

Aproximación fisicoquímica de la susceptibilidad al daño por humedad de interfaces asfalto-agregado

Physicochemical approach of moisture damage susceptibility of binder-aggregate interfaces

Alejandra Baldi-Sevilla

LanammeUCR, Costa Rica.

alejandra.baldi@ucr.ac.cr

Mavis L. Montero

Escuela de Química.

mavis.montero@ucr.ac.cr

José Aguiar-Moya

LanammeUCR, Costa Rica.

jose.aguiar@ucr.ac.cr

Luis Guillermo Loría-Salazar

LanammeUCR, Costa Rica.

luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 11 de agosto de 2017 / **Fecha de aprobación:** 1 de septiembre de 2017

RESUMEN

El daño por humedad es reconocido por tener consecuencias severas en el desempeño de la mezcla asfáltica. Una de las causas del daño por humedad es la mala afinidad química de la interfaz asfalto-agregado formada cuando el primero recubre al segundo durante el proceso de mezcla. La debilidad de la interfaz puede deberse a una pobre interacción entre ambos materiales, lo que aumenta la predisposición del asfalto a ser desplazado por el agua. En este estudio, la calidad de la interfaz asfalto-agregado fue aproximada mediante la medición de la Energía Superficial de los materiales involucrados. Se tomaron como muestra dos tipos de agregado, una Caliza y una Grava de río (sílicea), los cuales fueron combinados con tres asfaltos: un asfalto modificado con diatomita, un asfalto modificado con nanosilica y un asfalto control. Las combinaciones propuestas fueron evaluadas mediante indicadores fisicoquímicos relacionados con el daño por humedad como el trabajo de adhesión, el trabajo de desplazamiento y la Razón de Energía. Se encontró que la calidad de la interfaz formada depende del tipo de agregado empleado. Además, se pudo evaluar si los aditivos resultan convenientes en la reducción de la susceptibilidad a la humedad, lo cual es dependiente del tipo de agregado con el que se combinen. En general, a partir de la estimación de la Energía Superficial del asfalto y agregado pueden obtenerse indicadores relevantes en cuanto a la formación de interfaces. De esta forma, es posible la evaluación fisicoquímica de asfaltos y agregados para la selección de materiales y combinaciones resistentes ante el daño por humedad.

PALABRAS CLAVES: energía superficial, goniometría, interfaces, daño por humedad, adhesión, diatomita, nanosilica.

ABSTRACT

Moisture damage is one of the most severe distresses in pavements. Among the causes of moisture damage is the poor quality of the binder-aggregate interface formed during mixing. The weakness of the interface might be due to a poor interaction between materials, which increases the susceptibility of binder of being removed from the aggregate surface by water. In this study, the quality of the binder-aggregate interface was approached by means of surface energy measurements of several binder-aggregate combinations. Two different aggregate sources were investigated: a limestone and a gravel, which were combined with three asphalt binders: a diatoms-modified binder, a nanosilica-modified binder and neat binder as control. The proposed combinations were evaluated by means of physicochemical indicators related to moisture damage, such as work of adhesion, work of debonding and energy ratio. It was found that the quality of the interface is highly related to the aggregate source. Furthermore, several anti-strip additives were evaluated in terms of reduction of water susceptibility of the combinations and it was observed that their efficiency is dependent on the aggregate source with which the modified binder is combined. In summary, various parameters associated to interfaces can be obtained from surface energy measurements of binders and aggregates. This technique allows the physicochemical evaluation of binders and aggregates and the information obtained might be used as criteria for appropriate selection of water-resistant materials.

KEY WORDS: surface energy, interfaces, moisture damage, adhesion, diatoms, nanosilica.

INTRODUCCIÓN

El daño por humedad es una de las fallas más severas en el pavimento, especialmente en climas húmedos donde las precipitaciones son constantes durante todo el año. El agua penetra la mezcla asfáltica mediante una serie de mecanismos (Masad et al. 2007), los cuales han sido un importante objeto de estudio (Taylor y Khosla 1983; Kiggundu y Roberts 1988; Terrel y Shute 1989; Little y Jones 2002) e involucran tanto al asfalto, como al agregado y a los vacíos de la mezcla asfáltica (Cho y Bahía 2007; Caro et al. 2008).

La presencia de agua en una mezcla asfáltica provoca el detrimento de sus propiedades fundamentales, dejando como resultado el debilitamiento de la cohesión del mastic asfáltico y pérdidas de adhesión entre el asfalto y el agregado (Kiggundu y Roberts 1988), principalmente. La naturaleza de estos deterioros hace del agua un catalítico para otras fallas como la deformación permanente y el agrietamiento (Cho y Kim 2010), por lo que crece la necesidad de producir combinaciones de asfalto y agregado resistentes a los efectos desfavorables de la humedad.

La calidad de la interfaz asfalto-agregado formada durante la producción de una mezcla asfáltica es evaluada a partir del conocimiento de la energía superficial (ES) de los materiales involucrados. La ES permite predecir ciertas características fundamentales de la interfaz, tales como la fuerza de adhesión y la tendencia del asfalto a desprenderse de la superficie del agregado en presencia del agua (Chen et al. 2003).

Energía Superficial

La energía superficial es una propiedad esencial en todo material y es determinada por las interacciones fisicoquímicas que ocurren en su superficie. La ES se divide en dos componentes, según el tipo de interacción que se dé en el material. El componente dispersivo γ^{LW} , correspondiente a las interacciones de Lifshitz-van der Waals, y el componente polar γ^{AB} , que incluye las interacciones en las que hay flujo de electrones e iones hidronio (van Oss et al. 1988). El componente polar se subdivide a su vez en los componentes ácido de Lewis, γ^+ , y básico de Lewis, γ^- (Good y van Oss 1991) (ver Ecuación 1).

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+\gamma^-} \quad (1)$$

La ES, así como sus componentes, pueden estimarse a partir de la medición del ángulo de contacto formado entre un líquido de prueba y la superficie de interés. Los ángulos de contacto obtenidos se relacionan con la ES del material a partir de la Ecuación 2 (Hefer et al. 2006).

$$\gamma_L(1 + \cos \theta) = 2\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_L^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_S^+\gamma_L^-} + 2\sqrt{\gamma_S^-\gamma_L^+} \quad (2)$$

donde los subíndices L y S representan al líquido de prueba y al sólido de interés, respectivamente; θ es el ángulo de contacto formado entre estos dos materiales.

Adhesión y Desnudamiento del Asfalto

La formación de la interfaz asfalto-agregado es un proceso fisicoquímico que involucra la interacción de las superficies de ambos materiales. Por esta razón, la ES del asfalto y del agregado es utilizada en la estimación de indicadores como la adhesión y la susceptibilidad al desplazamiento del asfalto (desnudamiento) por efecto del agua.

El trabajo de la adhesión (W_{AB}) entre dos fases se estima a partir de la Ecuación 3.

$$W_{AB} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad (3)$$

donde γ_A es la energía superficial del agregado, γ_B es la energía superficial del asfalto y γ_{AB} es la energía de la interfaz agregado-asfalto.

El desplazamiento por efecto del agua (W_{ABW}^{wet}) se calcula según la Ecuación 4 y es una estimación de la facilidad con la que la humedad alcanza la interfaz y desplaza al asfalto de la superficie del agregado.

$$W_{ABW}^{wet} = \gamma_{AW} + \gamma_{BW} - \gamma_{AB} \quad (4)$$

El parámetro de Razón de Energía (ER, por sus siglas en inglés) (ver Ecuación 5) cuantifica la relación entre los procesos de adhesión y desplazamiento que ocurren en la mezcla asfáltica.

$$ER = \frac{W_{AB}}{W_{ABW}^{wet}} \quad (5)$$

El ER sirve como criterio en la evaluación de las combinaciones asfalto-agregado puesto que, de acuerdo con investigaciones previas (Bhasin et al. 2006), se establece que el valor de W_{AB} sea tan alto y el valor de (W_{ABW}^{wet}) tan bajo que permitan la obtención de un ER superior a 0.8. De esta forma, la combinación asfalto-agregado se considera resistente al daño por humedad.

Se considera que estos indicadores pueden ser utilizados en la determinación de la susceptibilidad a la humedad de la interfaz asfalto-agregado. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es evaluar la resistencia al daño por humedad de distintas combinaciones asfalto-agregado, a partir de la estimación de la energía superficial de ambos materiales.

METODOLOGÍA

En el presente estudio se utilizó un tipo de asfalto (PG 70-22) a manera de asfalto control, el mismo fue modificado con 4% de Diatomita y con 4% de Nanosílica, individualmente. Adicionalmente, se utilizaron dos fuentes distintas de agregado, una caliza y una grava silícea. La energía superficial de cada uno de estos materiales se obtuvo con la ayuda del goniómetro y la aplicación de la Ecuación 2. La explicación completa de las transformaciones matemáticas y demás detalles de la medición pueden encontrarse en la literatura (Bhasin y Little 2006; Arabani y Hamedi 2011; Hefer et al. 2013). Los datos obtenidos se encuentran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Valores de ES de los materiales propuestos

Material		Energía Superficial (ES), erg/cm ²				
		γ_{TOTAL}	γ^{LW}	γ^{AB}	γ^+	γ^-
Asfaltos	Control	20.1	19.0	1.03	0.128	2.07
	4% Diatomita	17.5	16.7	0.836	0.0380	4.59
	4% Nanosílica	21.8	10.9	3.9	6.98	6.31
Agregados	Caliza	42.1	39.4	2.77	0.226	8.49
	Grava silícea	54.7	46.9	27.9	0.572	26.5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 1 se observa que el asfalto control tiene un mayor carácter dispersivo comparado con el carácter polar. Esto es esperable debido a que el asfalto está compuesto por moléculas orgánicas de baja polaridad. Además, se observan los cambios fisicoquímicos que le ocurren al asfalto luego de la modificación. La incorporación de aditivos inorgánicos como la diatomita y la nanosílica en el asfalto control reducen el valor del componente dispersivo y, en el caso de la modificación con nanosílica, aumenta significativamente el valor del componente polar. En el caso de los agregados, se encontró que ambos materiales son altamente dispersivos. Sin embargo, ambos difieren significativamente en términos de polaridad ya que la grava silícea tiene un componente polar básico que triplica al de la caliza, dando como resultado un componente polar total diez veces más grande para la grava silícea. Las diferencias observadas entre los agregados se deben a la composición química de cada uno. La grava está conformada por minerales tales como óxidos de silicio y aluminio que incrementan su basicidad, mientras que la caliza está compuesta principalmente por calcita, un mineral de menor basicidad.

Los cambios observados en la fisicoquímica del asfalto luego de la modificación tienen repercusiones en la manera en la que éste se adhiere al agregado. A su vez, la mineralogía de cada agregado es igualmente determinante en el proceso de adhesión. Para ilustrar estas afirmaciones, la Figura 1 muestra el trabajo de adhesión obtenido para las combinaciones propuestas.

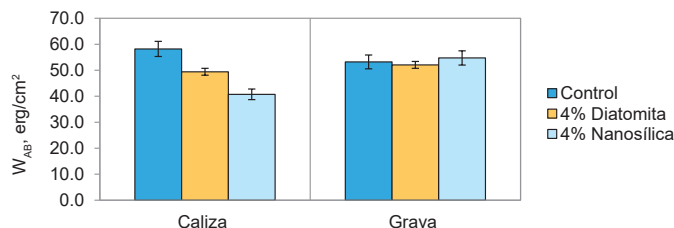


Figura 1. Trabajo de adhesión para las combinaciones propuestas

En el caso de las combinaciones de asfalto con el agregado calizo se observa que éste tiene una mayor adhesión con el asfalto control que con los asfaltos modificados. Es decir, la modificación con diatomita y nanosílica al 4% resulta en una reducción de la adhesión con el agregado calizo. Por otro lado, los valores de adhesión de las combinaciones producidas con la grava silícea se mantienen constantes, sin embargo, se observa un ligero aumento en la adhesión para la combinación de la grava silícea y el asfalto modificado con nanosílica. En resumen, para estos dos agregados la adición de nanosílica y diatomita al 4% no ofrece una mejora significativa en términos de adhesión.

Desde otro punto de vista, de acuerdo con la Figura 1, el asfalto control tiene una mayor compatibilidad con la caliza que con la grava silícea, ya que el valor del trabajo de adhesión es más alto para tal agregado. Adicionalmente, se observa que la presencia de nanosílica al 4% aumenta en mayor grado la compatibilidad del asfalto con la grava, mientras que disminuye la compatibilidad con el agregado calizo. En otras palabras, el uso de nanosílica como aditivo es ventajoso si en el diseño de mezcla se pretende utilizar agregado tipo grava silícea. Tales observaciones resultan útiles al diseñar una mezcla asfáltica, puesto que permiten seleccionar al aditivo adecuado según el tipo de agregado a emplear, de forma que la adhesión mejore o no sea afectada en gran medida. Sin embargo, en términos de daño por humedad es necesario considerar además el comportamiento que exhibirá cierta combinación en presencia del agua. Al respecto, el trabajo de desplazamiento para las combinaciones estudiadas se ilustra en la Figura 2.

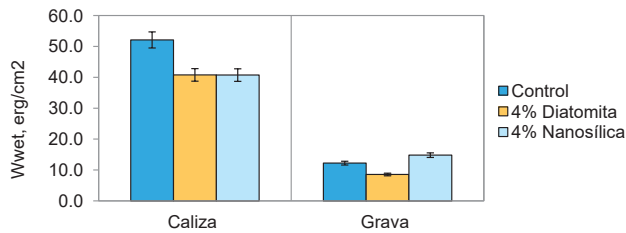


Figura 2. Trabajo de desplazamiento en presencia del agua para las combinaciones propuestas

Al tener en cuenta que el valor del W_{wet} debe ser bajo, es posible observar en la Figura 2 que la modificación del asfalto con diatomita y nanosilica tiene un efecto favorable en las combinaciones que involucran a la caliza, ya que estos aditivos reducen el trabajo de desplazamiento y, por tanto, reducen la tendencia del asfalto al desnudamiento. Por otra parte, entre las combinaciones producidas con la grava silícea, destaca la combinación con asfalto modificado con diatomita, la cual tiene el valor de W_{wet} más bajo. Lo anterior representa para el asfalto una menor tendencia a ser desplazado por el agua. No obstante, de acuerdo con la Figura 2, la combinación de la grava silícea con el asfalto modificado con nanosilica tiene un W_{wet} más alto comparado con el asfalto control. Por tanto, puede inferirse que este aditivo aumenta levemente la susceptibilidad del asfalto ante la humedad.

La Figura 2 muestra la superioridad de la grava silícea al producir interfaces asfalto-agregado menos propensas al colapso por el agua. La magnitud del trabajo de desplazamiento de las combinaciones que involucran a este agregado son significativamente inferiores comparadas con las combinaciones producidas con la caliza, lo cual hace de la grava silícea un agregado apto para utilizarse en zonas con altos niveles de humedad.

El criterio final acerca del desempeño ante la humedad de las diferentes combinaciones se obtiene al observar los resultados de la Razón de Energía (ER) en la Figura 3. Un valor de ER alto (mayor a 0.8) para cierto par asfalto-agregado es sinónimo de que el mismo tendrá una alta resistencia al daño por humedad (Bhasin et al. 2006).

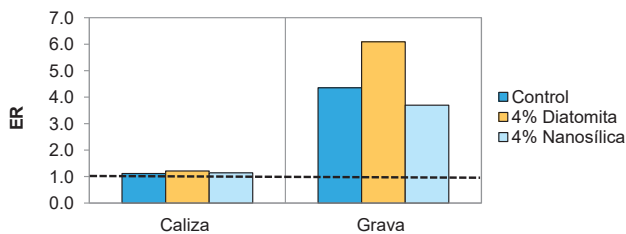


Figura 3. Razón de Energía (ER) para las combinaciones propuestas. El valor límite de 0.8 está marcado con una línea discontinua

La Figura 3 muestra que todas las combinaciones propuestas tienen un valor de ER superior a 0.8 por lo que puede considerarse que todas se desempeñarán adecuadamente en presencia de humedad. Sin embargo, se observa además que las combinaciones producidas con la grava silícea superan significativamente aquellas producidas con la caliza. Lo anterior permite inferir que la utilización de grava silícea como agregado en una mezcla asfáltica reduce la susceptibilidad de la misma ante el daño por humedad. Nótese además que la modificación del asfalto control con diatomita aumenta el valor de ER para ambos agregados, no así la modificación con nanosilica la cual inclusive reduce el valor de ER del asfalto combinado con la grava silícea. Se concluye nuevamente que estas observaciones sirven como criterio en la elección de los materiales adecuados durante el diseño mezcla.

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con los obtenidos en un estudio previo (Aguar-Moya et al. 2015) en el cual se evaluó la fuerza de adhesión y resistencia al agua de varias combinaciones asfalto-agregado mediante un ensayo mecánico llamado Fuerza del Enlace Adhesivo o Adhesive Bond Strength (ABS) en inglés, en el que se mide la fuerza necesaria para separar mecánicamente al asfalto de la superficie del agregado. A mayor presión requerida, mayor se considera la adhesión entre los materiales (Aguar-Moya et al. 2016).

En el estudio mencionado se emplearon varios tipos de agregado, entre ellos grava silícea y agregado calizo, los cuales fueron combinados con varios tipos de asfalto, incluyendo asfaltos modificados con nanosilica y diatomita. Los autores encontraron que la modificación del asfalto diatomita y con nanosilica da como resultado una mayor adhesión particularmente con la grava silícea en condiciones secas. En condiciones húmedas los autores observaron que la grava silícea se combina fuertemente con el asfalto, tanto modificado como sin modificar, por lo que se requirió mayor fuerza para separar al mismo del agregado. Tales observaciones refuerzan los resultados del presente estudio, en el que se destaca la superioridad de la grava silícea sobre el agregado calizo y la utilidad de aditivos como la diatomita como promotor de la resistencia al daño por humedad.

CONCLUSIONES

La estimación de la calidad de la interfaz asfalto-agregado formada en una mezcla asfáltica es posible con la implementación del goniómetro. Tal equipo permite obtenerla energía superficial de los materiales, mediante un procedimiento sencillo y de bajo costo. La información de ES obtenida permite a su vez el cálculo de indicadores relevantes, tales como la adhesión y

el desnudamiento. De esta forma, es posible predecir de manera fisicoquímica el comportamiento que exhibirá la interfaz asfalto-agregado ante el daño por humedad.

A su vez, esta técnica es de gran ayuda en la elección de materiales de mayor resistencia ante el daño por humedad. En general, el presente estudio permitió concluir que la adición de diatomita al asfalto mejoraría significativamente el desempeño ante la humedad para los dos agregados seleccionados. Adicionalmente, se observó que, de los dos tipos de agregados, la grava silícea produce las interfaces más resistentes a la humedad.

Las observaciones de este estudio correlacionan correctamente con el ensayo mecánico BBS, el cual es sencillo de aplicar y podría

ser utilizado igualmente en la selección de materiales durante el diseño de mezcla. Se recomienda la ampliación de la cantidad y tipo de combinaciones asfalto-agregado a evaluar, incluyendo aditivos de distinta naturaleza química, tales como polímeros y diatomita. Se recomienda, además, la caracterización mecánica del material empleando mezcla asfáltica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR y al Centro de Electroquímica y Energía Química, CELEQ por el apoyo brindado a esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Leiva-Villacorta, F., Loría-Salazar, L. (2015). Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures with the Use of Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests. *Trans. Res. Rec.: J. Trans. Res. Board*, 2505, pp. 57-65. doi: 10.3141/2505-08
2. Aguiar-Moya, J. P., Baldi-Sevilla, A., Salazar-Delgado, J., Pacheco-Fallas, J., Loría-Salazar, L., Reyes-Lizcano, F., Cely-Leal, N. (2016). Adhesive Properties of Asphalts and Aggregates in Tropical Climates. *Int. J. Pavement. Eng.*, 1-10. doi: 10.1080/10298436.2016.1199884
3. Arabani, M., & Hamed, Gh. H. (2011). Using the Surface free energy method to evaluate the effect of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.* 23, 802-811. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000228
4. Bhasin, A., Masad, E., Little, D. & Lytton, R. (2006). Limits on Adhesive Bond Energy for Improved Resistance of Hot Mix Asphalt to Moisture Damage. *Trans. Res. Rec.: J. Trans. Res. Board*, 1970, pp. 3-13. doi: 10.3141/1970-03
5. Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *Inter. J. Pavement Eng.*, 9(2), 81-98. doi: 10.1080/10298430701792128
6. Chen, D., Little, D., Lytton, R., & Hostle, J. (2003). Moisture Damage Evaluation of Asphalt Mixture by Considering Both Moisture Diffusion and Repeated Load Conditions. *Transport. Res. Rec.* 1832 (03-2730), 42-49. doi:10.3141/1832-06
7. Cho, D., & Bahia, H. U. (2007.) Effects of Aggregate Surface and Water on Rheology of Asphalt Films. *Transport. Res. Rec.* 1998, 10-17. doi: 10.3141/1998-02
8. Cho, D., & Kim, K. (2010). The Mechanisms of Moisture Damage in Asphalt Pavement by Applying Chemistry Aspects. *J. Civ. Eng.* 14(3), 333-342. doi: 10.1007/s12205-010-0333-z
9. Good, R. J., and van Oss, C. J., (1991). The Modern Theory of Contact Angles and the Hydrogen Bond Components of Surface Energies. Plenum Press, New York.
10. Hefer, A., Bhasin, A., & Little, D. (2006). Bitumen Surface Characterization Using a Contact Angle Approach. *J. Mater. Civ. Eng.* 18, 759-767. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(759)
11. Kiggundu, B. M., & Roberts, F. L. (1988). Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods. NCAT Report No. 88-2, National Center for Asphalt Technology, Auburn University.
12. Little, D. N., & Jones, D. R. (2002). Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavement. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavement: A National Seminar, San Diego, CA, 37-70.
13. Masad, E., Arambula, E., Ketcham, R. A., Abbas, A. R., & Martin, A. E. (2007). Nondestructive measurements of moisture transport in asphalt mixtures. *J. Assoc. Asp. Pav. Tech.*, 76, 919-952.
14. Nejad, M., Hamed, Gh. H., & Azarhoosh, A. R. (2013). Use of surface free energy method to evaluate effect of hydrate lime on moisture damage in hot-mix asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.* 25, 1119-1126. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000650
15. Taylor, M. A., & Khosla, N. P. (1983). Stripping of Asphalt Pavements: State of the Art. Transportation Research Record 911.
16. Terrel, R. L., & Shute, J. W. (1989). Summary report on water sensitivity, SHRP-A/IR-89-003. Strategic Highway Research Program, National Research Council Washington D.C.
17. van Oss, C. J., Chaudhury, M. K., & Good, R. J. (1988). Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems. *Chem. Rev.*, 88, 927-941. doi: 10.1021/cr00088a006