

EFFECTO DE LA HUMEDAD SUPERFICIAL EN UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO BAJO CONDICIONES DE ENSAYO ACELERADO A ESCALA NATURAL

Fabricio Leiva Villacorta¹, Edgar Camacho Garita², José Pablo Aguiar Moya³, Luis Guillermo Loría Salazar⁴

¹ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. fabricio.leiva@ucr.ac.cr

² Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. edgar.camachogarita@ucr.ac.cr

³ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. jose.aguiar@ucr.ac.cr

⁴ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Resumen

Mediante los ensayos de pavimentos desarrollados por parte del LanammeUCR en el PaveLab se ha logrado apreciar el comportamiento de diversas estructuras de pavimento bajo la acción de las cargas aplicadas por la rueda de ensayo del equipo denominado HVS (Heavy Vehicle Simulator).

El presente artículo se enfocará en describir el cambio de comportamiento de las estructuras al agregar humedad superficial. El principal efecto presentado por la estructura, debido a la presencia de agua superficial, fue el bombeo de la fracción fina del material utilizado para la base granular. Este material salió a la superficie por las grietas que se formaron en la capa de ruedo durante la etapa seca del ensayo (900 mil repeticiones de carga), así como las grietas que se formaron posteriormente con la aplicación de agua (100 mil repeticiones adicionales). Las grietas predominantes fueron grietas transversales. Así mismo, fuera del área de paso de la llanta, se presentó agrietamiento longitudinal, con los cuales se completó el agrietamiento por bloques (cuadros).

Este tipo de deterioros con bombeo de finos se pueden observar en Costa Rica cuando se colocan capas delgadas de mezcla asfáltica sobre bases granulares con malas condiciones de drenaje, así como cuando se utiliza una capa de base estabilizada con cemento pero la presenta deficiencias constructivas. El ingreso de la humedad y el respectivo bombeo de finos podrían controlarse mediante una oportuna colocación de un sello asfáltico que impermeabilice la superficie; limitando también la deformación por el movimiento de la base granular.

1 Aspectos generales

El experimento presentado se enmarca en el proyecto denominado Promevial, desarrollado por la Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Promevial es una iniciativa enfocada al mejoramiento de la infraestructura vial de Costa Rica, mediante el desarrollo tecnológico en el campo de las carreteras y el diseño estructural de pavimentos.

Como parte de la necesidad de profundizar en el estudio del comportamiento y desempeño de las diferentes estructuras de pavimento en Costa Rica se adquirió un equipo para el ensayo acelerado de pavimentos (Figura 1). Con dicho equipo, desde el año 2013 se realizan ensayos acelerados de

pavimentos a escala real en Costa Rica, constituyéndose el laboratorio de pavimentos conocido como PaveLab.



Figura 1 Equipo para ensayo de pavimentos a escala real del LanammeUCR, HVS Mark VI.

2 Características del tramo ensayado

El tramo de ensayo específico al que se refiere el presente artículo, se denominó 003AC2 y forma parte de la primera construcción de tramos experimentales evaluados en el PaveLab. La distribución general de los mismos se puede apreciar en la Figura 2, donde se resalta el tramo en mención.

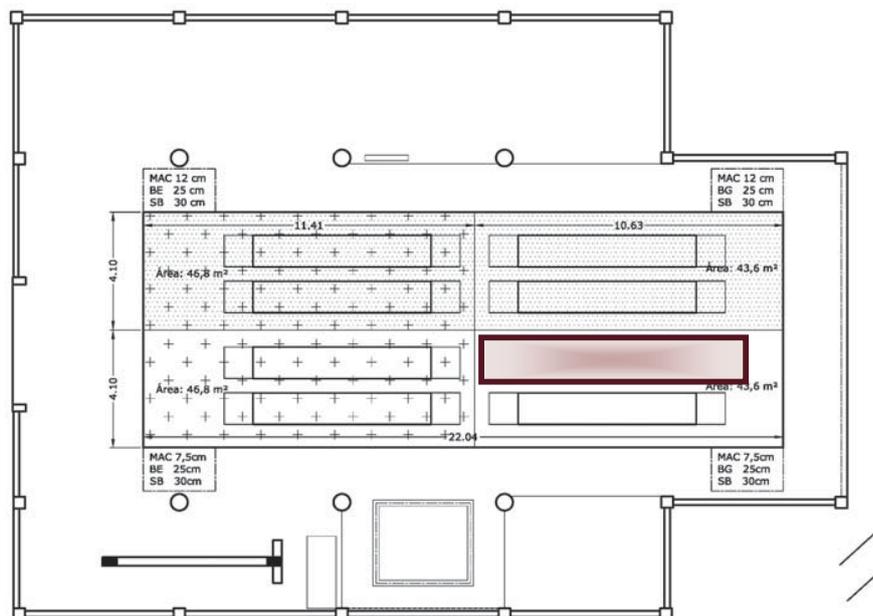


Figura 2 Distribución del primer conjunto de tramos

De la distribución de tramos mostrada se destaca que el tramo es una de cuatro estructuras construidas y está constituida nominalmente por 7,5 cm de mezcla asfáltica en caliente como capa de rueda, 24 cm de base granular, 30 cm de subbase granular y cerca de dos metros de suelo colocado y compactado en la fosa de ensayo.

La capa asfáltica es una mezcla en caliente diseñada con la metodología Marshall con tamaño máximo nominal de agregado de 19.0 mm y contenido óptimo de ligante de 4.9% por peso total de mezcla. El material de base y sub-base granular se colocó a una densidad máxima de 2217 kg/m³ con un contenido óptimo de humedad de 8.6% y un valor de CBR de 95%. Finalmente, el material de subrasante se construyó para obtener una densidad máxima de 1056 kg/m³ con un contenido óptimo de humedad de 52% y un CBR de 6.6%.

3 Proceso de ensayo

Una vez que el tramo de ensayo ha sido construido, y previo a la aplicación de las cargas se realiza deflectometría de impacto sobre la estructura. De esta manera se puede tener una medición de la capacidad estructural inicial del tramo. La segunda etapa es la instalación de los deflectómetros de profundidad múltiple (MDD), los cuales permitirán el seguimiento del desempeño estructural durante el desarrollo del ensayo. El siguiente paso es la colocación del equipo (HVS) sobre el tramo a ensayar. Para un adecuado desarrollo de la prueba es necesario ser muy cuidadoso en la instalación del equipo, de manera que la ubicación transversal y longitudinal coincida con el dibujo del tramo y la ubicación de los diferentes sensores previamente instalados.

Antes de aplicar las primeras repeticiones de carga que forman parte del experimento se hace una medición de la superficie del tramo (perfil) mediante la secuencia programada en el equipo HVS con dos sensores laser. La secuencia programada permite mover la rueda de ensayo transversalmente (junto con los laser) a cada una de las 32 posiciones laterales que permite el equipo y para cada una de estas se hace un recorrido longitudinal. Esta rutina permite medir las distancias entre la superficie y los sensores laser lo que permite la generación de una matriz de 50 datos longitudinales y 64 datos transversales (2 sensores laser).

Con las primeras aplicaciones de carga se presentan con alguna facilidad deformaciones iniciales en la estructura, debido a un proceso de acomodo y post-compactación de las partículas. Por este motivo, estas primeras aplicaciones se realizan a una carga baja y con pocas repeticiones. De manera que se pueda tener una mayor resolución de los datos recolectados.

Conforme el proceso de ensayo avanza, y conforme el comportamiento de la estructura se estabiliza, la magnitud de la carga aplicada se aumenta gradualmente. En los ensayos realizados esta variación ha sido entre 40 kN y 90 kN, según las capacidades del equipo y el mejor funcionamiento de este.

Para los ensayos realizados se ha utilizado una velocidad de ensayo de diez kilómetros por hora (10 km/hr), con esta velocidad se logran secuencias de hasta 20.000 repeticiones por día. A esto se asocia la lectura de los diferentes instrumentos de control instalados (MDD, deflectómetro de superficie [RSD], perfil laser, sensores de presión y deformación); así como una inspección diaria de mantenimiento básico del equipo.

El espacio donde se desarrollan los ensayos es un laboratorio de condiciones controladas, bajo techo y con la posibilidad de agregar o no agua a las capas que componen la estructura de pavimento.

El equipo HVS tiene la capacidad de funcionar de forma continua según la secuencia programada cerca de 23 horas al día. Sin embargo cuando algún elemento del sistema, no funciona de forma óptima se puede generar alguna interrupción del proceso de ensayo.

Conforme avanza el ensayo los diferentes tramos sufren un proceso gradual de pérdida de capacidad estructural, deformación transversal de la superficie, aumento de las irregularidades longitudinales, aparición de agrietamientos y otros posibles mecanismos de falla de la estructura. Estos comportamientos forman parte del mecanismo de falla que presenta la estructura, y variarán

según las características de la estructura, las propiedades de los materiales que la conformen y las condiciones en las que se realice el ensayo.

El primer criterio para dar por concluido el ensayo es que se presente algún mecanismo de falla a un nivel tal que la estructura no esté en una condición funcional aceptable; es decir la deformación sea un riesgo para los usuarios, o los agrietamientos e irregularidades generen una incomodidad importante a los usuarios.

Un segundo criterio para detener el ensayo es que las condiciones en que se realiza el ensayo propicien que el desarrollo de la prueba sea de un tiempo excesivo. Por ejemplo una estructura con mucha capacidad estructural, con las capas inferiores en condición seca, aún con el equipo HVS a la máxima capacidad de aplicación de carga el tiempo de ensayo puede llegar a ser muy extenso.

Para el tramo 003AC2 el criterio de falla alcanzado correspondió a 12 mm de deformación transversal promedio el cual se alcanzó a 900.000 repeticiones de carga.

3.1 Inclusión de la humedad superficial

El criterio de incorporar humedad superficial al tramo de ensayo 003AC2 resulta de un proceso de ensayo caracterizado por la deformación de capa de ruedo, presencia de grietas leves sin que estas llegasen a interconectarse y de difícil percepción a la vista.

Una vez cumplido el criterio por deformación de la superficie (900.000 repeticiones) y con tiempo disponible en el programa de ensayos, se decide aprovechar la condición drenada de la estructura y someterla a humedad únicamente de forma superficial por 100.000 repeticiones de carga.

3.2 Cargas de ensayo aplicadas

Las cargas aplicadas inician en valores bajos (para este caso se inició en 40 kN), de manera que la condición inicial del material pueda ser registrada con mayor nivel de detalle. La Figura 3 muestra el régimen acelerado de cargas aplicadas al tramo experimental donde se aprecia la cantidad de repeticiones de carga equivalentes de 40 kN. La carga de 80 kN con la que se concluyó el ensayo de este tramo corresponde a un equivalente de aproximadamente 18,4 ejes equivalentes de carga por repetición de paso de la rueda.

Los valores registrados de estas variables se caracterizan por un incremento inicial, y posteriormente tendencias un poco más estables como producto de los procesos de compactación de los materiales y los mismos mecanismos de falla de los diferentes materiales que componen la estructura. Por ejemplo, es de esperar que la presión que llega a nivel de subrasante vaya aumentando gradualmente conforme aumenta el número de repeticiones. Adicionalmente se espera que la misma se estabilice en el tiempo.

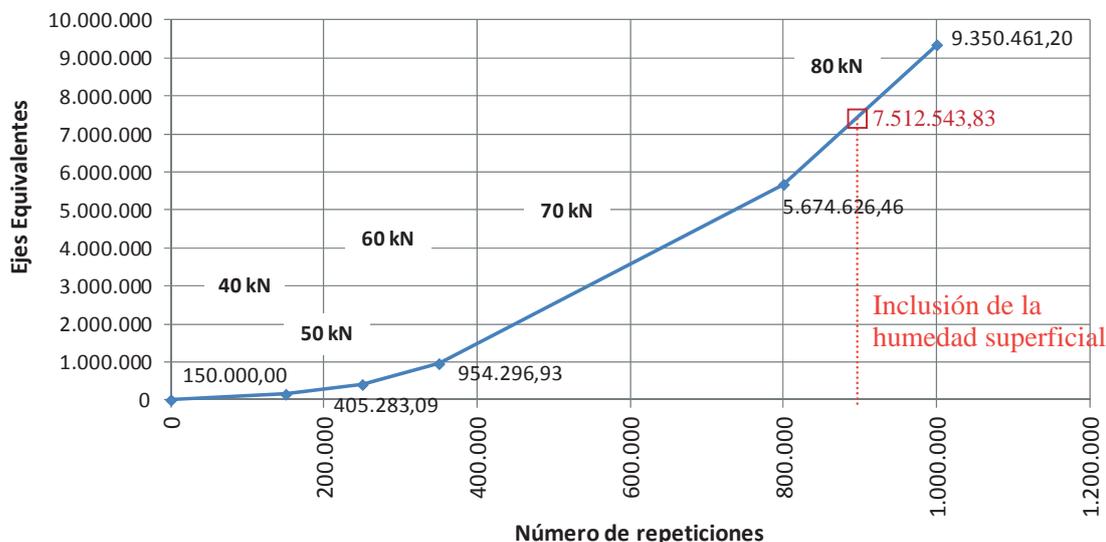


Figura 3 Régimen de cargas aplicadas al tramo de ensayo

4. Instrumentación y mediciones realizadas

Como complemento al equipo HVS, se cuenta con instrumentación para la medición de respuesta del pavimento. Cada uno de estos componentes adicionales al HVS es considerado de gran importancia en el desarrollo del programa de ensayos APT para Costa Rica puesto que permiten obtener información adicional a la que se obtiene directamente del HVS (presión de inflado, carga aplicada, número de repeticiones de carga). Entre el equipo y partes que se utilizan en este tipo de ensayo se tienen las siguientes [1, 2]:

- Perfilómetro laser 3D automatizado: Usado para la obtención del perfil tridimensional del tramo de prueba que permite cuantificar la deformación permanente y regularidad superficial.
- Transductores para medición de pavimentos PAST: Usados para la medición de deformaciones horizontales en pavimentos ligados al agrietamiento por fatiga.
- Transductores para presión en suelos SOPT: Usados para la medición de presión (esfuerzos) en materiales no ligados como gravas, arenas o arcillas.
- Deflectómetro de Profundidad Múltiple MDD: Usado para medir en sitio las deflexiones elásticas y/o deformaciones permanentes en las distintas capas de un tramo de prueba.
- Termocuplas: Hecha con 2 alambres de distinto material (Nickel/Cromo) unidos en un extremo y son del tipo K con rangos de temperatura de -180 a 1300 °C.

5. Cuantificación de daño causado por el agua

El principal efecto observado en la estructura, debido a la presencia de agua superficial, fue el movimiento de material fino proveniente de la capa base (bombeo de finos) a través de las grietas que se formaron en la capa de ruedo.

Esta pérdida de material en la capa base generó un aumento en la deformación observada en la superficie, así como su agrietamiento.



Figura 4 Evolución del tramo de ensayo

En la secuencia de imágenes mostrada se puede apreciar la evolución de los deterioros presentados, el bombeo de material de la capa subyacente. Este material salió por las grietas que se formaron en la capa superficial durante la etapa seca del ensayo (900 mil repeticiones de carga), así como las grietas que se formaron posteriormente con la aplicación de cargas y agua (100 mil repeticiones adicionales).

5.1 Factores que influyen en el deterioro presentado

Este tipo de deterioros con bombeo de finos se pueden observar en Costa Rica cuando se colocan capas delgadas de mezcla asfáltica sobre bases granulares con malas condiciones de drenaje, así como cuando se utiliza una capa de base estabilizada con cemento pero la misma presenta deficiencias constructivas.

El ingreso de la humedad y el respectivo bombeo de finos podrían limitarse mediante una oportuna colocación de un sello asfáltico de las grietas que también impermeabilice la superficie; retrasando también la deformación por el movimiento de la base granular.

Una fuente importante de información es la recolectada por medio de sensores laser incorporados al equipo HVS, los cuales miden la distancia del sensor a la superficie, de manera que la forma mediante una secuencia programada se recolecta una secuencia de líneas sobre la superficie, formando una malla de datos que representa de buena forma la superficie del tramo ensayado. Esta secuencia se recolecta aproximadamente cada 20.000 repeticiones de carga.

Mediante la información recolectada se ha calculado una sección transversal promedio para cada una de las mediciones realizadas, la secuencia de dichas secciones se muestra en la Figura 5. Hacia el final de la secuencia de secciones transversales se puede apreciar el aumento importante de la deformación de la superficie en las últimas mediciones; particularmente en lo que corresponde entre 12 mm y 24 mm.

De igual manera en la Figura 6 se puede apreciar la evolución de la deformación en las secciones a lo largo del tramo, contra la aplicación de ejes equivalentes. Donde el mayor daño se presentó a partir de la inclusión de humedad en 7,51 millones de ejes equivalentes, y hasta 9,35 millones.

Las grietas predominantes fueron grietas transversales. Así mismo, fuera del área de paso de la llanta, se presentaron agrietamientos longitudinales, conformando así el deterioro identificado como agrietamiento por bloques.

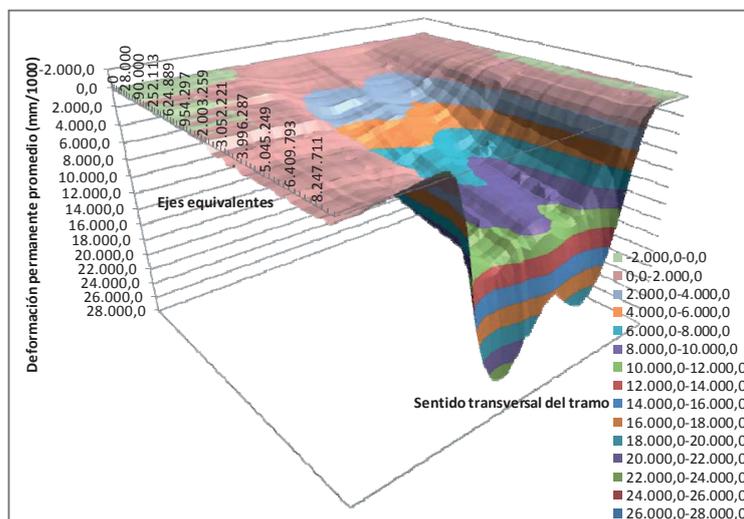


Figura 5 Evolución de las secciones transversales promedio a lo largo del ensayo, inclusión de agua a partir de 7,35 millones de ejes equivalentes.

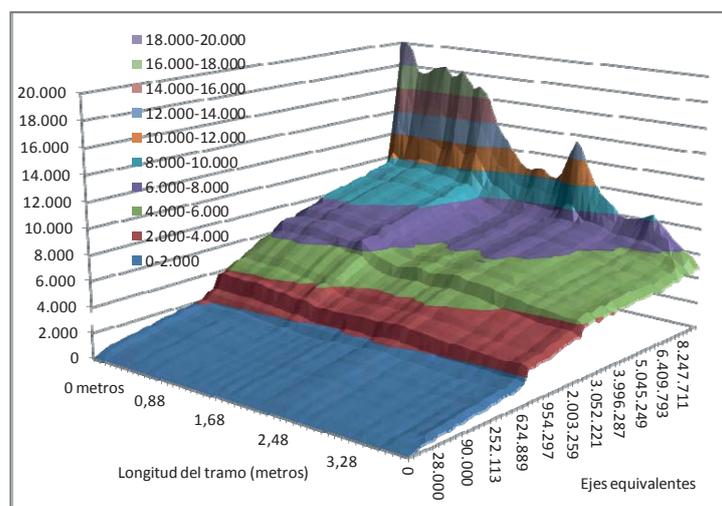


Figura 6 Evolución de la deformación permanente a lo largo del tramo de ensayo y de los ejes equivalentes, inclusión de agua a partir de 7,35 millones de ejes equivalentes.

En cuanto a la respuesta del pavimento se muestran a continuación resultados de deformación unitaria medida en la interface capa asfáltica-base, presión vertical total a nivel de subrasante (Figura 7) y deflexiones instantáneas obtenidas a diferentes profundidades del pavimento (Figura

8). Se observó que en las primeras 400 mil repeticiones de carga un incremento paulatino de las deformaciones unitarias longitudinales, la presión, las deflexiones instantáneas y levemente en las deformaciones transversales.

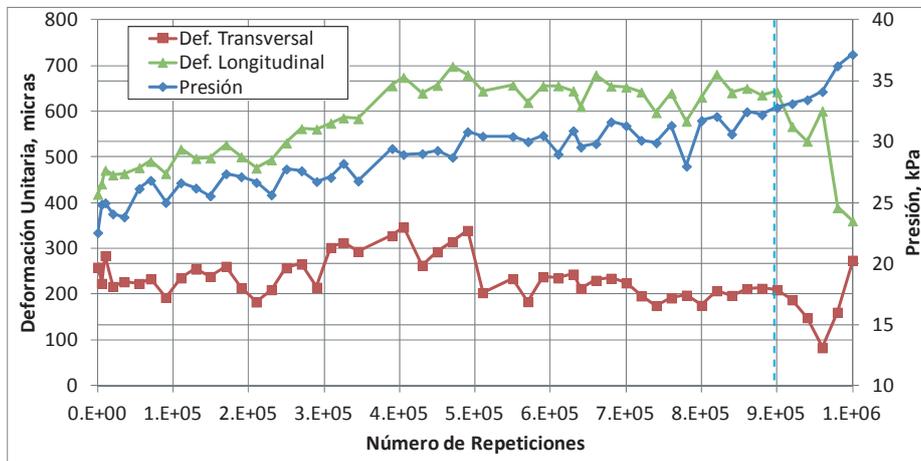


Figura 7 Deformaciones unitarias y presión a 40 kN, inclusión de agua a partir de 900.000 repeticiones de carga.

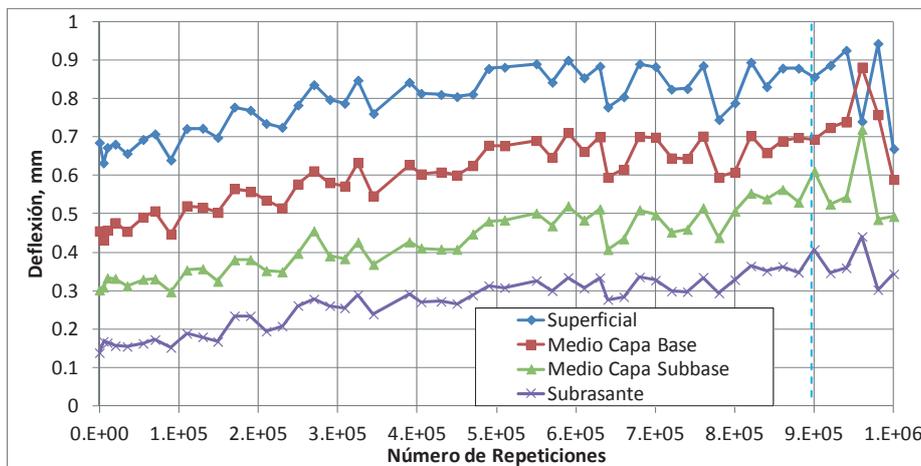


Figura 8 Deflexiones instantáneas a 40 kN, inclusión de agua a partir de 900.000 repeticiones de carga.

A partir de de este punto se observó una estabilización de la mayoría de las respuestas del pavimento donde no se obtuvo mayor daño significativo en la estructura. La presión fue la única respuesta que mantuvo su tendencia a incrementar con las aplicaciones de carga. Durante las últimas 100 mil repeticiones se obtuvo un incremento acelerado de la presión mientras que la respuesta obtenida en los otros sensores fue más dispersa. Se presume que la presencia de agua y las grietas fueron los responsables por una interrupción o daño en la señal emitida por los sensores. De igual forma, si uno de los sensores quedara dentro de un bloque de las grietas podría haber reducido las señales del mismo.

La Figura 9 muestra una comparación entre las señales obtenidas al inicio y al final del ensayo para los mismos sensores. Se observa que al inicio los sensores de deformación presentan una señal limpia que sigue la forma esperada con respecto a un comportamiento viscoelástico no-lineal del material [3], mientras que al final del ensayo este comportamiento ha cambiado y la interrupción de la señal es una indicación del estado de falla del material. En el caso del sensor de presión la señal se mantiene similar pero de mayor magnitud ante el mismo nivel de carga, esto como indicación de menor capacidad de soporte de la estructura de pavimento [4]. La temperatura obtenida a la hora de realizar la toma de datos fue relativamente constante con un promedio de 22,5 °C variando entre 21 y 24 °C, por lo que se desprecia el potencial efecto de la temperatura sobre la respuesta del pavimento.

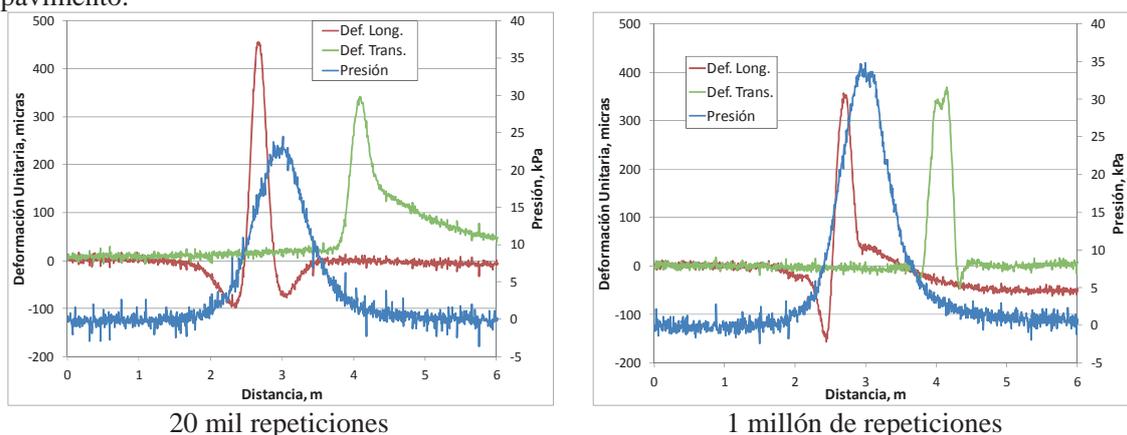


Figura 9 Comparación de señales de respuesta a 40 kN de carga

5.2 Variación de la regularidad superficial a lo largo del ensayo

La regularidad de la superficie, mediante el Índice de Regularidad Internacional se ha constituido en una importante referencia para poder asociar el desempeño general de las estructuras de pavimento y el servicio que se brinda a los usuarios.

Mediante la información recolectada para el tramo de ensayo se procedió al cálculo de la regularidad superficial mediante un modelo estándar de cuarto de coche o Golden Car definido por el Banco Mundial en los años 80 [5].

En la Figura 10 se pueden apreciar los valores de regularidad calculados para los diferentes valores de elevaciones de superficie recolectados.

De dicho gráfico resaltan los valores calculados para la zona ensayada, siendo estos los más representativos para el tramo. Se incluyen valores máximos y mínimos como parámetros de referencia; así como un cálculo de regularidad para la totalidad de los valores medidos, incluyendo en esto los valores fuera de la influencia directa del paso de la rueda.

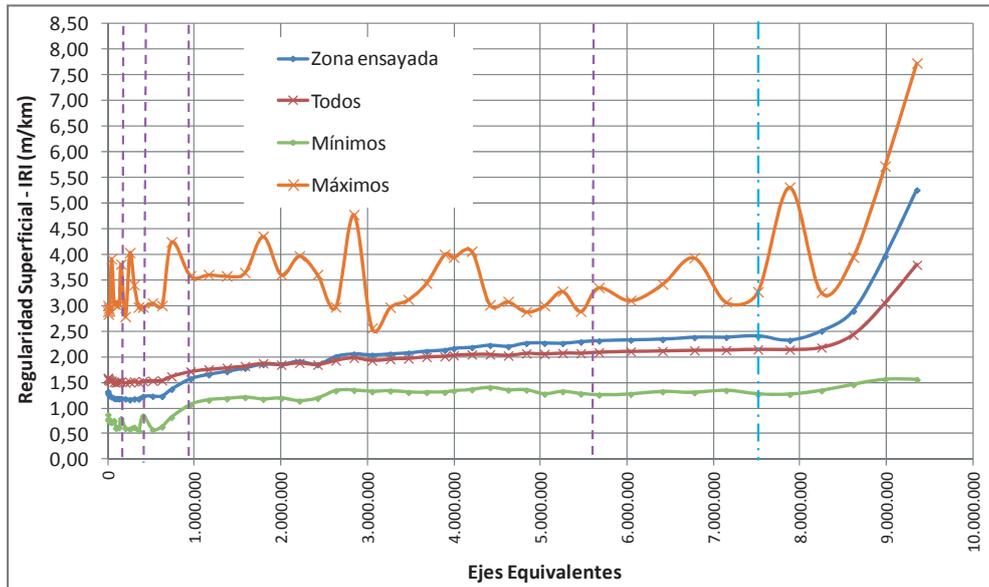


Figura 10 Variación de la regularidad superficial (IRI) a lo largo del tramo de ensayo (valores promedio, máximos y mínimos)

Las líneas de trazos color rosa son los puntos donde se realizó un incremento de carga, en todos los casos se aumentó la carga en 10 kN, iniciando el ensayo en 40 kN y concluyendo en 80 kN de carga de ensayo.

La línea de trazos celeste en la Figura 10 corresponde al momento que se incluyó una capa de agua superficial al tramo de ensayo (900.000 a 1.000.000 repeticiones de carga), dicha capa se incorporó de forma manual, procurando mantener la superficie húmeda. En la Figura 11 se pueden apreciar la totalidad de valores de IRI calculados.

Variaciones volumétricas de las capas se pueden apreciar como disminuciones temporales en la regularidad superficial, las cuales se acompañan de marcados aumentos posteriores. Esta secuencia es totalmente coherente entre los datos medidos y la condición observada durante el desarrollo del ensayo.

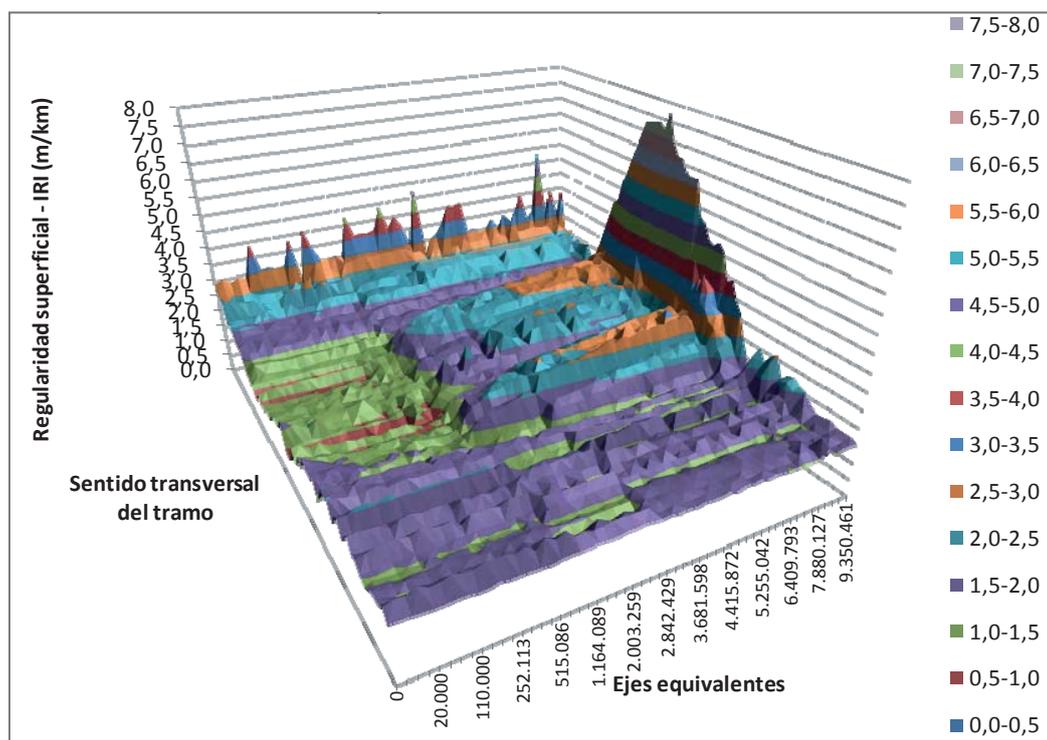


Figura 11 Variación de la regularidad superficial (IRI) a lo largo del tramo de ensayo (todos los valores), inclusión de agua a partir de 7,35 millones de ejes equivalentes.

6. Conclusiones

De los resultados del estudio realizado se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El efecto del agua superficial sobre la estructura levemente dañada fue el de incrementar significativamente el nivel de deterioro del pavimento. Pasando de una tasa de crecimiento del IRI de un punto (1,0) cada 20 millones de ejes equivalentes sin agua, a una tasa de un punto de IRI cada 0,33 millones de ejes equivalentes con agua superficial.
- El daño acelerado por la presencia de agua superficial es cuantificable a través del levantamiento de la regularidad superficial del pavimento y a través de sensores que indiquen un estado y comportamiento de falla de los materiales.
- Este tipo de daño es más comúnmente apreciable en carreteras con alta precipitación por lo que se recomienda este tipo de ensayo con agua superficial aplicada de forma cíclica el cual acelere y duplique el efecto climático observado en campo.
- El experimento resalta la importancia del drenaje y el bombeo para limitar que el agua se acumule en la superficie de la estructura de pavimento.
- El uso de mezclas asfálticas especiales, para reducir el agrietamiento, son una buena alternativa para que el deterioro producto de la acción del agua sea restringido.

7. Perspectiva para los siguientes ensayos a realizar

Para Junio de 2015 se encuentra en proceso de ensayo el cuarto tramo, correspondiente a la primera construcción de estructuras para ensayo. Los cuatro tramos han sido ensayados en una condición drenada de las capas inferiores que componen la estructura.

La siguiente etapa corresponderá a la saturación y ensayo de las estructuras, para esto cada una de los tramos ya ensayados tiene un tramo para repetición en la misma estructura, justo al lado.

Del fenómeno observado en el presente artículo es preciso considerar algunos elementos para el ensayo de los próximos tramos experimentales, entre los que se encuentran:

- Tiempo de saturación de los materiales
- Estricto control del tiempo de exposición a la humedad
- Preparación de instrumentos para mayor resistencia a humedad, barniz protector, sellos y medidas similares

8. Referencias bibliográficas

[1] Heavy Vehicle Simulator. *Monitoring of test sections and instrumentation*. Documento consultado el 6 de abril del 2015. <http://www.gautrans-hvs.co.za/>

[2] Baker Harris B., Buth Michael R., Van Deusen David A. Minnesota Road Research Project: *Load response Instrumentation Installation and Testing Procedures*. Minnesota Department of Transportation. 1994.

[3] Leiva-Villacorta, F. y D. Timm, *Analysis of Measured Versus Predicted Critical Pavement Strain Responses*, Proceedings of the 90th Annual Transportation Research Board, Washington, D.C. 2011.

[4] Coetzee, N et al. *The Heavy Vehicle Simulator in Accelerated Pavement Testing: Historical Overview and New Developments*. 3rd International Conference APT. 2008.

[5] Badilla, G., Elizondo, F y Barrantes, *Determinación de un procedimiento para el cálculo del IRI*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José. 2008.