Rational Methods, Ansys, Abacus.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo actual de la infraestructura vial en Colombia ha requerido de innovaciones en lo referente al diseño de las estructuras del pavimento, desde hace varios años la metodología basada en el manual del Invias, 1998 una de las más utilizadas como lo menciona [1], siendo ésta de tipo empírico, lo cual no permite tener confiabilidad en cada una de las variables que se consideran en el desarrollo de proyectos nuevos, como en el mantenimiento y rehabilitación de los existentes, en este contexto, los métodos convencionales de diseño y las condiciones diversas del suelo (subrasante), la heterogeneidad de materiales, las condiciones cambiantes del clima y del tránsito principalmente, han ocasionado una nueva mirada al tema de diseño de pavimentos utilizando modelos matemáticos; situación que ha sido abordada por algunos autores con el enfoque de modelación numérica, referencias [2], [3], [4], [5], entre otros, que han generado investigaciones importantes en la implementación de metodologías innovadoras con integración de múltiples factores, adecuando los diseños al entorno propio y por ende afinando la predicción de la vida útil de las estructuras, superando así, la forma convencional de diseño de pavimentos.

Para contextualizar la temática a abordar, es importante resaltar que los métodos de diseño de estructuras de pavimento se pueden agrupar en dos posibilidades, una referente a los métodos analíticos y otra a los modelos numéricos; para el primer caso, el procedimiento se basa en la aplicación de una ecuación matemática, fórmulas en la que se identifican cada una de sus variables, llegando de esta manera, a una única solución o para el caso específico un resultado de los espesores de cada una de las capas de la estructura del pavimento; en cuanto al segundo caso, la implementación de modelos numéricos facilita el diseño de una estructura de pavimento mediante un arreglo matricial computarizado que arroja resultados no necesariamente lineales, pero involucrando condiciones técnicas adicionales propias del entorno en el que operará la estructura de pavimento; basado en lo anterior, la utilización

de modelos numéricos facilita la integración de criterios propios del entorno y no solo los teóricos u obtenidos de casos similares como se maneja en los métodos analíticos.

Sumado a esto, es necesario lograr una asertividad de alto nivel que permita predecir oportunamente el comportamiento de la estructura basado en las cargas repetitivas del tránsito, las propiedades mecánicas de los materiales, la presión de tierras y el efecto del agua y la temperatura, de manera tal, que se logre planear las acciones de mantenimiento o reparación; en este sentido, lo que se busca es analizar y comparar dos metodologías de diseño (los métodos mecanicistas o racionales vs los nuevos métodos de análisis por elementos finitos, y así generar la forma de afinar la vida útil del pavimento, situación que se replicaría en la optimización de los recursos y en la mejora de la calidad de vida de los usuarios de las vías.

De acuerdo a lo mencionado, este artículo realiza la revisión de algunas metodologías de modelación numérica por elementos finitos de pavimentos de autores que a través de la experimentación han determinado modelos que permiten generar diseños óptimos técnicamente que incorporan variables que particularizan el diseño de acuerdo a las condiciones del área a intervenir [6] , adicionalmente, la implementación de estos modelos permite predecir la vida útil de las estructuras [7], para su respectiva programación de mantenimientos rutinarios y periódicos que garanticen la continuidad del servicio de la vía en el periodo de diseño determinado.

También, es importante tener en cuenta que para la utilización de estos modelos numéricos en el diseño de estructuras de pavimentos es necesario integrar herramientas tecnológicas tanto de software como hardware que permitan realizar las modelaciones de forma adecuada, así mismo, una de las condiciones que se requieren para obtener resultados con un bajo nivel de incertidumbre, radica en incluir las variables propias de la sub-rasante, del tránsito proyectado, del manejo del agua lo más real posible, incluso que se hayan determinado con toma

de información primaria; estas condiciones, se aterrizan con la literatura verificada de los autores incorporados en este artículo.

Resultado de la revisión de los artículos especializados en el tema, se pretende dar una visión del concepto de modelación numérica, específicamente lo denominado método de elementos finitos, la información de entrada requerida, el alcance de los resultados, la información de salida, el estado del arte de la incorporación de modelos numéricos en el diseño de estructuras del pavimento y su proyección en el ámbito nacional, así mismo, la determinación de las bondades de implementar estas metodologías en las labores ingenieriles en las fases de estructuración de los proyectos, inclusive en la operación [8].

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente artículo, se localizaron documentos bibliográficos de varias fuentes o bases de datos especializadas. Se realizó búsqueda de información con los descriptores o palabras clave: modelación numérica, pavimentos, elementos finitos, modelos elásticos lineales, estructuras de pavimento.

Se seleccionaron documentos que han desarrollado investigaciones sobre modelaciones matemáticas o numéricas, los procedimientos, software especializados, las ventajas del análisis del comportamiento de una estructura de pavimento frente a los métodos empíricos y analíticos, que actualmente se usan en los diseños estructurales.

La información necesaria para la revisión del presente artículo es de origen secundario, principalmente basándose en archivos, bases de datos (Scopus, Research Gate, Google académico), resúmenes y revisiones sistemáticas. Con base de la revisión bibliográfica, se seleccionaron diversos artículos actualizados, entre los que se destacan las siguientes referencias [2], además del documento [3]. También se utilizó el documento Manejo de Elementos Finitos para Modelar Estructuras de Pavimento en o Cerca de la Falla Usando un Método de Módulo Volumétrico Constante [4].

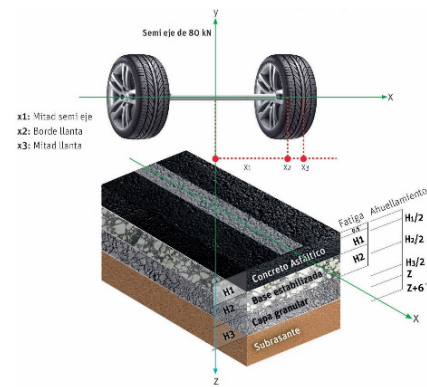


Figura 1: Posiciones a evaluar para determinar las deformaciones unitarias.
Fuente (ARA, 2004)

Además de las anteriores referencias, se hizo profundización en el artículo Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones [1]. En estos documentos se presentan las diversas metodologías y herramientas computacionales existentes actualmente para el diseño de una estructura de pavimentos flexibles. Se hace el análisis comparativo entre los métodos empíricos, los racionales y los modelados por herramientas computacionales.

Como parte del estudio expone los nuevos métodos de análisis por medio de la utilización de los elementos finitos para la determinación de propiedades, esfuerzos, deformaciones y deflexiones haciendo uso de la resolución de ecuaciones, condiciones de frontera, discretización del dominio y las propiedades de los materiales, por medio de un programa de cálculo.

Dichos programas utilizan un modelo elástico multicapa debido a su simplicidad y manejo de la información generando resultados muy precisos y con un costo computacional muy bajo respecto a otros modelos numéricos. Como resultado de las investigaciones se sugiere que en Colombia se empiece a tener en cuenta en los diseños, que la acumulación de la deformación permanente es la suma de cada una de las deformaciones de las diversas capas que constituyen una estructura de pavimento.

Es por eso, que es necesario determinar los esfuerzos

y deformaciones en cada una de las capas y no solo en las capas asfálticas y la sub-rasante como lo hacen actualmente los métodos racionales, sino también, en las capas granulares, teniendo en cuenta que las propiedades en cada capa no son isotrópicas y sus dimensiones horizontales no son infinitas por lo tanto se necesita de un modelo matemático que pueda interpretar las ecuaciones, las geometrías y las diversas características de cada capa para llegar a resultados más precisos en el dimensionamiento de un pavimento.

Por su parte, el artículo de la referencia [3], es el resultado de una investigación que integró las deflexiones del pavimento flexible con las probables deformaciones estructurales del mismo, estas últimas, desde el punto de vista teórico, buscando determinar un modelo predictivo de la vida útil remanente del pavimento; todo esto, con el fin, de generar un soporte técnico orientado a la planeación de las labores de mantenimiento de estructuras de este tipo. En este contexto, es importante resaltar que la información de partida, correspondió a ensayos acelerados y no destructivos sobre cuatro pistas de prueba, de las cuales, se tenía el pleno conocimiento de las características de su estructura y de sus parámetros iniciales del diseño.

De igual manera, dentro del desarrollo de la investigación [3], realizaron el análisis de los modelos existentes para predecir el ahuellamiento en estructuras de pavimento flexible, resultado de esta actividad, lograron determinar que los modelos son aplicables a estructuras de pavimento nuevas, pero que no son aplicables de forma óptima para estructuras de pavimento ya existentes, ya que, la toma de información de campo y el seguimiento respectivo demandaría de excesivos recursos que no generarían un equilibrio entre la parte técnica y económica.

Basado en lo descrito anteriormente, el modelo desarrollado analizó las deformaciones (repeticiones de ejes equivalentes de 80kN) individuales obtenidas de la pista de prueba, obteniendo así la tendencia de las deformaciones de la estructura del pavimento y evidenciando

que las mayores deformaciones se generaron en las estructuras con menor capacidad estructural, con esta información, correlacionaron las deflexiones del pavimento con las deformaciones del mismo en el tiempo, de esta manera, lograron predecir la vida útil de la estructura del pavimento.

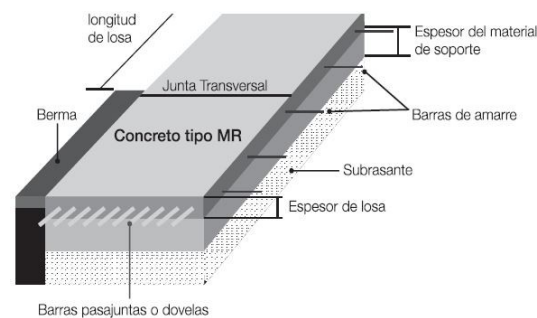


Figura 2: Esquema representativo de un pavimento de concreto

Por otra parte, el artículo de la referencia [2], estudia las estructuras de pavimento flexible con rigidez invertida, con el fin de realizar el análisis del comportamiento de la distribución de esfuerzos debido al paso de las cargas repetitivas provenientes del tránsito. Los pavimentos flexibles con rigidez invertida corresponden a aquellas estructuras que tienen una capa de material granular entre una sub-base rígida y una capa mínima de asfalto [2], generándose, que en operación la estructura del pavimento sufra un comportamiento no lineal, o adaptable de acuerdo a la carga que este soportando, caso contrario, sucede con las estructuras de pavimentos tradicionales que debido a su comportamiento lineal, la falla de la estructura se genera rápidamente por fatiga. Los autores [2], analizaron las actuales caracterizaciones de las estructuras de pavimento flexible en laboratorio e in situ, concluyendo que independientemente de la técnica, no existen resultados que brinden directamente los parámetros adecuados para proyectar el comportamiento de los materiales de una estructura dada. Basados en esta conclusión, los autores presentaron una metodología que correlaciona la rigidez del material y los esfuerzos que este soporta.

Para la determinación de la rigidez de los materiales granulares, la metodología propone

realizar caracterización en laboratorio o in situ mediante la utilización de cristales piezoeléctricos y la aplicación de ondas [2]. De acuerdo a esto, el resultado de la rigidez se obtiene verificando la velocidad de propagación de las ondas en la estructura del pavimento, el cual, se somete a diferentes cargas. El paso siguiente desarrollado [2], consistió en implementar la modelación numérica, con la utilización del programa de elementos finitos ABAQUS, obteniendo de esta manera, los esfuerzos, que, para la estructura estudiada, arrojó que la base granular recibe un esfuerzo del 48 % con respecto a la carga aplicada, las demás capas de material reciben esfuerzos en menor proporción.

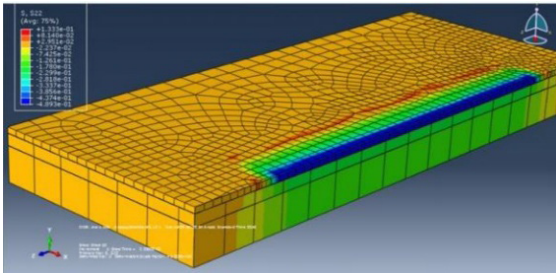


Figura 3: Distribución vertical de esfuerzos Fuente: www.iasj.net

Por último, el artículo de [4], aborda la temática de los métodos de diseño de pavimento y a su vez lo relacionado con el modelaje de los mismos, propendiendo por la obtención de un procedimiento simplificado que pueda proyectar el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil, esta tarea, fue realizada mediante la metodología de elementos finitos enfocada en la respectiva modelación numérica, suponiendo un comportamiento hiperbólico para la curva de esfuerzo deformación. Para el desarrollo del procedimiento, los autores se apoyaron en la realización de ensayos de laboratorio como lo es la prueba de compresión triaxial, la cual, aportó entre otras los parámetros para la linealización del comportamiento hiperbólico de la curva esfuerzo deformación, de igual manera, la subrasante asumida correspondió a una arcilla de alta plasticidad que generaba un escenario más complejo dentro del estudio, debido a las particularidades de este material al contacto con el agua.

Posteriormente, los autores de la referencia [4], procedieron a generar la predicción de esfuerzos, esta predicción la realizaron teniendo como elemento fundamental las cargas de aviones, obteniendo como resultado que el esfuerzo vertical de las estructura de pavimento cuando esta se supone como lineal elástica llega a un 60 %, caso contrario, cuando el asfalto se modela como base de alta calidad que el esfuerzo se subestima en un 20 %.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Resultado de la consulta en bases de datos especializadas se evidenció que el tema de implementación de modelación numérica en el diseño de estructuras de pavimento ha sido poco explorado, el alcance a nivel nacional se ha reducido a la utilización de software para la obtención de las deflexiones, sin incluir las demás variables que inciden en una real modelación; de igual manera, en cuanto a reglamentación, no se tiene mayor avance, aún se diseña con los métodos tradicionales, que no permiten predecir realmente la vida útil de las estructuras.

La implementación de modelos numéricos en el diseño de estructuras de pavimento en el país, debe ser un proceso paulatino, ya que es necesario la integración de profesionales especializados en modelación y herramientas tecnológicas potentes, de los cuales, ambos componentes son escasos; sin embargo, debido a las bondades que brinda la utilización de esta metodología, que optimiza los recursos, traduciéndose en la posibilidad de inversión en la ampliación de la infraestructura vial, genera la necesidad de iniciar esta transición de implementación de la modelación de manera inmediata; claro está, que esto debe ir acompañado de un ajuste en los apéndices técnicos de las licitaciones y de la normatividad como tal, para de esta manera tener el respaldo de la administración pública en los procesos de implementación mencionados.

Otra gran ventaja que se tiene con la implementación de un modelo numérico es la

predicción del comportamiento de los materiales a nivel micro mecánico ante las sollicitaciones impuestas, pues se puede obtener información para cada punto específico, de sus propiedades, esfuerzos y deformaciones, teniendo mejores resultados en cuanto a la fatiga y ahuellamiento que soportará cada estructura modelada.

Cabe resaltar que la utilización de estos modelos numéricos también tienen sus limitaciones, ya que es muy difícil reproducir con precisión la geometría de las partículas, los efectos de la compactación, humedad, temperatura etc, y actualmente no hay ecuaciones que puedan describir los campos de las partículas y su interrelación a nivel macro mecánico con las demás variables que intervienen en la vida útil de un pavimento.

Cálculo de deformaciones y esfuerzos, como lo es Ansys, Abacus, Plaxys, FENLAP, CE-SAR entre otros. Para su utilización e interpretación se requiere un conocimiento avanzado y especializado de las ciencias básicas, suelos, pavimentos y programación entre las más importantes. Adicionalmente, cada modelación requiere un alto costo computacional entre hardware y software lo cual hace lenta su aplicación en la actualidad.

Como conclusión, resultado de la revisión bibliográfica desarrollada en el presente artículo, se observa que varios autores han desarrollado estudios particulares sobre el tema de optimizar los diseños de estructuras de pavimento, lo que se convierte en un insumo importante que permite desarrollar mejoras al diseño de pavimentos basadas en evidencias científicas y permitiendo predecir el comportamiento de las estructuras debido a diversos factores pero propios del entorno.

REFERENCIAS

- [1] H. A. Rondón Quintana y F. A. Reyes Lizcano, «Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones», Cien. Ing. Neogranadina, vol. 17, n.º 2, pp. 41-65, dic. 2007.
- [2] D. Cortés, J. Santamaria y A. Jugo,

« Pavimentos Flexibles con Rigidez Invertida: Caracterización Experimental y Modelación Numérica», Revista Int de Desastres Naturales, Accidentes en Infraestructura Civil, Vol. 12(1), 143, ene. 2012.

- [3] F. Leyva, E. Pérez, J. Aguiar y L. Loria, « Modelo de deformación permanente para la evaluación de la condición del pavimento», Revista ingeniería de construcción, vol.32, n.1, pp.37-46, abr. 2017.
- [4] C. González y M. Santiago, « Manejo de Elementos Finitos para Modelar Estructuras de Pavimento en o Cerca de la Falla Usando un Método de Módulo Volumétrico Constante», Revista Int de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil., vol 13, 2017.
- [5] R. Sánchez Alandí, « Caracterización, mediante elementos finitos, del comportamiento elasto – plástico de un material granular empleado en capas de subbalasto ferroviario en un ensayo CBR», Tesis de Master, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2016
- [6] M. R. Pallares Muñoz, J. A. Pulecio Díaz, « Aplicabilidad del método de elementos finitos en el análisis y dimensionamiento de losas JCPC para carreteras de dos carriles», Iteckne, vol.14, n.2, jul. 2017.
- [7] J. Staub de Melo, I. Staub de Melo y J. Villena, « Aplicación de enfoques de análisis y criterios de rotura en ensayos de fatiga y su influencia en la predicción de la vida útil de la capa de rodadura asfáltica en la estructura del pavimento», Rev. ing. Constr., vol. 34, dic. 2019.
- [8] J. G. Ardila Marín y M. I. Ardila Marín, « La Gerencia del Mantenimiento», Dimensión Empresarial, 127-142, 2016.