

# BOLETÍN TÉCNICO

PITRA-LanammeUCR

Volumen 13, N.º 1, Febrero 2022

## Implementación de la multiescala en la investigación de daño por humedad en mezclas asfálticas

**Alejandra Baldi**

✉ [alejandra.baldi@ucr.ac.cr](mailto:alejandra.baldi@ucr.ac.cr)

Investigadora

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte (UIIT)

**Ana Luisa Elizondo Salas**

✉ [ana.elizondosalas@ucr.ac.cr](mailto:ana.elizondosalas@ucr.ac.cr)

Coordinadora

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte (UIIT)

## 1. Introducción

El daño por humedad es uno de los eventos que deteriora más severamente la capa de rodamiento asfáltica durante toda su vida de servicio. Por tal razón, este fenómeno ha sido objeto de numerosas investigaciones, siendo muy compleja y difícil su comprensión. Este tipo de falla conlleva afectaciones en el desempeño de las mezclas asfálticas que inciden de igual forma en el desempeño de la estructura del pavimento.

Para garantizar el buen desempeño de un pavimento, es necesario realizar inversiones constantes en mantenimiento, así como, en otros, la incorporación de materiales como antidesnudantes que retarden la incidencia del deterioro. Una durabilidad inadecuada del pavimento afecta la calidad de servicio brindada a los usuarios y podría alterar negativamente la competitividad de un país. Por esta razón, existe una creciente necesidad de encontrar soluciones a esta problemática. Sin embargo, para ello es necesario comprender, entre otros, el fenómeno de daño por humedad, de modo que se puedan establecer acciones para prevenirlo o para atacarlo desde sus inicios, mediante la escogencia de materiales que muestren un mejor desempeño.

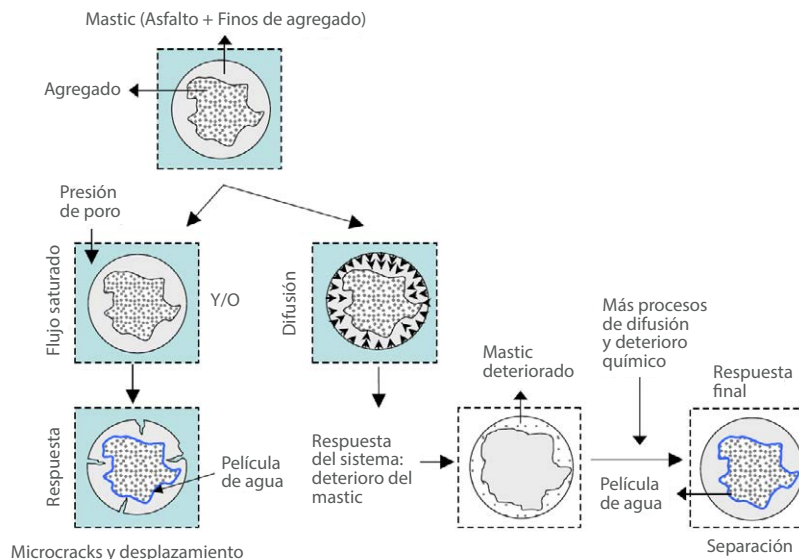
En la actualidad, muchas investigaciones se basan en la caracterización química por medio de la energía superficial de los materiales que componen a una mezcla asfáltica y se ha logrado obtener una buena correlación entre tales propiedades y el desempeño mecánico mostrado por la mezcla bajo condiciones de alta humedad. Sin embargo, tal correlación podría mejorarse significativamente al caracterizar tanto fisicoquímica como mecánicamente, un elemento representativo de la mezcla asfáltica, tal como, la mezcla asfáltica fina (FAM, por sus siglas en inglés), además de sus materiales componentes: asfalto y agregado.

La FAM es la mezcla de asfalto y agregado fino (tamaño menor a 1,19 mm) y es lo que realmente recubre al agregado grueso en una mezcla asfáltica, por lo que caracterizar su comportamiento y su interacción con el agua resultaría representativo de las condiciones reales del pavimento.

De esta forma, se resalta la importancia de caracterizar la susceptibilidad a la humedad de los materiales para pavimentos a partir de sus propiedades fisicoquímicas fundamentales. La comprensión del fenómeno de daño por humedad permite plantear soluciones concretas con las que se mejoraría la durabilidad del pavimento, lo cual se reflejaría en la reducción de la inversión requerida para el mantenimiento de un pavimento, por ende, extender su vida útil.

## 2. Daño por humedad: conceptos básicos

El daño por humedad se caracteriza por el debilitamiento de la mezcla asfáltica fina (mezcla de asfalto y agregado de tamaño menor a 1,19 mm) causado por el agua. El agua penetra la FAM mediante diversos mecanismos, a lo que el material responde con un deterioro que afecta su resistencia mecánica, tal como la formación de microgrietas o la separación del asfalto de la superficie del agregado (Figura 1).



**Figura 1 Esquema de la progresión del daño por humedad en el mástico asfáltico (Adaptado de Caro *et al.*, 2008).**

El daño por humedad es una de las fallas más severas en la mezcla asfáltica y promueve el avance de otros tipos de falla en el mismo, tales como la deformación y la fatiga. Se da principalmente en climas húmedos, donde las precipitaciones son constantes durante todo el año.

El mecanismo mediante el cual ocurre el daño por humedad ha sido un importante objeto de estudio y se caracteriza por la ocurrencia de procesos complejos que involucran tanto al asfalto como al agregado y a los vacíos de la mezcla asfáltica (Cho, y Bahía, 2007; Caro, Masad, Bhasin y Little, 2008). El agua logra desplazarse en el interior de la mezcla asfáltica mediante distintos mecanismos, entre ellos permeabilidad, capilaridad y difusión (Masad, Arambula, Ketcham, Abbas, y Martin 2007). Una vez adentrada en la mezcla, la humedad deteriora sus características fundamentales.

El daño por humedad se define como el deterioro de la mezcla asfáltica causado por la presencia del agua, que ocasiona la pérdida de adhesión entre el asfalto y el agregado, así como el debilitamiento de la cohesión del mástico asfáltico. En cuanto a la pérdida de cohesión, ésta se da cuando se deteriora el mástico asfáltico debido a la presencia del agua en el sistema, lo cual causa que los agregados se separen del resto de la mezcla en un proceso llamado desmoronamiento (Figura 2.a). Por otra parte, la pérdida de adhesión se da una vez que la humedad alcanza la interfaz asfalto-agregado, debilitándola y ocasionando que se desprenda la película de asfalto que recubre a la superficie del agregado, un proceso conocido como desnudamiento (Figura 2.b) (Caro, Masad, Bhasin y Little, 2008).



a)



b)

**Figura 2 Consecuencias del daño por humedad en mezclas asfálticas  
a) desmoronamiento y b) desnudamiento**

Es importante resaltar que el daño por humedad se concreta ya que se da un transporte efectivo de agua en el interior de la estructura de la mezcla. Esto es así ya que existe una interacción favorable entre los componentes de la mezcla (asfalto y agregado) y el agua. Este tema se amplía a continuación.

### 3. Transporte del agua en mezclas asfálticas

La evaluación mecánica de muestras de mezclas asfálticas que han sido sometidas a altos niveles de humedad es un campo de investigación importante. Varios grupos de investigación han centrado sus esfuerzos en determinar el papel del transporte de agua en el rendimiento de las mezclas.

Los hallazgos de estas investigaciones permiten identificar algunas características de las mezclas asfálticas que aumentan su susceptibilidad al daño por humedad. Entre estas características se destacan:

- El tipo de agregado utilizado: las calizas tienden a aumentar la susceptibilidad, dado que aumentan la difusividad de agua en las mezclas analizadas.
- La granulometría de la mezcla: las mezclas abiertas tienden a aumentar el transporte de agua, dada la mayor cantidad de vacíos en la misma.
- El espesor de las muestras: la difusión aumenta conforme aumenta el espesor de la carpeta asfáltica o del espécimen analizado.
- La estructura de vacíos de aire ayuda a la difusión axial de vapor. Además, la forma de los poros y su conectividad influyen en los coeficientes de difusión resultantes.

Dada la gran cantidad de variables y factores que afectan el desempeño del material en condiciones de humedad, se hace necesario mejorar los métodos de evaluación para así comprender el fenómeno y lograr predecirlo con certeza. En este sentido, la implementación de la multiescala se presenta como una opción viable que ahorra tiempo y materiales, dando los mismos resultados (o tendencias) para muestras en escala reducida que en escala mayor. La siguiente sección amplía al respecto de este tema.

## 4. El rol de la multiescala en la investigación de mezclas asfálticas y del daño por humedad

La utilización simultánea de diferentes escalas para describir un sistema se conoce como multiescala (Weinan y Jianfeng, 2011). El objetivo de realizar una investigación de este tipo radica en establecer una relación entre las propiedades micro (o nano) de los materiales y un fenómeno que ocurre a escala macro (Zeng y Qin, 2018).

En lo que respecta a las mezclas asfálticas, Underwood y Kim (2013a) establecen una jerarquía y definen al asfalto como la escala menor, la mezcla asfáltica (en adelante acotada como MA) como la escala mayor y la FAM como una escala intermedia.

La MA es una combinación de asfalto, agregados pétreos y vacíos de aire, cada uno en una proporción definida. La FAM es el componente más homogéneo de la MA y se considera que los fenómenos como deformación y propagación de grietas se dan en esta fase (Underwood y Kim, 2013a), por lo que se ha encontrado que es una escala crítica en la evaluación de la susceptibilidad del pavimento a presentar fallas comunes.

En la actualidad, se han empleado estrategias que implican el uso de la FAM en experimentos multiescala, ya que la implementación de ensayos para muestras de menor tamaño, como mástic y mezcla fina, ha mostrado tener muchas ventajas en comparación con los ensayos de mayor escala. Entre las ventajas destacan las siguientes:

- 1) Ahorro en costo y tiempo (Haghshenas, Nabizadeh, y Kim, 2016) debido a la utilización de geometrías más pequeñas y, por ende, menor cantidad de material (Nabizadeh, 2015). Esto a su vez implica el uso de equipos menos sofisticados y costosos.
- 2) Elaboración más sencilla de muestras y ensayos más eficientes (Nabizadeh, 2015).
- 3) Ensayos más simples y repetibles, ya que las muestras son más homogéneas y de menor tamaño (Im, You, Ban, y Kim, 2015).

Además de lo anterior, la ventaja más importante probablemente sea que los hallazgos de las investigaciones realizadas en mezcla fina son trasladables a la MA de gradación mayor. Para ejemplificar esto, se resumen a continuación algunas investigaciones recientes tras las que se ha demostrado que el comportamiento de la FAM es similar, e incluso equivalente, al de la MA.

- 1) Underwood y Kim (2013b) estudiaron el efecto de los factores volumétricos en el comportamiento mecánico de la FAM. De forma específica, los autores analizaron cómo el contenido de asfalto y el porcentaje de vacíos afecta a las propiedades a tensión de la FAM, así como al valor del módulo complejo ( $G^*$ ). Se encontró que el aumento porcentual en el contenido tanto de vacíos como de asfalto reduce el  $G^*$ , mientras que ocasiona un aumento en la resistencia a la deformación. Los resultados de estos ensayos fueron comparados con la MA, con el objetivo de relacionar el comportamiento micromecánico de ambos materiales. Dado que los resultados mostraron que al variar el contenido de asfalto y vacíos había cambios en las propiedades de la FAM, los autores resaltan la importancia de tener en cuenta el diseño de la mezcla fina: si se desea hacer análisis cuantitativos o modelación, se afirma que debe replicarse la FAM existente en una MA, mientras que esto no sería necesario en estudios meramente cualitativos o de comparación entre materiales.
- 2) Nabizadeh (2015) analizó las propiedades viscoelásticas, daño por fatiga y deformación permanente en mezclas asfálticas finas elaboradas con un 65% de RAP. Los resultados fueron comparados con los obtenidos para la MA, encontrándose un vínculo entre ambas escalas para todos los fenómenos estudiados. Con ello, el autor afirma que es posible obtener información esencial que permita predecir el comportamiento de la MA a partir del análisis de la FAM, ahorrándose evaluaciones experimentales complejas. Se destaca que la FAM es un componente de gran importancia en el desempeño de la MA y que de su calidad dependen

las propiedades mecánicas de ésta. Adicionalmente, el autor hace un repaso por otras investigaciones en las que se ha estudiado este tipo de muestras y que han encontrado una buena correlación entre los resultados de la mezcla fina y la MA correspondiente. Se destacan los estudios de fatiga de Kim y Little (2005) y Castelo Branco (2008); de difusión de agua a través de la estructura de FAM realizados por Vasconcelos y colaboradores (2010); los modelos computacionales validados con FAM de Karki (2010), entre otros.

- 3) Im y colaboradores (2015) analizaron la deformación de muestras de MA y de la fase de FAM correspondiente a diferentes valores de esfuerzo. Se encontró una fuerte correlación entre ambas escalas, por lo que los autores afirman que las propiedades de endurecimiento viscoelástico de la MA no sólo pueden ser estimadas sino predichas a partir del análisis de la mezcla fina. Lo anterior representaría una clara reducción de tiempo y esfuerzo experimental al usar FAM, en comparación con la utilización de muestras de mayor escala.
- 4) Gudipudi y colaboradores (2015) elaboraron muestras de MA y su correspondiente FAM con el objetivo de hallar una correspondencia en el comportamiento a fatiga de ambas. Los autores parten de la consideración de que el daño ocurrido en la mezcla se origina y aumenta en la FAM, por lo que se proponen encontrar una relación entre la disminución del módulo de esta fase y la MA. Se encontró que el comportamiento de la FAM es consistente con el de la MA, por lo que se concluye que en la FAM ocurren los procesos de interacciones fisicoquímicas y endurecimiento que la llevan a dar una respuesta en fatiga que es trasladable a la MA. Por lo tanto, los autores señalan el gran potencial de la FAM para ser utilizada en estudios que permitan diseñar mejores pavimentos en el futuro.
- 5) Haghshenas y colaboradores (2016) estudiaron el efecto del uso de rejuvenecedores sobre el endurecimiento y el agrietamiento en mezclas con alto contenido de RAP. Se analizaron muestras de FAM y de MA con el objetivo de comparar los resultados y buscar una relación entre ambas escalas. Los autores comprobaron la existencia de tal correlación, con lo que concluyen que la FAM es una buena alternativa en la predicción del comportamiento de la MA.
- 6) Freire y colaboradores (2017) estudiaron las características a fatiga de muestras de FAM de diferentes diseños: distintos TMN (tamaño máximo nominal) y contenidos de asfalto, con el objetivo de analizar el efecto de estas variables de diseño sobre las propiedades del material. Se encontró que el tamaño nominal de agregado tiene un efecto sobre la resistencia a la fatiga de las muestras de FAM analizadas: una reducción en el tamaño del agregado incrementa la vida de fatiga de la mezcla fina. Se encontró además una correspondencia entre la evolución del daño en la FAM (TMN de 2.0mm) y la MA completa.

En resumen, estas y otras investigaciones Miranda-Argüello (2015; 2018) han confirmado que es posible representar el comportamiento de las mezclas asfálticas mediante el estudio de la FAM, ya que se ha demostrado que los resultados obtenidos pueden ser trasladados a la MA completa. Sin embargo, es necesario resaltar que durante la investigación se debe asegurar que los experimentos y los modelos propuestos se alineen con lo que se desee representar, de forma que se obtenga información confiable y representativa de los resultados y que éstos puedan ser trasladados a la MA (Underwood y Kim, 2013a).

## 5. Conclusiones

Las mezclas asfálticas finas son un elemento representativo de la MA, por lo que la importancia de estudiar su comportamiento mecánico radica en varios puntos: 1) Se ha encontrado que la FAM tiene una distribución de vacíos más uniforme que la mezcla completa y 2) Se resalta que los fenómenos asociados al daño por humedad tienen origen en la FAM, por lo que se encuentra a esta escala sumamente relevante en la caracterización de tales mecanismos de falla. Finalmente, 3) se considera que la utilización de muestras de menor tamaño permite tener un mayor control en la producción de las mismas, por lo que se mejora la repetitividad y precisión de los ensayos.

La caracterización del desempeño de la FAM bajo distintas condiciones, por ejemplo, ante el daño por humedad, ha demostrado que es posible escalar su comportamiento al de la MA completa.

La investigación en FAM tiene el potencial de generar amplio conocimiento de los procesos asociados al daño por humedad en mezclas asfálticas, así como la calibración de factores de escala de manera que, si sólo se realizara un ensayo en MA, se podría predecir con cierta precisión el fenómeno en una escala distinta.

En este punto es importante aclarar que los ensayos en la MA no se pueden eliminar o sustituir completamente. La intención de aplicar la multiescala para la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas, es complementar las especificaciones empíricas asociadas a ésta con parámetros fundamentales de los materiales para garantizar un adecuado desempeño.

Para conocer más de este tema y de la investigación que se está realizando actualmente en la Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte (UIIT) se puede consultar el informe LM-PI-UIIT-111-R1, publicado en 2020.

## 6. Bibliografía

Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), 81–98. doi: 10.1080/10298430701792128

Cho, D., & Bahia, H. U. (2007). Effects of Aggregate Surface and Water on Rheology of Asphalt Films. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1998, 10-17. doi: 10.3141/1998-02

Freire, R. A., Babadopulos, L.F.A.L, Castelo Branco, V.T.F., & Bhasin, A. (2017). Aggregate maximum nominal sizes' influence on fatigue damage performance using different scales. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017067. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001912

Gudipudi, P., & Underwood, B. S. (2015). Testing and modeling of fine aggregate matrix and its relationship to asphalt concrete mix. *Transportation Research Record*, 2507(1), 120-127. doi: 10.3141/2507-13

Haghshenas, H. F., Nabizadeh, H., & Kim, Y. R. (2016). The effect of rejuvenators on rap mixtures: a study based on multiple scale laboratory test results. In *Geo-Chicago 2016* (pp. 697-707).

Im, S., You, T., Ban, H., & Kim, Y. R. (2015). Multiscale testing-analysis of asphaltic materials considering viscoelastic and viscoplastic deformation. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(9), 783-797. doi: 10.1080/10298436.2015.1066002

Masad, E., Arambula, E., Ketcham, R. A., Abbas, A. R., & Martin, A. E. (2007). Nondestructive measurements of moisture transport in asphalt mixtures, *Association of Asphalt Paving Technologists*, 76, 919-952.

Miranda-Argüello, F., Loría-Salazar, L., Aguiar-Moya, J. P., & Leiva-Padilla, P. (2015). Measurement of  $G^*$  in fine asphalt mixes. Dynamic mechanical analyzer shear test implementation. *Transportation Research Record*, 2507, 39-49. doi: 10.3141/2507-05

Miranda-Argüello, F., Loría-Salazar, L., Aguiar-Moya, J. P., & Badilla, G. (2018). Definición de un modelo mecánico para la estimación del módulo de la mezcla asfáltica a partir de la caracterización avanzada de morteros asfálticos. Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, San Pedro.

Nabizadeh, H. (2015). Viscoelastic, fatigue damage, and permanent deformation characterization of high rap bituminous mixtures using fine aggregate matrix (MA). Disertación de tesis. Universidad de Nebraska, Lincoln.

Underwood, B. S., & Kim, Y. R. (2013a). Microstructural investigation of asphalt concrete for performing multiscale experimental studies. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(5), 498-516. doi: 10.1080/10298436.2012.746689

Underwood, B. S., & Kim, Y. R. (2013b). Effect of volumetric factors on the mechanical behavior of asphalt fine aggregate matrix and the relationship to asphalt mixture properties. *Construction and Building Materials*, 49, 672-681. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.045

Unidad de Investigación en Infraestructura de Transporte (2020). *Evaluación del daño por humedad en el mástic asfáltico y su relación con la energía superficial*. LM-PI-UIIT-111-R1. LanammeUCR.

Weinan, E. & Jianfeng, L. (2011). Multiscale modeling. *Scholarpedia*, 6(10), 11527. doi:10.4249/scholarpedia.11527

Zeng, Q., & Qin, Y. (2018). Chapter 11 - Multiscale Modeling of Hybrid Machining Processes. In *Hybrid Machining* (pp. 269–298). San Diego, CA: Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-813059-9.00011-7



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

**PITRA**

Programa de  
**Infraestructura del Transporte**

*Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.*

*Coordinadora General - Programa de Infraestructura del Transporte*

#### **Unidad de Seguridad Vial y Transporte (USVT)**

Ing. Javier Zamora Rojas, M.Sc.

*Coordinador USVT*

#### **Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT)**

Ing. Raquel Arriola Guzmán, M.Sc.

*Coordinadora UNAT*

#### **Unidad de Investigación en Infraestructura del Transporte (UIIT)**

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.

*Coordinadora UIIT*

#### **Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN)**

Ing. Roy Barrantes Jiménez, M.Sc.

*Coordinador UGERVN*

#### **Unidad de Gestión Municipal (UGM)**

Ing. Erick Acosta Hernández

*Coordinador UGM*

#### **Comité Editorial 2022:**

- Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc., Coordinadora General PITRA.
- Ing. Raquel Arriola Guzmán, M.Sc., Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA.
- Rosa Isella Cordero Solano, Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA.

### **CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA**

**Diagramación:** Licda. Daniela Martínez Ortiz.

**Control de calidad:** Óscar Rodríguez Quintana.

*Implementación de la multiescala en la investigación de daño por humedad en mezclas asfálticas*

**Palabras clave:** mezcla asfáltica fina, daño por humedad, energía superficial, desempeño mecánico

(506) 2511-2500

✉ dirección.lanamme@ucr.ac.cr • 🌐 www.lanamme.ucr.ac.cr





# BOLETÍN TÉCNICO

PITRA-LanammeUCR

**Volumen 12, N.º 8, Noviembre 2021**

Guía simplificada para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito (GBV), Tomo II de la Guía de diseño estructural de pavimentos de Costa Rica (GDP-2020)