

Evaluación de la capacidad estructural y comportamiento del suelo en ensayos acelerados de pavimentos

Edgar CAMACHO-GARITA^{a,1}, José Pablo AGUIAR-MOYA^a y
Luis Guillermo LORÍA-SALAZAR^a
^aUniversidad de Costa Rica

Resumen. Los ensayos acelerados de pavimentos son procesos intensivos de aplicación de cargas para simular el daño causado por los vehículos en las diferentes estructuras. El proceso de falla de las estructuras se presenta gradualmente a lo largo de los ensayos, donde el aumento de las deformaciones, presiones y agrietamientos, están acompañados con el aumento de las presiones que llegan a la capa de suelo que sirve como soporte. Los pavimentos se diseñan para soportar el paso de los vehículos, y distribuir la presión que llega al suelo. De esta manera conforme mayor capacidad estructural y rigidez tengan las estructuras, mayor será el área donde las cargas son distribuidas. El suelo utilizado para los ensayos acelerados de pavimentos corresponde a un limo arcilloso (clasificado como MH, A-7-5), representativo del Valle Central de Costa Rica. Dicho suelo fue ensayado en condiciones secas y condiciones con humedad incluida, a fin de poder comparar la reacción de las cuatro diferentes estructuras en cada una de las condiciones. El LanammeUCR ha utilizado diferentes instrumentos a fin de medir la reacción de las estructuras ante las cargas; así como ha desarrollado herramientas para procesar los datos medidos, y analizar la información. En el artículo se presentan y analizan los datos obtenidos, particularmente enfocado al comportamiento del suelo, y como varía el mismo con diferentes estructuras. La falla de los pavimentos está asociada a complejos y costosos procesos de mantenimiento y reconstrucción, sin embargo, las reconstrucciones más costosas son las asociadas a la falla a nivel del suelo. El artículo analiza la forma de prevenir la falla de las estructuras debido a la falla del suelo.

Palabras Clave. Ensayos acelerados de pavimentos, suelo cohesivo, efecto de humedad.

1. Introducción

El efecto de la humedad es fundamental en determinar el funcionamiento y la respuesta de las estructuras de pavimento, esto es particularmente importante en las regiones tropicales donde las altas precipitaciones, los suelos blandos y la variabilidad de los niveles freáticos son condiciones normales.

Los ensayos acelerados de pavimentos son procesos intensivos de aplicación de cargas para simular el daño causado por los vehículos en las diferentes estructuras. El proceso de falla de las estructuras se presenta gradualmente a lo largo de los ensayos,

¹ Edgar Camacho-Garita, Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, 11501-2060 San José, Costa Rica; E-mail: edgar.camachogarita@ucr.ac.cr

donde el aumento de las deformaciones, presiones y agrietamientos, están acompañados con el aumento de las presiones que llegan a la capa de suelo que sirve como soporte.

La falla de los pavimentos está asociada a complejos y costosos procesos de mantenimiento y reconstrucción, sin embargo, las reconstrucciones más costosas son las asociadas a la falla a nivel del suelo. El artículo analiza la forma de prevenir la falla de las estructuras debido a la falla de capas inferiores.

2. Características del suelo

Los inceptisoles es el tipo de suelo predominante en Costa Rica [1], y si bien no tienen predominancia de ningún material en especial, en ellos se encuentran mezclas de varios tipos de arcillas y minerales primarios; lo cual condiciona sus características mecánicas. Según la investigación realizada por la Unidad de Materiales y Pavimentos del LanammeUCR, "Caracterización físico-química de los suelos de Costa Rica" [2], existen suelos con características físico-químicas que generan problemas, particularmente los que se mencionan a continuación:

1. Arcillas de alta expansividad, las cuales se originan a partir de la deposición de materiales orgánicos debido a la erosión y transporte desde zonas escarpadas cercanas
2. Limos de baja resistencia que se originan por la alteración de materiales piroclásticos en condiciones de alta pluviosidad, en esta categoría se encuentran los limos colapsables.
3. Suelos granulares finos de baja densidad, compuestos por capas de arenas finas, mal graduadas, con baja densidad, estas pueden causar daños en obras cuando el nivel freático es alto y en condiciones de sismicidad.
4. Suelos tixotópicos, conformados por limos y arcillas, este suelo se ve afectado por vibraciones causadas por la sensibilidad del suelo, la presión de poro o una combinación de estas [2].

En cuanto al material subrasante, se utilizó el mismo suelo que se encontraba en el lugar de construcción de las pistas de ensayo. El mismo es un limo arcilloso, según el sistema de clasificación SUCS se clasifica como un suelo MH y según el sistema de clasificación AASTHO se clasifica como un suelo A-7-5. Para ambos sistemas de clasificación el suelo presenta características mecánicas limitadas, así como una limitada capacidad para drenar el agua.

3. Ensayos acelerados de pavimentos

En términos generales los pavimentos se pueden dividir en dos tipos, flexible y rígido, estos se diferencian principalmente por la forma en la que transmiten las cargas. En el pavimento flexible, la superficie de rodadura tiene menor rigidez global, lo que implica una mayor deformación y más tensiones que llegan a la subrasante. Así como en el pavimento rígido, hay una mayor distribución de cargas, es decir en un área mayor, por lo que menos tensiones llegan a la subrasante [3].

El pavimento rígido debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad distribuye la carga aplicada sobre un área más amplia del suelo, por lo que la mayor parte de la capacidad estructural la suministra la losa [4].

Los pavimentos flexibles transmiten la carga de las ruedas a las capas inferiores partícula a partícula mediante los puntos de contacto de la estructura granular. La carga de la rueda que actúa sobre el pavimento se distribuirá a un área más amplia y la tensión disminuirá con la profundidad, debido a esto, los pavimentos flexibles normalmente cuentan con varias capas. Por lo que en el diseño se utiliza el sistema de capas. Estos pavimentos poseen una baja resistencia a la flexión, pero son flexibles bajo cargas de acciones estructurales.

En el caso de los pavimentos rígidos, estos tienen la suficiente resistencia a la flexión para transmitir cargas de la rueda en un área más amplia y menos profunda. Estos pavimentos no cuentan con varias capas, a diferencia de los flexibles, se colocan sobre una base estabilizada o granular, que se encuentra por encima de la rasante. En estos pavimentos la carga se distribuye por acción de losas de concreto, de manera que el pavimento se comporta como una placa elástica que descansa sobre un medio viscoso [4].

La carga es transferida al pavimento a través de ejes de carga y llantas presurizadas, por lo que el resultado de la presión y el esfuerzo sobre el pavimento depende de varios factores, como la carga total, el número de ejes y llantas. El esfuerzo en la superficie del pavimento justo debajo de cualquier llanta se concentra en el área de contacto de esta.

Las validaciones previas y conceptos teóricos muestran que el esfuerzo se distribuye en forma de V invertida, es decir, la intensidad del esfuerzo disminuye a lo largo de la profundidad del pavimento. Se debe notar que, si la tensión en la superficie proviene de dos neumáticos colocados, o ejes colocados uno cerca del otro, las tensiones de los dos neumáticos podrían superponerse en algún punto debajo de la superficie. Esto puede provocar un esfuerzo combinado que es más alto que el esfuerzo resultante de cada uno de los dos neumáticos [4]. Considerando los elementos anteriores, se optó por la construcción de cuatro estructuras distintas en el área definida para los ensayos [6].

Los ensayos acelerados desarrollados en Costa Rica por el LanammeUCR se han desarrollado desde el año 2013, y concluyendo una primera etapa de ensayos en 2018. Los resultados presentados en este trabajo resumen una parte de los datos generados por dichos ensayos. Se resalta que se utilizaron estructuras de pavimento flexible y semi-rígido para el desarrollo de los ensayos; así como se analizó y presentan los datos para estructuras con alto nivel de humedad y los equivalentes en condición de baja humedad (seca).

Los datos que se presentan se obtuvieron mediante múltiples mediciones de deflexión instantánea elástica de cada uno de los tramos de ensayo, a lo largo de toda la vida útil de los mismos. Para la captura de estos datos se utilizó un deflectómetro de superficie (RSD por sus siglas en inglés) [7].

La constitución de las estructuras de pavimento está descrita en la Tabla 1. Donde destaca que la combinación de espesores de la capa superior, y las características de la capa base; junto con la condición de ensayo en condiciones de alta humedad (tramos 007, 008, 009 y 010) brindan una significativa combinación de variables [6-8].

Tabla 1. Características generales y dimensiones de las estructuras ensayadas, y tramos asociados a la secuencia de ensayo.

Estructura	Tramos	Mezcla asfáltica	Capa base	Subbase
AC1	001 y 008	7.5cm	BE 25 cm	30 cm
AC2	003 y 007	7.5cm	BE 25 cm	30 cm
AC3	004 y 010	12cm	BG 25 cm	30 cm
AC4	002 y 009	12cm	BG 25 cm	30 cm

BE: Base estabilizada con cemento, BG: Base granular.

4. Análisis de resultados

Mediante el desarrollo y uso de herramientas de cálculo especialmente desarrolladas para procesar la amplia cantidad de deflexiones instantánea se generaron cerca de 5950 procesos de retrocálculo para las diferentes estructuras. Con los cuales se obtuvieron cerca de 23800 valores individuales de rigidez de las diferentes capas.

Las mediciones de deflexión instantánea se desarrollaron en diferentes puntos a lo largo de los diferentes tramos de prueba, para cada uno de estos puntos en cada momento de la vida útil se desarrolló retrocálculo de módulos. A continuación, mediante el uso de gráfica de resumen se presentan los datos promedio de cada tramo, y como estos variaron a lo largo de la vida útil de las estructuras.

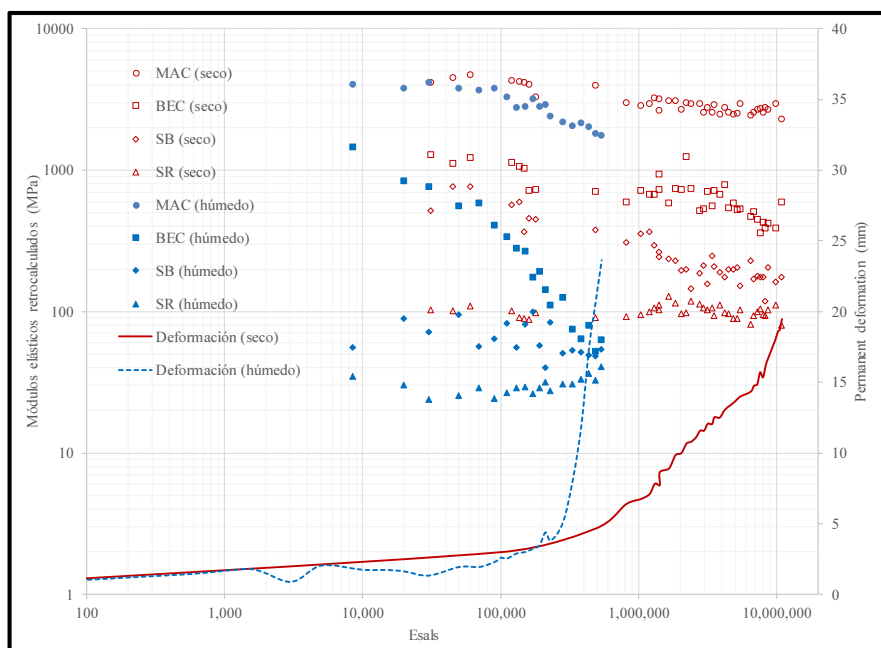


Figura 1. Evolución de los módulos elásticos retrocalculados para la estructura AC1, tramos 001 y 008.

En la Figura 1 se pueden apreciar los módulos obtenidos, basados en las deflexiones de la estructura AC1, tanto en la condición seca (tramo 001) como en la condición húmeda (tramo 008). Donde se destaca que la base estabilizada con cemento pierde rápidamente su capacidad mecánica ante el paso de las cargas: el proceso se acelera debido a la poca capacidad de soporte aportada por las capas inferiores expuestas a las condiciones de alta humedad, ya que como se puede apreciar los valores del módulo para la subrasante (SR) se llegan a ser cercanos a los 30 MPa.

En condiciones secas la estructura se comporta de forma excepcionalmente buena manteniendo sus capacidades estructurales durante el proceso de ensayo. La degradación de las capacidades mecánicas de las capas inferiores es limitada, y el mayor daño observable en los valores obtenidos, se concentra en la capa de base estabilizada. El suelo de la subrasante muestra valores de módulo cercanos a los 100 MPa.

Es importante también apreciar el contraste de los valores de módulo para la capa de subbase, donde la humedad tiene una significativa influencia en la caída de los valores

de módulo. De forma similar, las condiciones de deformación presentadas muestran la significativa pérdida de vida útil de la estructura.

La Figura 2 muestra los valores obtenidos para la estructura AC2, la misma es la que menor capacidad estructural tiene, debido al uso de base granular y capa de mezcla asfáltica delgada. Se aprecia como para la condición seca (tramo 003) los valores de las capas inferiores tienen a agruparse cercanos a los 70 MPa, funcionando en valores similares de módulo; mientras que la mezcla asfáltica y se obtienen valores cercanos a 1000 MPa, lo cual son valores bajos.

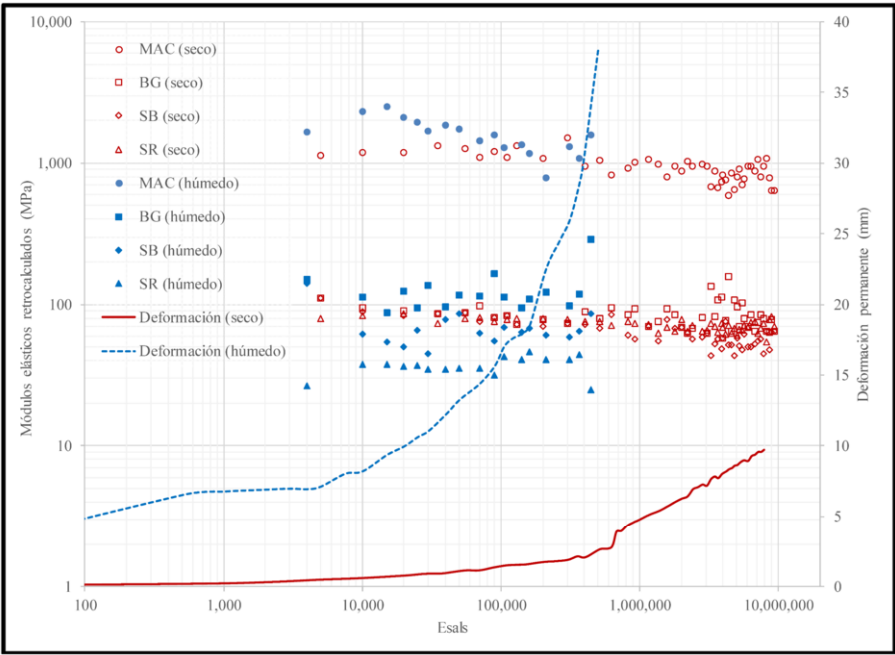


Figura 2. Evolución de los módulos elásticos retrocalculados para la estructura AC2, tramos 003 y 007.

En condición húmeda (tramo 007) se muestran menores valores de los módulos del suelo, lo cual es coherente con una reducción de las capacidades mecánicas del material producto del aumento en la humedad. Así mismo se aprecian aumentos en algunos momentos en que la condición de esfuerzo hace que los módulos de base granular se aprecien altos, lo cual tiene relación con la reducción de las capacidades de la mezcla asfáltica, y el aumento de los niveles de presión sobre el material granular. Este proceso tiene asociado un aumento de las presiones de poro en los materiales, así como el agrietamiento de forma significativa de la superficie.

Esta secuencia de procesos acelera el daño en las estructuras, así como se manifiesta en magnitudes significativas de deformación permanente, lo cual es un criterio esencial para que una estructura de pavimento no pueda continuar en servicio.

La estructura AC3 estuvo compuesta por una capa de mezcla asfáltica gruesa, base granular y subbase granular. La condición de capa gruesa de mezcla asfáltica y las capas granulares muestra condiciones particulares para soportar el paso de las cargas, con capacidades excelentes en condición seca (tramo 004), pues como se puede apreciar en la Figura 3, si bien se aprecian disminuciones en los módulos de mezcla asfáltica, base

granular y subbase, las deformaciones se mantuvieron bajas, y el módulo de la capa de suelo se mantuvo estable.

Para el ensayo en condición húmeda de la estructura AC3 (tramo 010) se puede apreciar que se superó el millón de ejes equivalentes de diseño (Esals). Sin embargo, la magnitud de las deformaciones y la reducción de los módulos de las capas granulares muestra la forma en que la humedad y el proceso de carga degradaron las capacidades de la estructura.

Es importante notar que, respecto a las estructuras AC1 y AC2, la estructura AC3 logra una mejor distribución de las presiones que llegan a la capa de base granular, permitiendo una menor degradación de las capacidades mecánicas de la misma, menores deformaciones y mejores condiciones de la mezcla asfáltica.

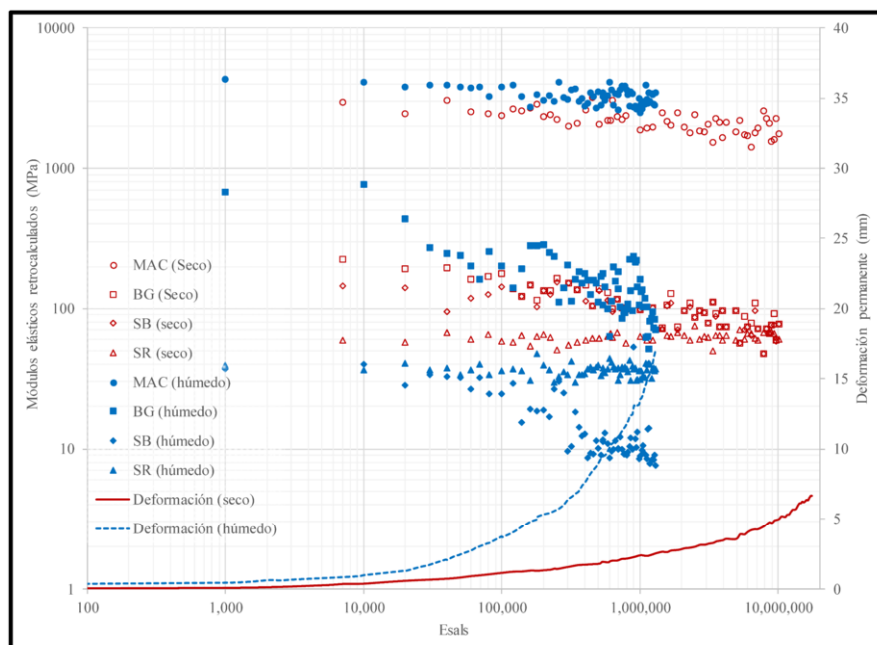


Figura 3. Evolución de los módulos elásticos retrocalculados para la estructura AC3, tramos 004 y 010.

Destaca la forma en que los valores de módulo de la subbase (SB) decaen en condiciones húmedas hacia el final del ensayo, y como esto tiene una relación directa con el aumento de las deformaciones medidas.

El proceso de ensayo de la estructura AC4, dadas las condiciones de alta capacidad para soportar el paso de cargas, representó uno de los mayores retos logísticos para el proceso de ensayo; sin embargo, esta inversión de tiempo se aprecia en la alta densidad de datos obtenidos y mostrados en la Figura 4.

Se puede apreciar como la condición seca (tramo 002) muestra niveles de deformación excepcionalmente bajos (menores a 3 mm) para la cantidad de cargas aplicadas (superiores a 20 millones de Esals). El daño observado en la mezcla asfáltica de dicho tramo es imperceptible, y el daño apreciable en los datos del tramo seco se concentran en capa base y subbase.

Al contrastar el tramo seco con el tramo húmedo (tramo 009) se puede apreciar la reducción de las capacidades de la subrasante y la subbase, y si bien las capas de base

estabilizada y mezcla asfáltica tienen menor sensibilidad a las condiciones de humedad, al reducirse la capacidad de las capas de soporte la base estabilizada gradualmente se degrada, presentando agrietamientos y bombeo de finos. En la etapa final del ensayo se observó un aumento en las deformaciones, puntualmente donde se presentaron las grietas en la base estabilizada y el bombeo de finos.

Es preciso notar como nuevamente los valores de módulo del material de subrasante y subbase son afectados por el aumento de la humedad. Y como las capas superiores, particularmente la capa de base estabilizada con cemento, si bien presenta mejores condiciones mecánicas, presenta deterioros producto de la pérdida de soporte de las capas inferiores.

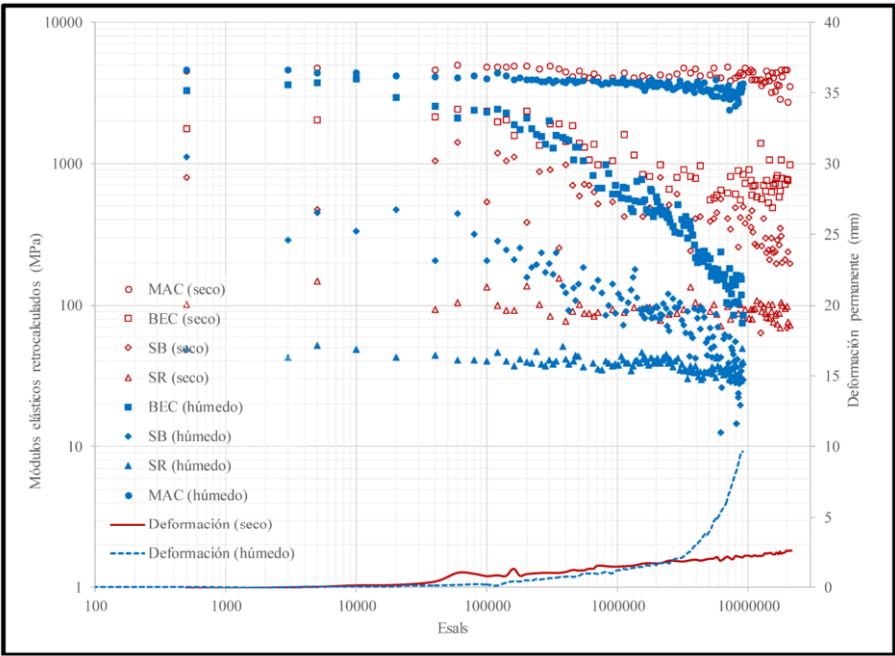


Figura 4. Evolución de los módulos elásticos retrocalculados para la estructura AC4, tramos 002 y 009.

5. Comentarios finales

Las fallas en las capas inferiores de los pavimentos pueden surgir por diversas razones, entre las que destacan: la mala calidad del material utilizado, baja compactación, falta de espesor, defectos en la construcción o acabados.

Sin embargo, se puede apreciar de los ensayos realizados, como partiendo de condiciones iguales de tipo de suelo, materiales granulares, espesores, procesos constructivos y otros, el aumento de la humedad causa un impacto significativo en las capacidades mecánicas del suelo, así como del material de subbase.

Si bien el ensayo es desarrollado en condiciones extremas, donde la alta humedad se mantiene durante toda la vida útil de la estructura, es necesario visualizar el impacto que estas condiciones tienen en el aumento de las deformaciones y agrietamientos de las

estructuras; donde la vida útil de las mismas se llega a reducir hasta en un 95% respecto a la condición de baja humedad.

Se aprecia como las condiciones de esfuerzo varían a lo largo de la vida útil de las diferentes estructuras presentadas, así como las capacidades mecánicas de los materiales se reducen con la aplicación de las cargas y la pérdida de soporte de las capas inferiores.

Con este panorama es necesario entender el comportamiento de las estructuras de pavimento que se encuentran en servicio, identificar las condiciones de vulnerabilidad que las mismas puedan presentar debido a las características de los materiales, particularmente de suelos con poca capacidad para drenar el agua.

De la misma forma en que resulta necesario proteger las capas de suelo que presenten poca capacidad mecánica para soportar las cargas, esta protección podría incluir el uso de materiales cementantes en la capa de subbase, así como en la parte superior de la subrasante.

Referencias

- [1] Bertsch, F., Mata, R., & Henríquez, C. (1993). Características de los principales órdenes de suelos presentes en Costa Rica. San José, Costa Rica: Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica.
- [2] Unidad de Materiales y Pavimentos. (2013). Caracterización físico-química de los suelos de Costa Rica. San José: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.
- [3] Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2002). Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos. Guatemala.
- [4] Mohod, M., & Kadam, K. (2016). A Comparative Study on Rigid and Flexible Pavement: A Review. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 84-88.
- [5] Mallick, R., & El-Korchi, T. (2017). *Pavement Engineering. Principles and Practice* (Tercera edición ed.). Florida: CRC Press.
- [6] Camacho-Garita, E., Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J., & Loria-Salazar, L. (2014). Proceso constructivo PaveLab (LM-PI-UMP-027-R1). Costa Rica: Unidad de Materiales y Pavimentos Programa de infraestructura del transporte (PITRA) LanammeUCR.
- [7] Aguiar-Moya, J. P., Camacho-Garita, E., Arias-Barrantes, E. & Loria-Salazar, L. G., Effect of Moisture on Full Scale Pavement Distress, International Society for Asphalt Pavements Conference (ISAP), Fortaleza, Brazil, 2018.
- [8] Loria-Salazar, L. G., Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J. P. & Camacho-Garita, E., Comparación de desempeño en pista de ensayos acelerados a escala natural de dos estructuras de pavimento semirígidas, Congreso Ibero – Latinoamericano del Asfalto, CILA XVIII, 2015