

# EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO

Adriana Vargas Nordbeck<sup>1</sup>, Fabricio Leiva Villacorta<sup>2</sup>, José Pablo Aguiar Moya<sup>3</sup>,  
Luis Guillermo Loría Salazar<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, San Jose, Costa Rica,  
adriana.vargasnordbeck@ucr.ac.cr

<sup>2</sup>Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, San Jose, Costa Rica,  
fabricio.leiva@ucr.ac.cr

<sup>3</sup>Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, San Jose, Costa Rica,  
jose.aguiar@ucr.ac.cr

<sup>4</sup>Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, San Jose, Costa Rica,  
luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

## Resumen

Una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos se atribuye a la presencia de agua en la mezcla asfáltica. La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles es la pérdida del recubrimiento del asfalto de la superficie de los agregados. Además, se puede presentar el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico. Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interfase agregado-cemento asfáltico.

Uno de los métodos más comunes para la evaluación de este fenómeno es el ensayo modificado de Lottman (AASHTO T283). Sin embargo, este ensayo es de carácter empírico y no siempre refleja adecuadamente el desempeño en campo de las mezclas asfálticas. Por esta razón, el ensayo de módulo dinámico ha surgido como una alternativa para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad. El módulo dinámico es un parámetro principal para el diseño mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos y es un mejor indicador del desempeño de las mezclas bajo diferentes rangos de temperatura y velocidad.

En el presente estudio se realizó una comparación del método AASHTO T283 y el ensayo de módulo dinámico, ambos realizados para varios ciclos de acondicionamiento. Para ello, se incluyeron varios tipos de mezclas asfálticas, con diferentes granulometrías y materiales tales como polímeros modificantes y aditivos mejoradores de adherencia.

**Palabras clave:** daño por humedad, ensayo modificado de Lottman, módulo dinámico

## 1 Introducción

El ensayo modificado de Lottman fue desarrollado por Kandhal y adoptado por AASHTO en 1985 [1]. Actualmente es uno de los ensayos más utilizados para determinar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas. Este ensayo fue adoptado por el sistema Superpave como el método requerido para determinar el daño por humedad, lo cual lo ha convertido en el procedimiento más utilizado para evaluar la susceptibilidad a este tipo de deterioro. Sin embargo, se trata de un ensayo empírico que tiende a dar falsos negativos o positivos en la predicción de la susceptibilidad al daño por humedad. Las principales preocupaciones con esta prueba son su reproducibilidad y su capacidad de predecir la susceptibilidad a la humedad o daño observado en el campo con una confianza razonable [2 - 5].

Por otro lado, el ensayo de módulo dinámico ha ganado popularidad en la industria de pavimentos por constituir uno de las entradas principales para el método de diseño mecanístico-

empírico en los últimos años. El módulo complejo ( $E^*$ ) se define como un número complejo que relaciona el esfuerzo y la deformación para un material lineal viscoelástico sujeto a una carga sinusoidal. El valor absoluto del módulo complejo se conoce como módulo dinámico y representa la dependencia a la frecuencia (y por lo tanto tiempo) de la rigidez del material [6].

Solaimanian et al. [7] utilizaron el ensayo de módulo dinámico en conjunto con un sistema de acondicionamiento ambiental para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas. El módulo retenido entre especímenes secos y acondicionados se utilizó como parámetro para diferenciar entre mezclas con buen y mal desempeño, y se encontró que en general los resultados obtenidos tenían buena correlación con el desempeño observado en campo.

## 2 Objetivos y alcance

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la aplicación del ensayo de módulo dinámico como método para determinar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas.

Para cumplir con el objetivo mencionado, se realizaron ocho diseños de mezcla que utilizaron una sola fuente de agregado, conocida por su pobre desempeño en el campo al daño por humedad. Estos diseños consistieron en mezclas de control, modificada con polímero SBS y con aditivos promotores de adherencia (agente antidesnudantelíquido (ADL) y cal), para tamaños máximos nominales (TMN) de 9.5 y 12.5 mm. El ligante asfáltico utilizado corresponde a un PG 70-22, de acuerdo a la clasificación por grado de desempeño.

Las Figuras 1 y 2 presentan las granulometrías óptimas para las mezclas de tamaño nominal máximo de 9.5 y 12.5 mm, respectivamente. Estas estructuras de agregado fueron utilizadas para calcular el porcentaje de asfalto óptimo, mediante la metodología Superpave para un nivel de compactación de 100 giros. La Tabla 1 muestra las propiedades volumétricas de las mezclas. El contenido óptimo de ligante asfáltico se determinó para el 4% de vacíos y se encontró entre un 6.0% y un 7.0%. Estos valores altos de contenido de ligante se explican en parte por la alta porosidad del agregado que cuenta con absorciones por encima del 2.0%.

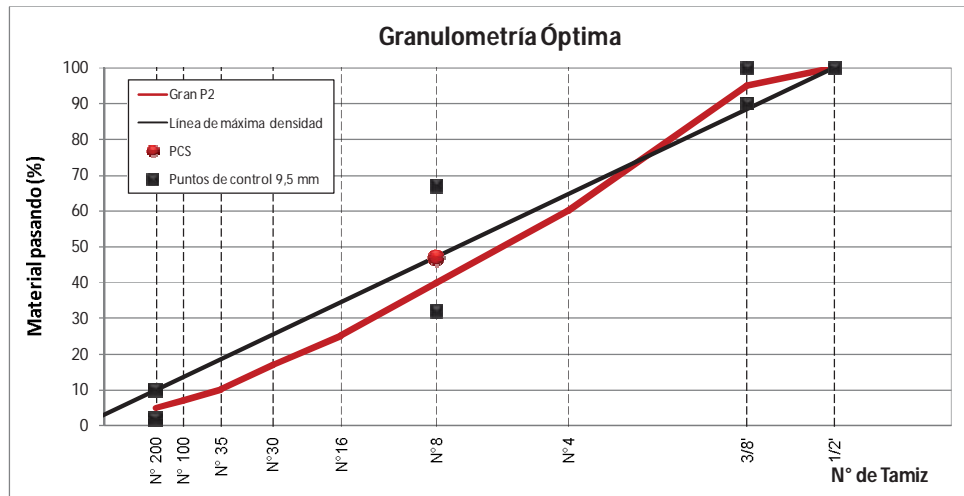


Figura 1 Granulometría óptima para mezclas de tamaño nominal máximo 9.5 mm

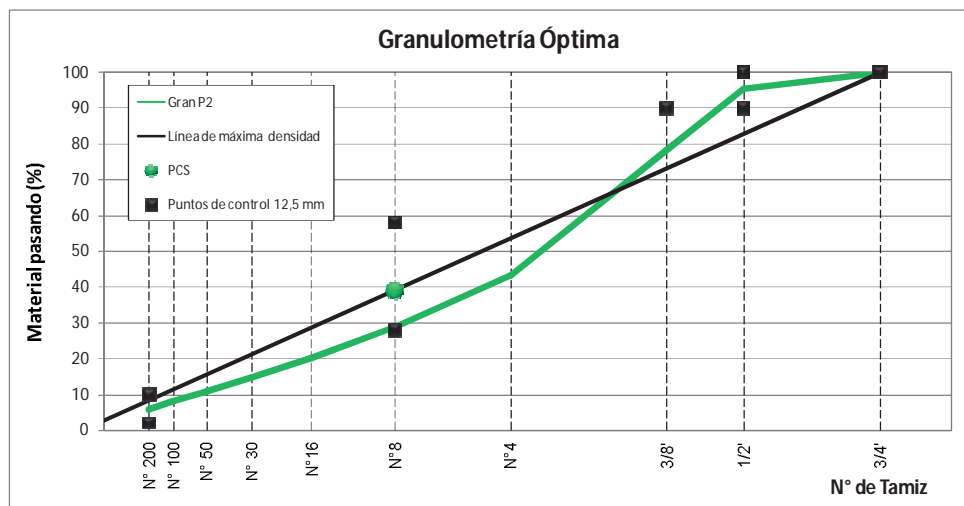


Figura 2 Granulometría óptima para mezclas de tamaño nominal máximo 12.5 mm

Tabla 1. Propiedades volumétricas de las mezclas de control

| Mezcla       | % Asfalto óptimo | %VMA | % VFA | Relación polvo/asfalto |
|--------------|------------------|------|-------|------------------------|
| 9.5 Control  | 6.5              | 15.5 | 73.7  | 1.0                    |
| 9.5 SBS      | 6.5              | 15.8 | 74.3  | 1.0                    |
| 9.5 ADL      | 6.5              | 15.9 | 72.7  | 1.0                    |
| 9.5 Cal      | 6.7              | 16.3 | 74.4  | 0.9                    |
| 12.5 Control | 7.0              | 15.8 | 74.5  | 1.1                    |
| 12.5 SBS     | 6.5              | 15.1 | 73.3  | 1.2                    |
| 12.5 ADL     | 6.5              | 14.7 | 72.7  | 1.2                    |
| 12.5 Cal     | 6.0              | 14.0 | 71.5  | 1.3                    |

### 3 Metodología

Para cada una de las mezclas, se realizaron ensayos de Lottman modificado (AASHTO T283) utilizando 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento con congelamiento. Para cada uno de los niveles de acondicionamiento se calculó la resistencia retenida a la tensión diametral (RRTD), la cual se utiliza como parámetro para evaluar la resistencia al daño por humedad. La RRTD se define como la razón de tensión diametral de especímenes acondicionados y en condición seca.

De igual modo, se realizaron ensayos de módulo dinámico de acuerdo a la metodología descrita en la norma AASHTO TP79 [8] para los mismos niveles de acondicionamiento. Las condiciones de este último ensayo para las mezclas evaluadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones del ensayo de módulo dinámico

| Mezcla                        | Temperatura, °C | Frecuencia, Hz     |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|
| Todas                         | 4, 20           | 0.1, 1.0, 10       |
| Mezclas de control, ADL y Cal | 40              | 0.01, 0.1, 1.0, 10 |
| Mezclas con SBS               | 45              | 0.01, 0.1, 1.0, 10 |

En este caso, el parámetro calculado fue el módulo dinámico retenido (ER) para una temperatura de 20°C y una frecuencia de 10 Hz (condiciones típicas de operación del pavimento). El ER se calcula como la razón de módulo dinámico de especímenes acondicionados y en condición seca.

### 3.1 Preparación y acondicionamiento de especímenes

Los especímenes fueron compactados con un compactador giratorio Superpave para un contenido de vacíos entre 6.5% y 7.5%. Se utilizaron moldes de 150 mm de diámetro, y los especímenes del ensayo de Lottman modificado fueron compactados a una altura de 95 mm, mientras que los de módulo dinámico fueron compactados a una altura de 172 mm y posteriormente se extrajeron núcleos de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura.

Aquellos especímenes a ensayar en condición húmeda fueron sometidos a saturación y acondicionados a través de ciclos de congelamiento a -18°C por 16 horas, y posteriormente colocados en un baño de agua a 60°C por 24 horas.

### 3.2 Determinación de RRTD y ER

Para ensayo de Lottman modificado, la falla por tensión diametral de los especímenes se realizó a una temperatura de 25°C y una tasa de carga de 50 mm/min. En el caso del ensayo de módulo dinámico (un ensayo no destructivo), la medición del módulo se realizó para las condiciones anteriormente descritas en la Tabla 2.

## 4 Resultados

### 4.1 Ensayo de Lottman modificado (AASHTO T283)

La Figura 3 muestra los valores de RRTD para todos los tipos de mezcla, a diferentes niveles de acondicionamiento. Puede observarse que para el procedimiento tradicional de ensayo (un ciclo de acondicionamiento), todas las mezclas cumplen con el valor mínimo requerido de 0.8. Esto no concuerda con la experiencia en campo, ya que se conoce que esta fuente de agregado presenta problemas en cuanto a la resistencia al daño por humedad.

La incorporación de más ciclos de acondicionamiento dentro del protocolo de ensayo podría ayudar a reflejar de mejor manera el comportamiento en campo de las mezclas. Como era de esperarse, la adición de materiales promotores de adherencia como agente antidesnudente líquido y cal redujeron la susceptibilidad al daño por humedad, aún a mayor número de ciclos de acondicionamiento. Por otro lado, se observa que la incorporación de un polímero como el SBS es la opción menos viable como mejorador de la resistencia a la tensión diametral y en el caso de la mezcla asfáltica de 9.5 mm la tendencia fue a disminuir la resistencia.

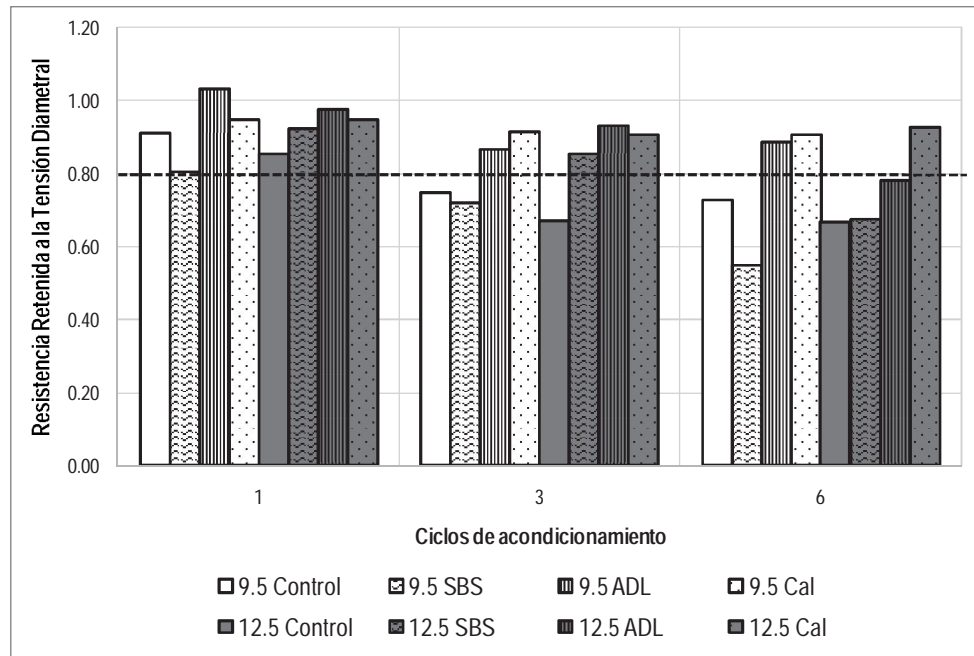


Figura 3 Resistencia retenida a la tensión diametral de las mezclas

#### 4.2 Ensayo de módulo dinámico

La Figura 4 muestra los resultados de módulo retenido a 20°C y 10 Hz para las mezclas estudiadas, a diferentes niveles de acondicionamiento. Si se aplica el mismo criterio de un valor mínimo de 0.8 para la aceptación de mezclas basadas en su resistencia al daño por humedad, puede observarse que el mal desempeño de algunas de las mezclas se ve evidenciado desde el primer ciclo de acondicionamiento.

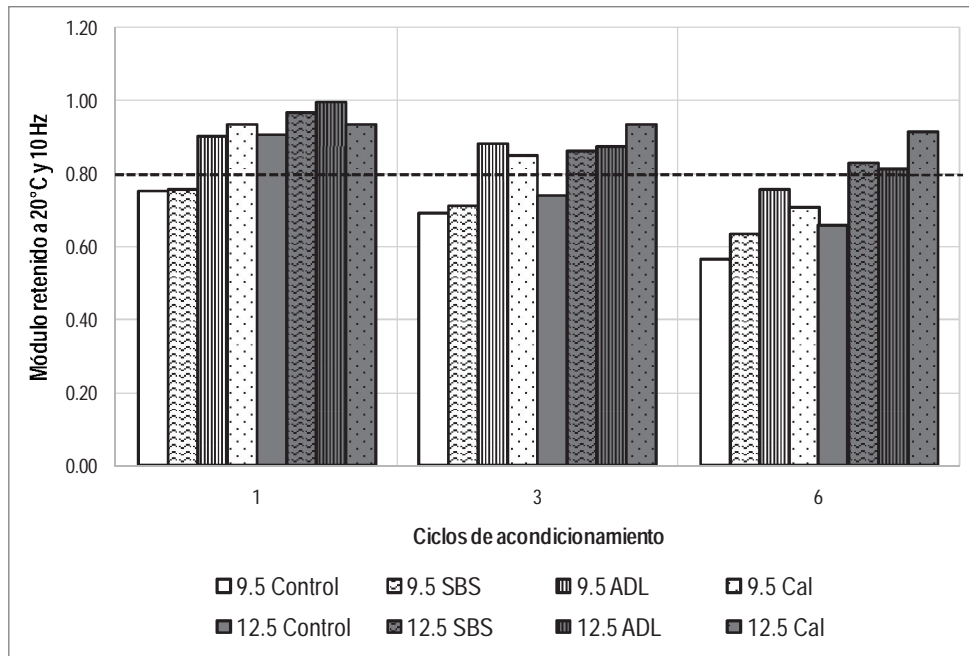


Figura 4 Módulo retenido de las mezclas a 20°C y 10 Hz

En general, las mezclas de tamaño nominal máximo de 12.5 mm tienden a resistir mejor el daño por humedad. Sin embargo, cabe mencionar que la rigidez en condición seca de las mezclas de 12.5 mm que no contenían ningún aditivo antidesnudante fue menor que la de sus contrapartes de 9.5 mm. De igual forma se observa que la incorporación del polímero SBS en la mezcla asfáltica de 9.5 mm no produce mejoras significativas en la resistencia al daño por humedad.

A pesar de que las mezclas de 9.5 mm experimentaron una mayor reducción en el módulo producto de la aplicación de ciclos de acondicionamiento, los valores resultantes de módulo dinámico para los especímenes acondicionados fue similar para ambos tamaños nominales, como se observa en la Figura 5.

Las condiciones mostradas de 20°C y 10 Hz fueron seleccionadas porque representan condiciones típicas de operación de los pavimentos. Sin embargo, para cada una de las mezclas se obtuvo la curva maestra de módulo dinámico, al cual representa la superposición tiempo-temperatura del material. Las Figuras 6 y 7 muestran ejemplos de las curvas maestras de las mezclas de control para los distintos niveles de acondicionamiento. Puede observarse cómo la reducción del módulo es más pronunciada a valores bajos de frecuencia reducida, asociados con temperaturas altas y velocidades bajas. Además, la pérdida de rigidez ocurre principalmente durante el primer ciclo de acondicionamiento, evidenciando la susceptibilidad al daño por humedad del material.

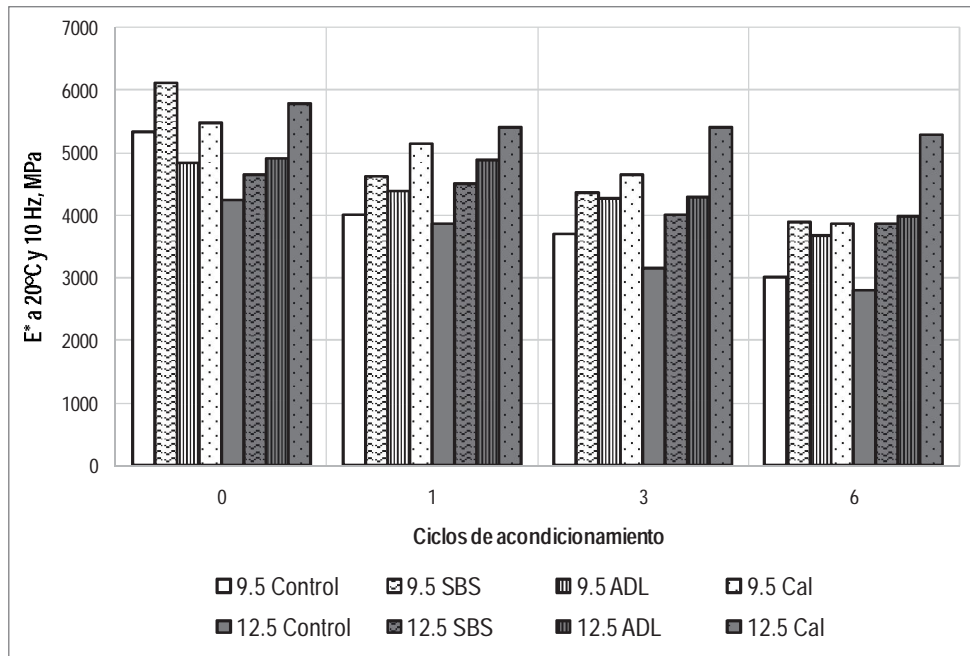


Figura 5 Módulo dinámico de las mezclas a 20°C y 10 Hz

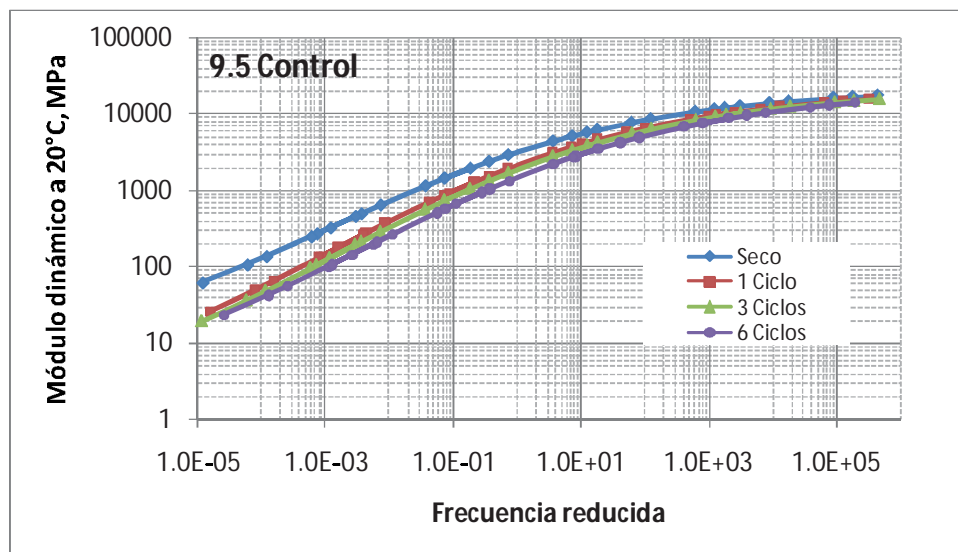


Figura 6 Curvas maestras para mezclas de TMN 9.5 control

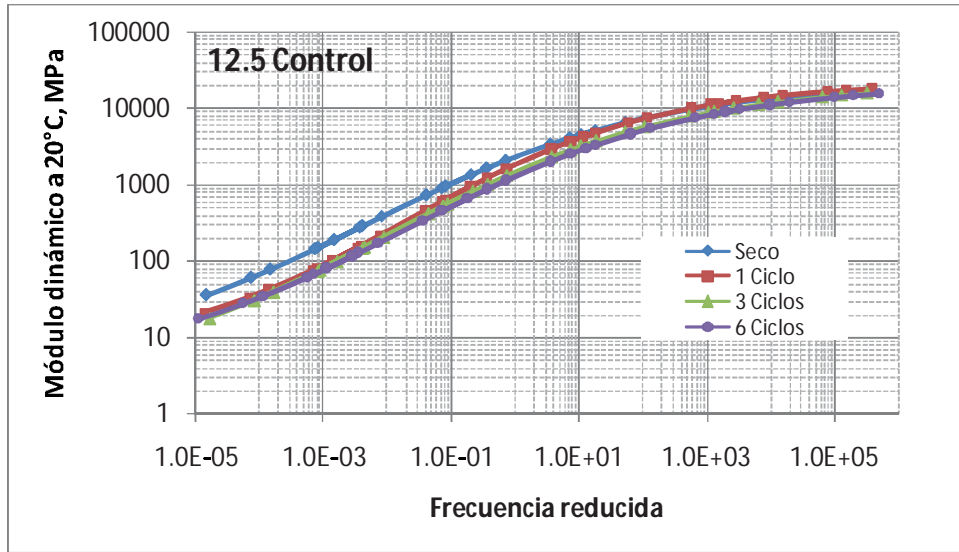


Figura 7 Curvas maestras para mezclas de TMN 12.5 control

Las mezclas que incluyeron algún aditivo promotor de adherencia como agente antidesnudante líquido o cal fueron más resistentes a la acción de la humedad, para todo el rango de condiciones estudiadas. Las Figuras 8 y 9 muestran ejemplos de las curvas maestras de las mezclas de 9.5 mm con agente antidesnudante y 12.5 mm con cal, respectivamente. En estos casos, los resultados muestran que la adición de estos materiales resulta efectiva como medida para mitigar el daño por humedad de las mezclas.

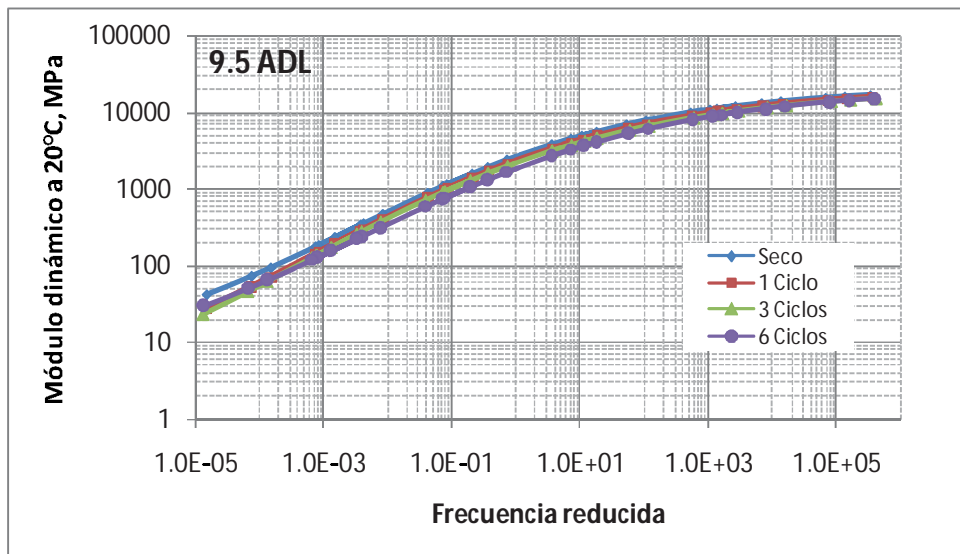


Figura 8 Curvas maestras para mezclas de TMN 9.5 con agente antidesnudante líquido



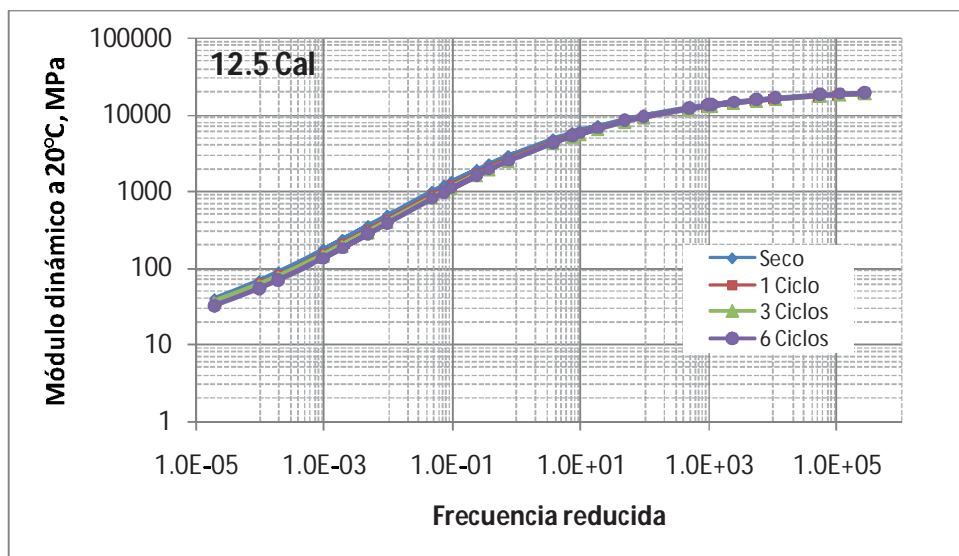


Figura 9 Curvas maestras para mezclas de TMN 12.5 con cal

Cabe mencionar que para las mezclas estudiadas se observa una reducción del módulo dinámico con la aplicación de ciclos de acondicionamiento, la cual es más pronunciada al pasar de la condición seca a un ciclo de acondicionamiento. Si bien la aplicación de más ciclos tiende a seguir disminuyendo la rigidez, el cambio es menos pronunciado. Esto sugiere que el uso de un máximo de 6 ciclos de acondicionamiento es apropiado para estimar la susceptibilidad al daño por humedad mediante el ensayo de módulo dinámico.

La Tabla 3 muestra los porcentajes de reducción del módulo dinámico para el rango de frecuencias y temperaturas utilizado en los ensayos. Como se mencionó anteriormente, las mayores reducciones observadas en cada ciclo corresponden a mediciones tomadas bajo las condiciones más críticas (generalmente 40/45°C y 0.01 Hz), mientras que las menores reducciones están asociadas con condiciones de ensayo que favorecen una mayor rigidez de la mezcla (4°C y 10 Hz).

Contrario a lo observado para los resultados del ensayo de Lottman modificado, en el que los RRTD superaron el 80% para todas las mezclas con un ciclo de acondicionamiento, los módulos retenidos tienen valores más bajos, y en algunos casos el efecto de la humedad llega a reducir la rigidez de la mezcla hasta un valor cercano a la mitad de su rigidez inicial. Las mismas tendencias se observan para los demás niveles de acondicionamiento.

Tabla 3. Reducción del módulo dinámico en función de los ciclos de acondicionamiento

| Mezcla       | % de Módulo dinámico respecto a la condición seca |               |               |
|--------------|---|---------------|---------------|
|              | 1 Ciclo   | 3 Ciclos      | 6 Ciclos      |
| 9.5 Control  | 44.5% - 79.8%                                     | 35.9% - 76.6% | 35.4% - 61.1% |
| 9.5 SBS      | 56.2% - 78.9%                                     | 52.1% - 74.8% | 48.3% - 71.6% |
| 9.5 ADL      | 70.8% - 90.5%                                     | 62.7% - 88.2% | 62.7% - 77.4% |
| 9.5 Cal      | 82.1% - 94.7%                                     | 49.4% - 91.6% | 39.4% - 82.1% |
| 12.5 Control | 51.8% - 1.05%                                     | 49.6% - 79.8% | 41.3% - 78.8% |
| 12.5 SBS     | 76.6% - 98.7%                                     | 76.0% - 86.4% | 53.5% - 83.3% |
| 12.5 ADL     | 94.3% - 1.11%                                     | 84.0% - 94.7% | 68.6% - 81.5% |
| 12.5 Cal     | 85.2% - 93.5%                                     | 79.7% - 93.5% | 75.9% - 95.4% |

Se realizó un análisis de varianza para determinar el efecto de tres factores en el módulo dinámico de las mezclas a 20°C y 10 Hz: tamaño máximo nominal (9.5 o 12.5 mm), uso de aditivo promotor de adherencia ("No" para mezclas de control y modificadas con SBS, "Si" para mezclas que contienen agente antidesnudante líquido o cal) y número de ciclos de acondicionamiento (0, 1, 3, o 6). La Tabla 4 muestra los resultados del análisis.

Tabla 4. Resultados del análisis de varianza para el módulo dinámico

| Fuente             | Grados de libertad | Suma de cuadrados | F-estadístico | Valor-p | % de contribución | Significativo? |
|--------------------|--------------------|-------------------|---------------|---------|-------------------|----------------|
| TMN                | 1                  | 6119              | 0.03          | 0.872   | 0.0%              | No             |
| Aditivo            | 1                  | 9548646           | 40.51         | 0.000   | 15.2%             | Si             |
| Ciclos             | 3                  | 23957775          | 33.88         | 0.000   | 38.3%             | Si             |
| TMN*Aditivo        | 1                  | 5299843           | 22.49         | 0.000   | 8.5%              | Si             |
| TMN*Ciclos         | 3                  | 2708878           | 3.83          | 0.013   | 4.3%              | Si             |
| Aditivo*Ciclos     | 3                  | 1810231           | 2.56          | 0.061   | 2.9%              | No             |
| TMN*Aditivo*Ciclos | 3                  | 680151            | 0.96          | 0.415   | 1.1%              | No             |
| Error              | 79                 | 18618928          |               |         |                   |                |
| Total              | 94                 | 62630571          |               |         |                   |                |

De la Tabla 3 se puede observar que para un nivel de significancia de 0.05 el uso de aditivo y el número de ciclos influyen significativamente en el módulo dinámico. Además, la interacción entre el tamaño máximo nominal de las mezclas y el uso de aditivo o los ciclos también tiene un efecto significativo sobre los resultados. Para el propósito de evaluar la susceptibilidad al daño por humedad, la Figura 10 muestra la gráfica de efectos principales para el factor "ciclos". En ella se aprecia cómo al aumentar el número de ciclos de acondicionamiento se produce una reducción estadísticamente significativa en el módulo dinámico. Esta gráfica solamente toma en cuenta los ciclos, sin importar el tamaño del agregado o presencia de aditivos en la mezcla.

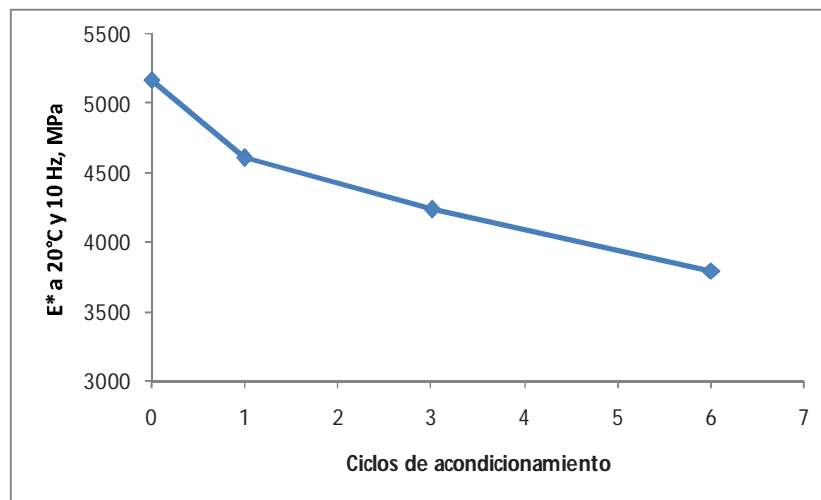


Figura 10 Gráfica de efectos principales para los ciclos de acondicionamiento

Los términos de interacción pueden interpretarse como la forma en que la combinación de factores afecta el resultado del módulo dinámico. Por ejemplo, para la interacción entre el tamaño nominal máximo y el número de ciclos (Figura 11), la reducción en el módulo es casi

siempre más pronunciada para las mezclas de 9.5 mm que para las de 12.5 mm. Esto sugiere que de alguna forma podría mitigarse el efecto de la humedad mediante la selección del tamaño de la granulometría.

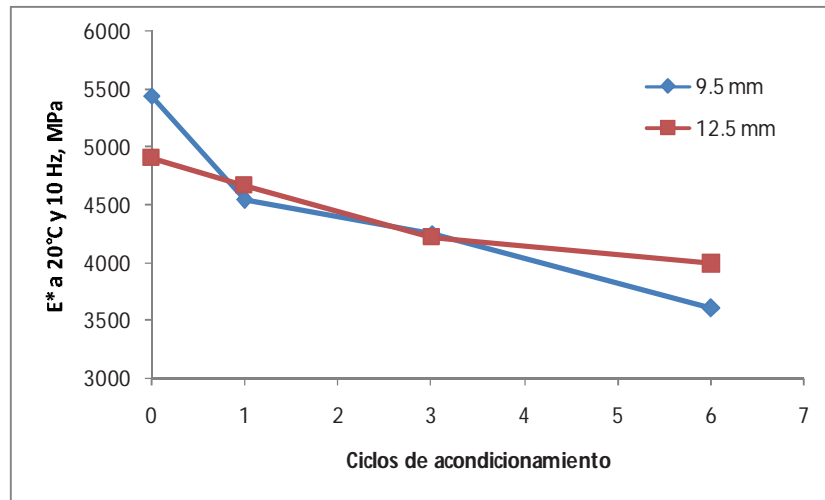


Figura 10 Gráfica de interacción para los factores TMN y ciclos de acondicionamiento

Llama la atención que el término de la interacción entre la presencia de aditivo y el número de ciclos de acondicionamiento no resultara estadísticamente significativo para un nivel de confianza de 0.05. Sin embargo, como se ilustra en la Figura 11, sí se experimenta una mayor reducción del módulo dinámico en mezclas que no contienen aditivos promotores de adherencia, comparadas con aquellas que sí los utilizan. Esta puede ser otra medida empleada para disminuir los efectos del daño por humedad.

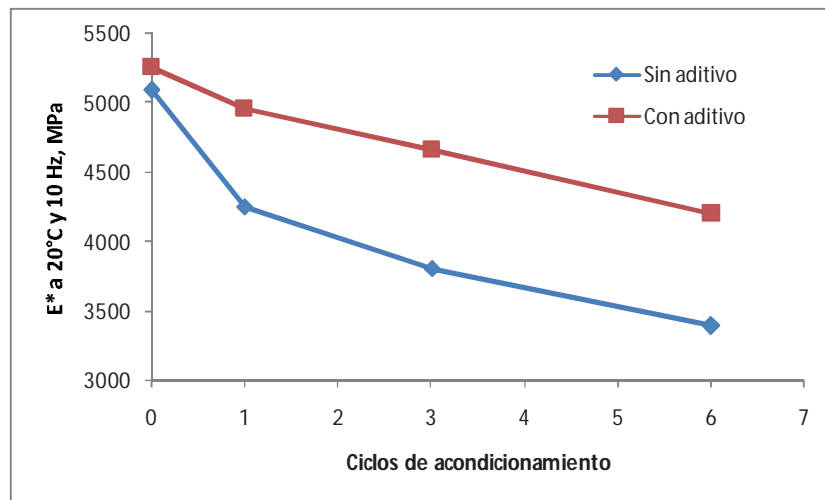


Figura 11 Gráfica de interacción para los factores aditivo y ciclos de acondicionamiento

## 5 Conclusiones y recomendaciones

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la aplicación del ensayo de módulo dinámico como método para determinar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas. De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El ensayo de Lottman modificado no refleja adecuadamente el desempeño en campo de las mezclas asfálticas. La retención retenida a la tensión diametral (RRTD) con un ciclo de acondicionamiento cumple o excede los valores mínimos solicitados para todas las mezclas, aún cuando se conoce por experiencia que la fuente de agregado seleccionada tiende a presentar problemas de desnudamiento.
- La inclusión de un mayor número de ciclos de acondicionamiento en la metodología del ensayo AASHTO T283 puede mejorar la correlación con el desempeño en campo, sin embargo sigue tratándose de un ensayo empírico poco confiable.
- El uso del parámetro módulo retenido (ER) obtenido del ensayo de módulo dinámico con ciclos de acondicionamiento parece ser más estricto y acorde con la experiencia en campo. Además, gracias al uso de curvas maestras es posible evaluar el efecto de la humedad para un amplio rango de temperaturas y frecuencias y no para una sola condición, como sucede con el ensayo de Lottman modificado.
- Dentro del análisis realizado para distintos tipos de mezclas fue posible observar que la resistencia al daño por humedad puede aumentarse mediante el uso de aditivos mejoradores de adherencia. La selección del tamaño máximo nominal del agregado también puede contribuir a una menor disminución del módulo conforme se aplican los ciclos de acondicionamiento (menor susceptibilidad a la humedad).

Como recomendaciones, se sugiere incluir una mayor cantidad de materiales a fin de caracterizar la efectividad del método propuesto de manera más completa; así como la inclusión de muestras de campo y seguimiento de desempeño a largo plazo de secciones de control.

## 6 Referencias

- [1] AASHTO T 283. "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage". American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [2] Solaimanian, M., J. Harvey, M. Tahmoressi and V. Tandon. "Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar". 2003.
- [3] Choubane, B., G. C. Page, and J. A. Musselman. "Effects of Water Saturation Level on Resistance of Compacted Hot-Mix Asphalt Samples to Moisture-Induced Damage". In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1723, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 97–106.
- [4] Kandhal, P., and I. Rickards. "Premature Failure of Asphalt Overlays from Stripping: Case Histories". Asphalt Paving Technology, Vol. 70, 2002, pp. 301–351.
- [5] Kringos N, Azari H and Scarpas A. "Identification of Parameters Related to Moisture Conditioning That Cause Variability in Modified Lottman Test". Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No 2127, 2009.
- [6] Roberts, F.L. Kandhal, P.S. Brown, E.R. Lee, D.Y. & Kennedy, T.W. "Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction". NAPA Education Foundation, Lanham, MD, Third Edition, 2009.
- [7] Solaimanian, M., D. Fedor, R. Bonaquist, A. Soltani, and V. Tandon. "Simple Performance Test for Moisture Damage Prediction in Asphalt Concrete". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, 2006, pp. 345–380.
- [8] AASHTO TP79. "Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)". American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.