

## EFFECTO DE LA HUMEDAD EN ENSAYOS A ESCALA REAL DE PAVIMENTOS

Edgar Camacho-Garita<sup>1</sup>, Eliécer Arias-Barrantes<sup>2</sup>,  
José Pablo Aguiar-Moya<sup>3</sup>, Luis Guillermo Loría-Salazar<sup>4</sup>

<sup>1</sup> LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, [edgar.camachogarita@ucr.ac.cr](mailto:edgar.camachogarita@ucr.ac.cr)

<sup>2</sup> LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, [eliecer.arias@ucr.ac.cr](mailto:eliecer.arias@ucr.ac.cr)

<sup>3</sup> LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, [jose.aguiar@ucr.ac.cr](mailto:jose.aguiar@ucr.ac.cr)

<sup>4</sup> LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, [luis.loriasalazar@ucr.ac.cr](mailto:luis.loriasalazar@ucr.ac.cr)

### Resumen

El efecto de la humedad es fundamental para determinar la respuesta del pavimento. Este efecto se torna más importante cuando existen altos niveles de humedad y precipitación. Tal es el caso de las regiones tropicales como Costa Rica, donde existen altas tasas de precipitación, los niveles freáticos tienen mucha variabilidad, y los materiales altamente susceptibles a estas condiciones son muy comunes.

Los resultados del ensayo acelerado a escala real desarrollado en el LanammeUCR (PaveLab), indican que cuando se compara el desempeño de las secciones de prueba sometidas a altas condiciones de humedad, la capacidad de soporte de la estructura de pavimento puede ser tan baja como un 5%; respecto a su homóloga con poca humedad. Además, el daño observado en las secciones de pavimento sometidas a humedad es acelerado, con un importante bombeo de finos desde las capas inferiores.

Se determinó que todas las capas de pavimento son afectadas por las cargas (reducción o aumento de rigidez). Adicionalmente, el efecto adverso de la humedad es mayor en pavimentos conformados sólo por capas granulares, respecto al tramo con base estabilizada (BE). Finalmente, son las capas relativamente más rígidas (MAC y BE) las que más daño sufren, especialmente en la condición húmeda.

**Palabras Clave:** humedad, ensayos acelerados, escala real, PaveLab.

### 1 Introducción

Costa Rica, como en el caso de muchos otros países tropicales, es un país sujeto a cambios en microclimas en muy cortas distancias, así como rápidos y agresivos cambios atmosféricos, y altos niveles de precipitación. El escenario anterior es empeorado por altas cargas viajando a bajas velocidades, suelos expansivos y sistemas de drenaje que son insuficientes o inexistentes para atender la época lluviosa. En resumen, todos los factores se combinan para generar una alta probabilidad de daño por humedad, lo cual abarca desde la pérdida de recubrimiento asfáltico del agregado, baches, agrietamiento (que permite el ingreso de más agua a la estructura de pavimento), hasta cambios en la respuesta del material producto de la humedad en los materiales no ligados, llevando a una falla estructural y funcional de las estructuras de pavimento.

El efecto de la humedad en los diferentes materiales usados para la construcción de pavimentos ha sido analizado por muchos autores, pero la calibración de los modelos de respuesta del pavimento depende de los materiales y condiciones climáticas de cada región.



## 1.1 Capas asfálticas

El daño causado por la humedad ha sido reportado como una de las causas principales en el deterioro de las estructuras de pavimento asfáltico en las regiones tropicales. El daño por humedad está asociado con una reducción en la adhesión entre el ligante asfáltico y la superficie del agregado, o a una falla cohesiva en la estructura del mastic asfáltico cuando está expuesto a condiciones de humedad. Esto depende de muchas variables entre las que se incluyen: tipo de asfalto, propiedades del asfalto y agregado, ambiente y características del tráfico, técnicas constructivas y el uso de aditivos modificantes u otros agentes [1]. En todo caso, la presencia de humedad en los poros del agregado donde el agua puede entrar, y/o en la interfase asfalto/agregado, es el factor más común en la pérdida del recubrimiento asfáltico.

El daño por humedad puede ocurrir en la interfase del mastic (mezcla del asfalto y la fracción fina del agregado mineral) y la superficie del agregado (falla adhesiva) o en la estructura del mastic propiamente (falla cohesiva). El tipo de falla que ocurra depende principalmente de las propiedades del mastic. Adicionalmente, muchos otros factores también afectarán la susceptibilidad a la humedad, como la adición de un modificante en el ligante asfáltico, líquidos anti-strip (para prevenir la pérdida del recubrimiento asfáltico), o cal hidratada [2]. También se ha reportado que un aumento en el pH del agua, en la superficie del asfalto y agregado, tiene un importante efecto en el debilitamiento en la adhesión entre estos materiales [3].

Una revisión literaria de Tarrer y Wang [1] muestra al menos cinco mecanismos de falla están asociados a daño por humedad y pérdida del recubrimiento asfáltico, los cuales pueden ocurrir individualmente o de forma simultánea: desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poro y lavado hidráulico. El desprendimiento ocurre cuando una capa delgada de agua desplaza por completo la capa de asfalto de la superficie de agregado. Esto es resultado de una menor energía de superficie libre de agua en comparación con el aglutinante asfáltico, lo que da como resultado una mayor humectabilidad del agregado [1, 3].

El desplazamiento difiere del desprendimiento porque el agua penetra en la superficie del agregado por una grieta en la capa de ligante asfáltico, causado por un recubrimiento inapropiado o una ruptura de la película [5]. La emulsificación espontánea resulta cuando agua y ligante asfáltico se combinan para formar una emulsión. El fenómeno se amplifica con la presencia de emulsificantes como algunas arcillas minerales y aditivos del ligante asfáltico [5]. La presión de poro puede también generar daño por humedad en mezclas asfálticas con un alto contenido de vacíos, típicamente en mezclas asfálticas de graduación abierta donde el agua puede circular a través de los vacíos interconectados. El problema es peor si el agua queda atrapada en los vacíos impermeables [6]. La socavación hidráulica ocurre solamente en la superficie del pavimento, y es el resultado del efecto de las llantas de los vehículos en la superficie húmeda del pavimento, lo cual genera altas presiones delante de las ruedas y succión en la parte posterior de la llanta [5].

Por sí mismo el daño por humedad no es un tipo de deterioro, pero es un proceso de condicionamiento que va a resultar en la aparición de uno o más tipos de deterioro diferentes que se asocian a la aplicación de carga, como lo son fatiga, la deformación, o deterioros asociados a esfuerzos térmicos como agrietamientos en bloque o transversales [7]. Consecuentemente los efectos del daño por humedad en las capas de mezcla asfáltica pueden ser cuantificados por los cambios en la rigidez de las capas [8].

## 1.2 Materiales sin estabilizar

Generalmente se ha presentado que la presencia de agua en las capas granulares y cohesivas debajo de la capa de mezcla asfáltica resulta en una reducción de la capacidad de soporte, y por lo tanto una reducción en la vida de servicio del pavimento [9, 10, 11]. El problema de la



humedad es más relevante cuando consideramos que el balance de agua en la estructura de pavimento está cambiando constantemente [12].

En general, el efecto de la humedad en la rigidez es no lineal y altamente dependiente del proceso constructivo (por ejemplo, compactación de las capas granulares o cohesivas, y la gradación), lo que puede resultar en un aumento significativo de la deformación permanente [13 y 14]. Por lo tanto, los cambios continuos en la humedad desde la fase de construcción y a través de las variaciones climáticas como la precipitación, variaciones en el nivel freático y los ciclos de congelamiento deben ser contemplados en el diseño estructural y del material.

Especialmente en los casos de los materiales de grano fino sin estabilizar, el estado de la saturación puede afectar significativamente la respuesta del material a la presión de poro [15]. Incrementos en el contenido de finos, índice de plasticidad, y valores de azul de metileno resultan en materiales más susceptibles a cambios en la humedad [16].

Las variaciones del nivel freático también tienen una influencia directa en el módulo resiliente de los materiales no ligados. Cuando el nivel freático está cerca de la superficie, generalmente la saturación puede asumirse basados en los modelos de flujo tradicionales. Por lo tanto, cambios en el nivel freático resultan en la migración de finos desde las capas cohesivas a las capas granulares.

### 1.3 Objetivo

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la humedad en el desempeño de los pavimentos, basados en ensayos acelerados a escala natural de pavimentos (APT por el acrónimo en inglés), y se fundamenta en el ensayo de dos estructuras de pavimentos diferentes. Los ensayos APT fueron desarrollados en las instalaciones del PaveLab, utilizando un Simulador de Vehículos Pesados (HVS). El desempeño de los materiales fue evaluado mediante la medición de: los cambios en el módulo de las capas, deformación permanente y regularidad superficial. El efecto de la humedad fue capturado mediante la saturación parcial de las capas de materiales no ligados.

## 2 Tramos de ensayo

Los tramos de ensayo usados en el análisis son parte del grupo inicial de experimentos desarrollados en el PaveLab en Costa Rica, y corresponden a 4 estructuras que fueron construidas en Marzo de 2012 (Figura 1). El ensayo de las secciones inició en Julio 2013, utilizando llantas duales 11R22.5, con una presión de inflado de 90psi, aplicando una presión estándar de 40kN y subiéndola gradualmente hasta 80kN según la reacción de las estructuras.

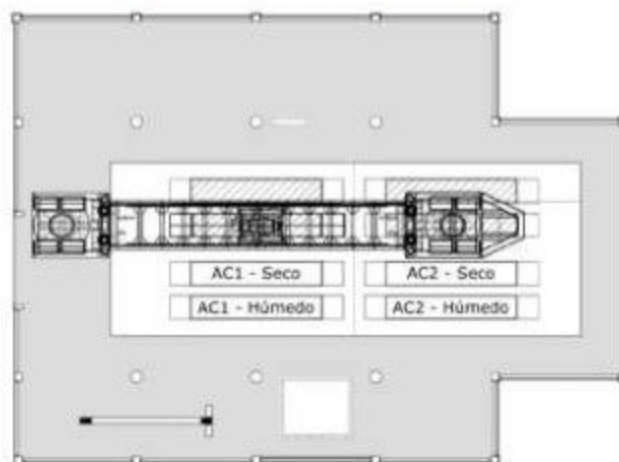


Figura 1. Distribución de los tramos de ensayo.

El objetivo de este grupo de ensayos consistió en una comparación estructural de condiciones típicas en el país: uso de bases granulares contra bases estabilizadas con cemento (BE), así como una capa de mezcla asfáltica (MAC) delgada y una gruesa. La Tabla 1 resume los espesores y propiedades de materiales de las secciones analizadas. Los espesores de las capas fueron verificados mediante un Radar de Penetración (Ground Penetrating Radar, GPR) y extracción de núcleos. Los módulos iniciales fueron determinados mediante retrocálculo de módulos basados en resultados de Deflectometría de Impacto (FWD) [17]

Tabla 1. Propiedades promedio de los tramos de ensayo.

Propiedades \ Sección	AC1	AC2	AC3	AC4
Espesor MAC (H1), cm	6.1	6.3	13.2	13.2
Espesor de base (H2), cm	21.9	21.2	31.0	24.9
Espesor de Subbase (H3), cm	30.1	30.1	30.1	30.1
Módulo de MAC (E1) @ 25 °C, MPa	3800	3800	3800	3800
Módulo de Base (E2), MPa	1200	170	170	1200
Módulo de Subbase (E3), MPa	140	140	140	140
Módulo de Subrasante (E4), MPa	70	70	70	70

La capa superior consiste en mezcla asfáltica con un tamaño máximo nominal de 19.0 mm, con un contenido óptimo de asfalto de 4.9% por peso total de la mezcla. La BE fue diseñada para una resistencia del 35 kg/cm<sup>2</sup> con un contenido de cemento de 1.7% por volumen de agregado, y con una densidad máxima de 2013 kg/m<sup>3</sup>. El material de base y la subbase granular se colocaron con una densidad máxima de 2217 kg/m<sup>3</sup> con una humedad óptima de 8.6%. El material de subbase tiene un CBR de 95%. Finalmente, el material de la subrasante (MH, A-7-5) fue construido para una densidad máxima de 1056 kg/m<sup>3</sup> con un contenido óptimo de humedad de 52% (contenido típico de humedad en Costa Rica) con un CBR de 6.6%. Ambos materiales, subrasante y material de subbase, son uniformes para todas las secciones.

Para todos los análisis siguientes, las secciones AC1 y AC2 fueron ensayadas con un contenido de humedad cercano al óptimo, condiciones que se compara con las secciones idénticas (AC1-Húmeda y AC2-Húmeda) que fueron sometidas a condiciones altas de nivel freático resultando en condiciones cercanas a la saturación de los materiales no ligados.

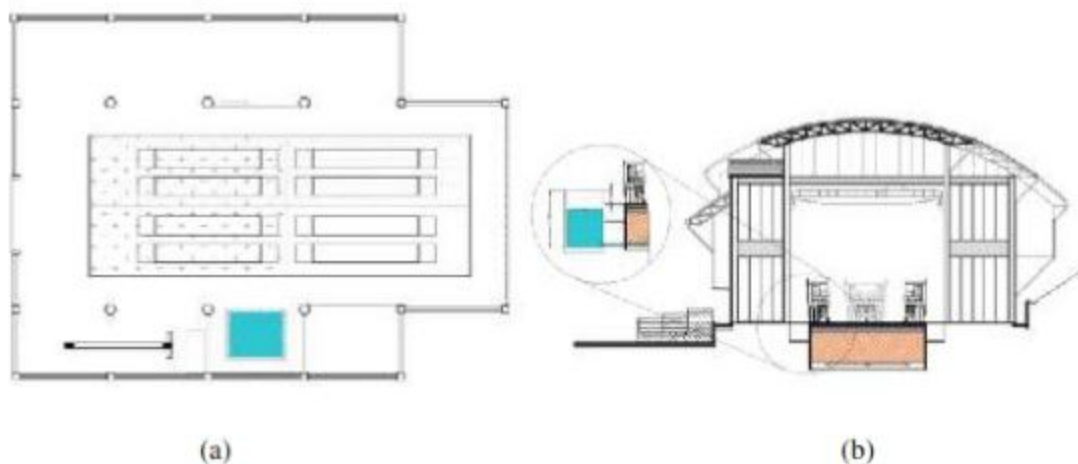


Figura 2. (a) Vista en planta y (b) Vista lateral de las instalaciones del PaveLab, mostrando la conexión del tanque de agua.



El control del nivel freático fue desarrollado mediante un sistema gravitacional para distribuir la humedad, tal como se observa en la Figura 2. En términos generales el diseño se basa en la experiencia de otras instalaciones que desarrollan ensayos APT [18].

### 3 Instrumentación

Las mediciones fueron desarrolladas utilizando los instrumentos integrados a el HVS para las cuatro secciones. La instrumentación incluida en el HVS registra la carga aplicada, la presión y temperatura de las llantas, así como la posición y velocidad de las ruedas de ensayo. Los sensores colocados en el pavimento incluyen galgas de deformación, celdas de presión, deflectómetros de profundidad múltiple y sensores de humedad y temperatura. Adicionalmente el HVS está equipado con dos sensores láser (RSP), con los cuales se puede registrar y recrear un perfil tridimensional de la superficie. Adicionalmente, con el deflectómetro de superficie (RSD) se pueden obtener deflexiones en prácticamente cualquier punto de la sección de ensayo.

Los sensores para medir la deformación en la fibra inferior de la capa de mezcla asfáltica (MAC) se colocaron en la interfaz entre la base y la capa de MAC, en sentido transversal y longitudinal. Los sensores de presión se colocaron en la interfaz subbase/subrasante. Los deflectómetros de profundidad múltiple (MDD's) se ubicaron en 4 profundidades diferentes para cubrir las 4 capas estructurales. Las termocuplas también se colocaron a 4 diferentes profundidades: superficie, capa MAC a mitad del espesor, a la profundidad de los sensores para deformación, y 5 centímetros dentro de la capa de base. Para el caso de las estructuras AC1 y AC4 se utilizó el mismo arreglo de sensores, pero excluyendo los sensores PAST. Finalmente, también se instaló un sensor de humedad en cada una de las secciones que fueron evaluadas bajo condiciones de humedad cercanas a la saturación.

La recolección de información: perfil tridimensional de la superficie, deformación, presión, temperatura y deflexiones; se define con base al número de repeticiones. Al principio de cada ensayo se registran los datos en intervalos cortos, después de las 20.000 repeticiones la información se recolecta de forma diaria. De igual manera se realizan inspecciones diarias en busca de agrietamientos debido a fatiga, reflexión de grietas, pérdida de fricción, pérdida de adhesión entre agregado y asfalto, así como cualquier otro deterioro de la superficie. Estas inspecciones se desarrollan junto con el mantenimiento diario que se le brinda al equipo HVS.

Finalmente, se calcula IRI mediante el modelo matemático de cuarto de coche, para cada una de las líneas de datos que recolecta el equipo; donde transversalmente cada una de las líneas de datos es independiente. Una limitación asociada a esta estimación de IRI es la longitud de la sección de ensayo de 6 metros, y donde la distancia que efectivamente mide el láser es de 5.1 m. Por lo tanto, el IRI corresponde a un promedio de la respectiva distancia.

### 4 RESULTADOS

Para observar como la saturación de las capas inferiores afecta el desempeño del pavimento, las mediciones con el perfilómetro láser son registradas durante el ensayo, diariamente, para darle seguimiento a la evolución de la deformación en el tiempo. Estas mediciones permiten obtener distribuciones 3D del ahuellamiento e IRI en las secciones de ensayo. La rigidez también es seguida mediante el uso de la viga RSD. Los datos registrados son posteriormente utilizados para realizar retrocálculos de módulos para cada una de las capas de los pavimentos.

El retrocálculo está basado en la teoría de Odemark-Boussineq (Eq. 1) considerando el comportamiento no-lineal de la subrasante según la Ecuación 2 [19].

$$h_{e,n} = f \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \left( h_i \cdot \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \right) = f \left\{ \left[ \left( h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} + h_2 \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} - \dots - h_{n-1} \right] \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_n}} \right\} \quad \text{Eq. 1}$$

Donde,

$E_i$  = Módulo de la capa "i"

$h_i$  = Espesor de la capa "i"

f = factor de ajuste de 1.0 para la interface de la capa superficial y de 0.8 – 1.0 para las demás capas.

$$E_S = C \times \left( \frac{\sigma_d}{0.1 M} \right)^n \quad \text{Eq. 2}$$

Donde,

$E_{SG}$  = módulo de la capa subrasante

$\sigma_d$  = esfuerzo desviador

C y n = parámetros del modelo

Los resultados medidos para las secciones de ensayo AC1-Seco, AC1-Húmedo, AC2-Seco y AC2-Húmedo van a ser discutidos en las secciones restantes de este documento. Los valores de módulo resiliente que se presentan están basados 580 retrocálculos de módulos, y donde se obtuvieron 2300 valores de rigidez para diferentes capas.

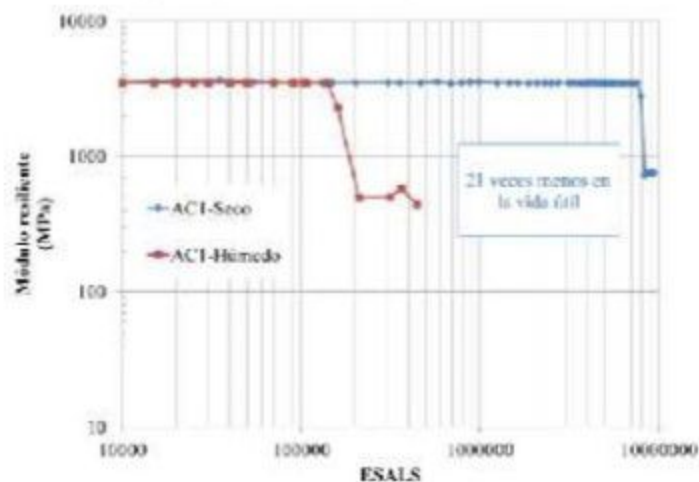


Figura 3. Cambio en la rigidez de la capa de MAC durante el ensayo.

Se observó una diferencia significativa en las cargas requeridas para alcanzar la falla al comparar las secciones en condición seca y en condición saturada. La Figura 3 muestra el cambio en la rigidez de la capa de MAC para el caso de una estructura. En términos de ESALS, se puede determinar que la sección AC2-Seca resistió 21 veces lo que la sección AC2-Húmeda: 9.40 vs 0.45 MESALS respectivamente.



Figura 4. Deterioros en la sección AC2-Húmeda al momento de la falla.



Adicionalmente, hacia el final de la vida útil, bajo condiciones húmedas, las capas de MAC muestran una disminución significativa del módulo elástico (medido por medio de RSD) cambiando de una rigidez inicial de 3500 MPa a 439 MPa en la condición de falla; 12% de la capacidad inicial. Los resultados para la sección AC1 en condiciones secas y húmedas no se muestran debido a que el mecanismo de falla difiere: no hubo cambios significativos en el módulo de la MAC, ya que la mayor parte del daño ocurrió en la capa de BE.

Es importante señalar que el mecanismo de falla entre las condiciones seca y húmeda son considerablemente diferentes. En el caso de las estructuras en condición seca, la falla se relaciona a la disminución de la rigidez de algunas capas, agrietamientos menores y deformación permanente. En el caso de las estructuras parcialmente saturadas, las condiciones anteriores también se observaron, pero en una intensidad considerablemente mayor. También se observó un importante bombeo de finos en el último caso. Una condición de falla típica se muestra en la Figura 4.

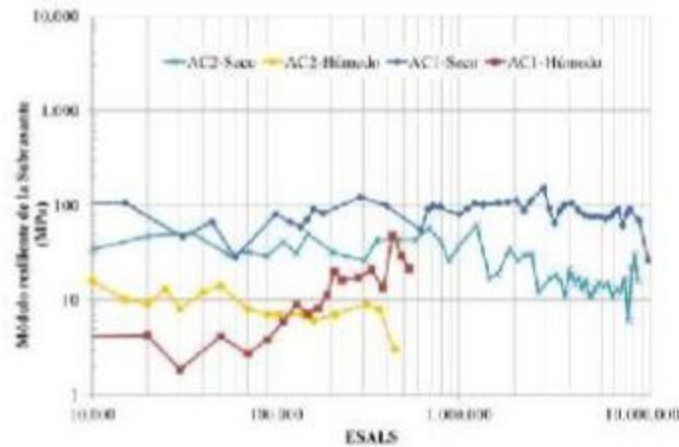


Figura 5. Cambio en la rigidez de la subrasante ante la carga.

Cuando comparamos como la humedad puede afectar el comportamiento de las diferentes capas que componen el pavimento, se puede notar que la humedad afecta principalmente la rigidez de la subrasante. Lo anterior puede esperarse por las propiedades del material (alta plasticidad y susceptibilidad a los cambios volumétricos). En el caso de las secciones AC2, la reducción en la rigidez de la subrasante varío entre 4 y 14 veces comparando la rigidez de la condición seca contra la húmeda. En el caso de las secciones AC1 se observaron diferencias de 24 veces al comparar las dos condiciones de humedad (Figura 5).

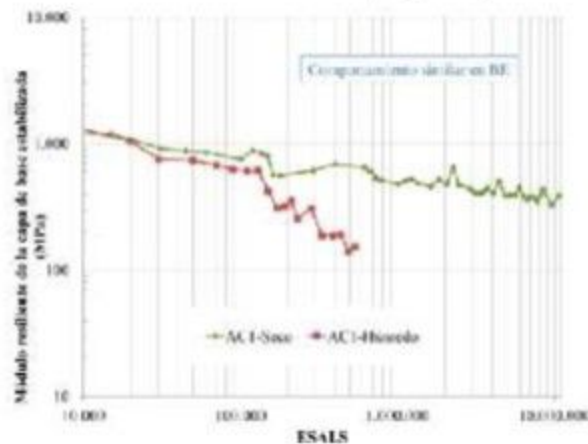


Figura 6. Cambio en la rigidez de la capa de BE ante la carga.

Es importante señalar que en el caso de AC1-Seco, después del 2% de las cargas requeridas para la falla (180.000 ESALs), la reducción en la rigidez de la BE fue cercana al 50% de la rigidez inicial. Lo anterior es un indicador que la BE se agrieta rápidamente durante las etapas iniciales de servicio. Después de la pérdida inicial de rigidez, la tasa de reducción de rigidez disminuye hasta la falla final, donde la rigidez corresponde aproximadamente al 30% de la rigidez inicial. En dicho estado el comportamiento es similar a una base granular.

El mismo patrón se pudo observar en la sección AC1-Húmeda. En todo caso, bajo condiciones de saturación, la pérdida del 50% de la rigidez inicial ocurre más aceleradamente (30.000 ESALs). Se espera que el comportamiento anterior se pueda atribuir a la significativa diferencia en el módulo de la subrasante, resultando en una menor rigidez global de de la estructura debido a la humedad.

La Figura 6 muestra la disminución inicial en la rigidez, esto se observó en la BE para condiciones seca y húmeda.

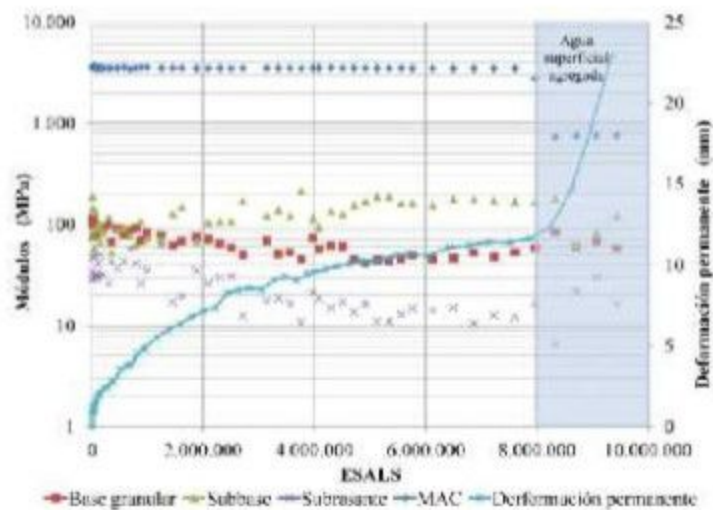


Figura 7. Cambio en la rigidez y deformación permanente para la sección AC2-Seco.

La Figura 7 muestra un resumen del cambio en la rigidez para las diferentes capas, así como la deformación permanente para esa sección. Se puede observar una reducción considerable de la rigidez en la subrasante durante el ensayo: cambiando desde una rigidez inicial de 47 MPa a 12 MPa al momento de la falla. Lo anterior puede asociarse a daño en el material evaluado. Esto también puede ser un indicador de capacidad insuficiente de la estructura de pavimento.

Se puede identificar un aumento en el módulo de la subbase (stress hardening). Este efecto se puede atribuir al proceso de aplicación de cargas en la estructura y la reacción de la misma previo a las mediciones de deflexión.

Cada aumento en la carga se realiza para acelerar el proceso de daño y aumentar los ESALs aplicados en la sección de ensayo. En todo caso es importante resaltar que ese patrón de carga no es aleatorio, sino que se aplica a las diferentes estructuras según la reacción de las mismas. El procedimiento de aumento de cargas se desarrolló de manera que cuando una estructura de pavimento entrara en una fase estable de deterioro, el aumento en la carga acelerara el proceso de daño. Normalmente los incrementos de carga se realizaron en intervalos de 10kN.

Hacia el final de la vida útil de la sección de pavimento en particular, dos procesos pueden ser claramente identificados y relacionados: 1) la pérdida de módulo resiliente de la capa de MAC, lo que a su vez correlaciona con 2) un aumento en la tasa de deterioro (p.e. aumento en la deformación permanente e IRI). El mayor aumento en la deformación permanente ocurre durante la aplicación de las últimas cargas: 100% de incremento en la deformación durante el último 10% de las cargas aplicadas (ESALs).



La sección AC2-Húmeda exhibe un comportamiento similar en términos de rigidez. Sin embargo, los cambios ocurrieron en intervalos de tiempo completamente diferentes. A pesar de que las secciones AC2-Seco y AC2-Húmedo son estructuralmente idénticas la presencia de humedad dio lugar a que este último solo tuviera el 5% de la capacidad estructural de la primera (condición seca).

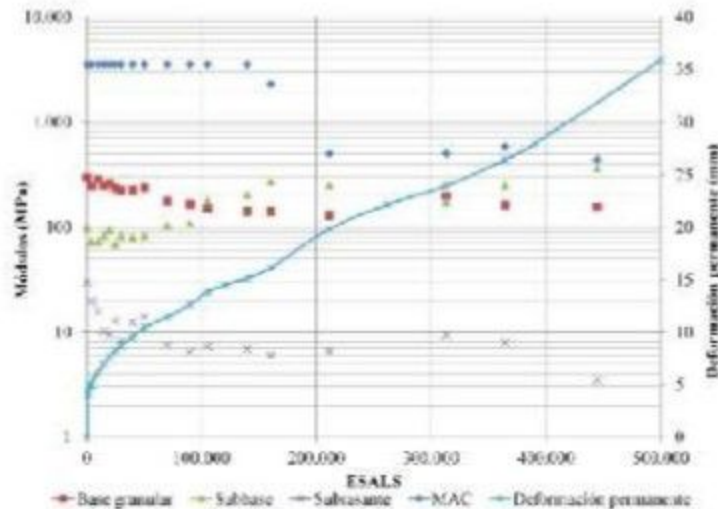


Figura 8. Cambio en la rigidez de las capas y deformación permanente para la sección AC2-Húmeda

Debido a lo anterior, el patrón de deformación permanente para la sección AC2-Húmeda es diferente al de AC2-Seca. La Figura 8 muestra que después del proceso de consolidación inicial, la deformación permanente sigue una tendencia relativamente lineal, con una tasa de deformación de aproximadamente 6 mm por 100.000 ESALS. El comportamiento es diferente al de la sección AC2-Seco, que presenta un típico proceso de deformación en tres etapas. La evolución de la deformación en AC1-Seco fue muy similar a la sección AC2-Seca.

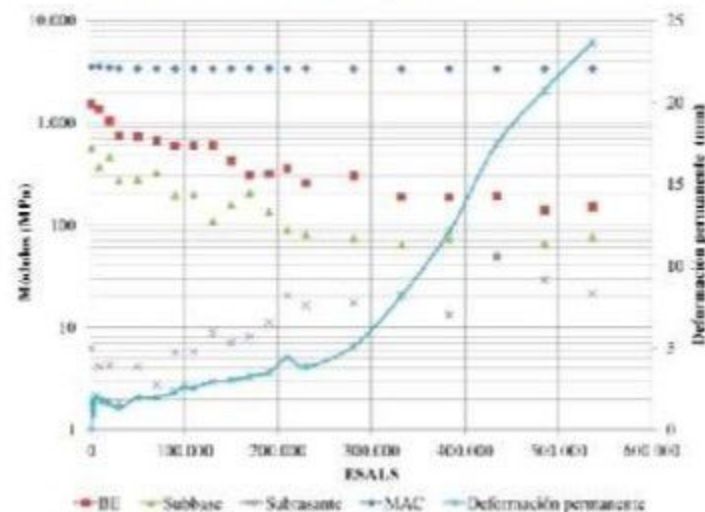


Figura 9. Cambio en la rigidez de las capas y deformación permanente para la sección AC1-Húmeda.

La Figura 9 muestra la evolución de la deformación permanente para la sección AC1-Húmeda. La sección incluye una capa de BE que redujo en gran medida las deformaciones permanentes durante la primera etapa de aplicación de cargas (hasta 250.000 ESALS). Sin

embargo, después del umbral anterior, cuando la rigidez de la capa de BE se reduce de forma significativa, ocurre un claro aumento en la tasa de deformación, concluyendo en el fallo de la sección basados en criterio de deformación y regularidad (IRI).

La Figura 10 muestra como aumenta la deformación permanente de la sección AC1-Húmeda. Se pudieron apreciar agrietamientos reflejados desde la base estabilizada (BE), dando como resultado una rápida pérdida de soporte de la estructura de pavimento ante la presencia de agua y el bombeo de finos. Sin embargo, la deformación no fue uniforme en la sección, y la mayor deformación se puede observar en la parte derecha de la Figura 10, donde existen depresiones y elevaciones importantes. Adicionalmente el bombeo de finos pudo ser claramente apreciado, resultando en pilas de más de 8mm de alto.

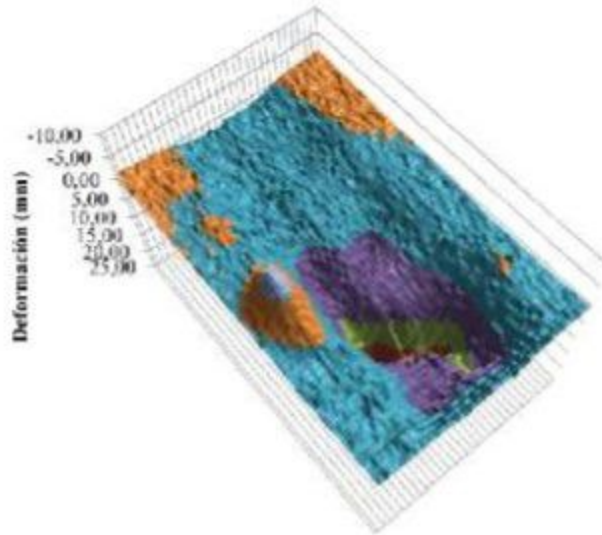


Figura 10. Deformación permanente para la sección AC1-Húmeda.

Futuros análisis de los datos obtenidos con los MDDs permitirán identificar los diferentes patrones de deformación en cada una de las capas y como el deterioro se relaciona a la pérdida de rigidez. Los datos de MDDs también permitirán observar la consolidación de una o más capas, así como el flujo plástico de la capa de MAC.

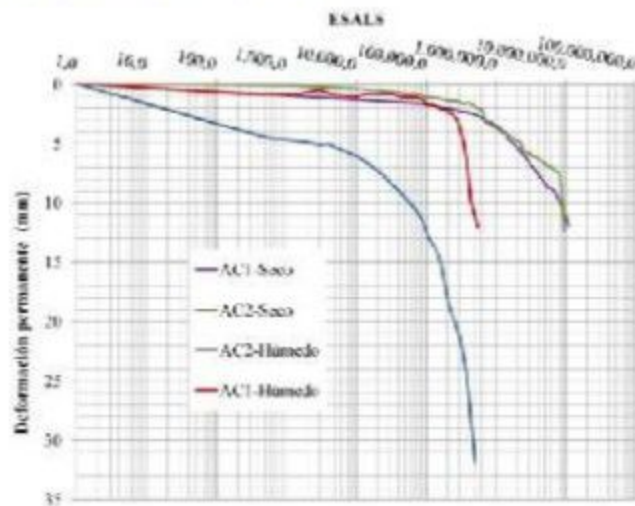


Figura 11. Cambio en la deformación permanente durante la carga.

La Figura 11 muestra como la deformación permanente incrementa para las diferentes secciones de ensayo. Los datos son presentados en escala logarítmica para simplificar la



comparación visual de la evolución de los deterioros, considerando secciones de pavimento secas y húmedas.

Como en el caso del cambio en la rigidez, las secciones de pavimento que fueron evaluadas en condición seca alcanzan la falla por deformación a una tasa considerablemente más lenta que sus pares saturados.

Los perfilómetros láser utilizados en este estudio (RSP) son muy similares a los utilizados para medir el perfil longitudinal de carreteras, consecuentemente permiten realizar una estimación del IRI.

El IRI resultante para las secciones analizadas se muestra en la Figura 12. La figura muestra como durante las primeras cargas se presenta una leve mejora en los valores de IRI, asociado al reacomodo del material y post-compactación.

Como se esperaba, los cambios en IRI correlacionan directamente a los cambios en la rigidez del material que se habían mencionado previamente, así como al aumento en la deformación permanente asociada a la carga.

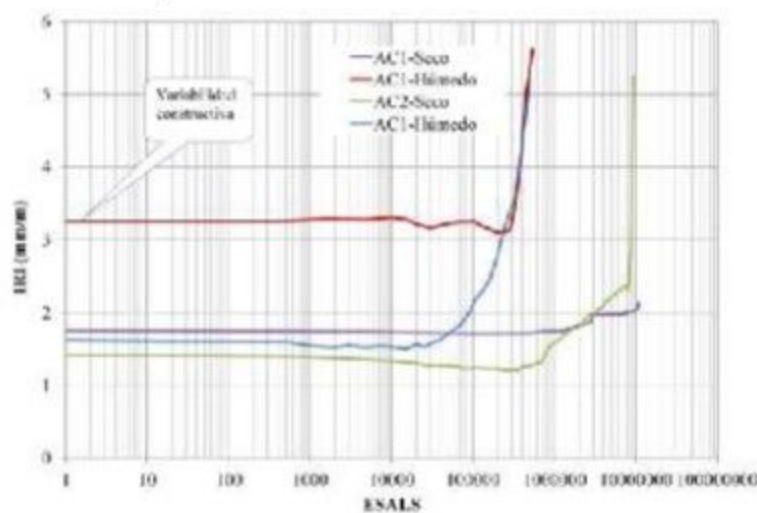


Figura 12. Cambios en el IRI asociados a las cargas.

## 5 Conclusiones

En el caso de las estructuras de pavimento analizadas se pudo apreciar que la saturación parcial de las capas inferiores afecta de forma significativa la durabilidad y estabilidad de la estructura de pavimento. La capacidad en términos de ESALs para alcanzar la falla en condiciones húmedas están en el rango de 4.71% a 5.00% para las secciones AC2 y AC1, con respecto a las secciones secas.

Con excepción de AC2-Húmeda, todas las secciones mostraron un patrón típico de 3 etapas de evolución en deformación permanente: post-compactación, deformación a tasa constante y finalmente deformación alta y pérdida del recubrimiento asfáltico. En el caso de AC2-Húmeda (base granular), la tasa de deformación fue prácticamente constante 6 mm por cada 100.000 ESALs aplicados, y no alcanzó una fase terciaria en deformación.

En el caso de las secciones AC2 (base granular) se observó que hacia el final de la vida útil, el módulo elástico de la capa de MAC se había reducido a un valor entre 12% y 20% del módulo inicial.

En el caso de las secciones con capa de BE, se observó una caída de 50% de la rigidez inicial después de pocas aplicaciones de carga (2%-5% de los ESALs requeridos para alcanzar la falla de AC1-Seca y AC1 Húmeda respectivamente). Al momento de alcanzar la falla, la rigidez de la capa de BE se redujo significativamente: alcanzando 10% del módulo inicial para el caso de AC1-Húmeda.

El aumento aparente de rigidez en la subbase y subrasante que se observó se encuentra en análisis, mediante herramientas de multicapa lineal elástica y elemento finito. Sin embargo, como se discute en el artículo, se espera que los fenómenos estén relacionados con el comportamiento no lineal del suelo de la subrasante cohesiva.

Finalmente se espera que los experimentos de APT para analizar el efecto de la humedad continúen mientras se van modificando los materiales utilizados, los espesores, los procesos constructivos; con el objetivo de recolectar la información requerida para calibrar los modelos de respuesta y desempeño que puedan tener en cuenta las condiciones de humedad de las regiones tropicales.

## 6 Referencias

- [1] Tarrer, A.R., and Wagh, V. The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding. Report SHRP-A/UIR-91-507. Washington, D.C., 1991.
- [2] Howson, J., Masad, E.A., Bhasin, A., Castelo, V., Arambula, E., Lytton, R., and Little, D. System for the Evaluation of Moisture Damage Using Fundamental Material Properties. Report FHWA/TX-07/0-4524-1. Texas, 2007.
- [3] Scott, J.A.N. Adhesion and Disbonding Mechanisms of Asphalt Used in Highway Construction and Maintenance. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 47, pp 19-24 Minnesota, 1982.
- [4] Majidzadra, K., and Brovold, F.N. State of the Art: Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures. Highway Research Board Special Rept. 98. Washington, D.C., 1968.
- [5] Fromm, H.J. The Mechanisms of Asphalt Stripping from Aggregate Surfaces, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 43, 1974, pp. 191-223.
- [6]. A.I. Cause and Prevention of Stripping in Asphalt Pavements, Educational Series No. 10, Asphalt Institute, College Park, MD, 1981.
- [7]. Little, D.N., Epps, J.A., and Sebaaly, P.E. The Benefits of hydrated lime in hot mix asphalt. National Lime Association. 2006.
- [8]. Aguiar-Moya, J.P., Torres-Linares, P., Camacho-Garita, E., Leiva-Villacorta, F., and Loría-Salazar, L.G. Development of IRI Models Based on APT Data. The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability, pp 799-813. 2016.
- [9] Hussain, J., Wilson, D.J., Henning, T., and Alabaster, D. What happens when it rains? Performance of unbound flexible pavements in accelerated pavement testing. Road and Transport Research Vol. 20, Issue 4, pp. 3-15. 2011.
- [10] Toros, U., and Hiltunen, D. Effects of moisture and time on stiffness of unbound aggregate base coarse materials. Transportation Research Record 2059, pp. 41-51. 2008.
- [11] Ekblad, J., and Isacson, U. Influence of water and mica content on resilient properties of coarse granular materials. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 9, pp. 215-27. 2008.
- [12] Zapata, C.E., Perera, Y.Y., and Houston, W.N. Matric suction prediction model in new AASHTO mechanistic-empirical pavement design guide. Transportation Research Record 2101, pp. 53-62. 2009.
- [13] Huurman, R., and Molenaar, A.A.A. Permanent deformation in flexible pavements with unbound base courses. Transportation Research Record 1952, pp. 31-8. 2006.
- [14] Chandra, D., Chua, K.M., and Lytton, R.L. Effects of temperature and moisture on the load response of granular base course material in thin pavements. Transportation Research Record 1252, pp. 33-41. 1989.
- [15] Salour, F., Erlingsson, S., and Zapata, C.E. Modelling resilient modulus seasonal variation of silty sand subgrade soils with matric suction control. Canadian Geotechnical Journal 51, pp. 1413-1422. 2014.
- [16] Caicedo, B., Coronado, O., Fleureau, J.M., Gomes, A. Resilient Behaviour of non Standard Unbound Granular Materials. Road Materials And Pavement Design, Vol. 10, Issue 2, pp. 287-312. 2009.
- [17] Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J.P., Loría-Salazar, L.G. Accelerated Pavement Testing First Results at the LanammeUCR APT Facility. Transportation Research Board 94th Annual Meeting Proceedings. Washington, D.C. 2015.
- [18] Hugo, F., Epps Martin, A.L. Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing. NCHRP Synthesis 325. Washington, D.C. 2004.
- [19] Ullidtz, P. Pavement Analysis, Development in Civil Engineering, Vol.19, Amsterdam, the Netherlands. 1987.