



USO DE ADITIVOS ADHERENTES EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE: UNA REVISIÓN

USE OF ADHERENT ADDITIVES IN DESIGNING ASPHALT HOT MIXTURES: A REVIEW

Reinerio Elden, Vasquez Llamo¹; Wily Rogelio, Vasquez Ramirez²; Sócrates Pedro, Muñoz Pérez³

Recibido 02/12/2020: Aprobado: 28/12/2020

DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18901.55520>

RESUMEN

Considerando la necesidad de garantizar una vida útil y duradera de las superficies viales, se ha generado el desarrollo de nuevos materiales que aseguren la adherencia entre el betún y los agregados, pudiendo combatir la falla causada por la humedad. En la presente revisión literaria se analizó diferentes artículos científicos con el objetivo de determinar el desempeño de los diferentes adherentes utilizados en las mezclas asfálticas en caliente, los porcentajes óptimos, y los diferentes métodos utilizados, para hallar la resistencia a la humedad. Se encontró que los diferentes aditivos adherentes, tanto naturales como químicos, muestran un rendimiento excepcional ante la resistencia a la humedad, brindando una vida útil duradera del pavimento, en diferentes porcentajes óptimos que varían de acuerdo al agregado utilizado en la mezcla. Los métodos más utilizados para determinar la resistencia a la humedad fueron la prueba de arranque, adherencia Vialit, prueba de Lottman modificada y prueba de agua hirviendo.

Palabras clave: *mezcla de asfalto; daño por humedad; aditivos adherentes; agrietamiento por fatiga*

¹Reinerio Elden, Vasquez Llamo. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Señor de Sipán. Perú. Correo: yllamoreine@crece.uss.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2710-645X>

²Wily Rogelio, Vasquez Ramirez. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Señor de Sipán. Perú. Correo: rogeriovrw@crece.uss.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9763-3186>

³Sócrates Pedro, Muñoz Pérez. Docente en la Universidad Señor de Sipán. Perú. MSc. en Ciencias de la Tierra con Mención en Geotecnia Correo: msocrates@crece.uss.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>

ABSTRACT

Considering the need to guarantee a useful and durable life of road surfaces, the development of new materials has been generated that ensure the adherence between bitumen and aggregates, being able to combat the failure caused by humidity. In this literary review, different scientific articles were analyzed in order to determine the performance of the different adherents used in hot asphalt mixes, the optimal percentages, and the different methods used to find resistance to moisture. It was found that the different adherent additives, both natural and chemical, show exceptional performance against moisture resistance, providing a long-lasting useful life for the pavement, in different optimal percentages that vary according to the aggregate used in the mixture. The most widely used methods to determine moisture resistance were the pull-out test, Vialit adhesion, modified Lottman test, and boiling water test.

Keywords: asphalt mix; moisture damage; adherent additives; cracking from fatigue

1. INTRODUCCIÓN

El rápido y continuo crecimiento de la demanda de tráfico, junto con el aumento de las cargas por eje permisibles, requiere mayor calidad para los materiales de pavimentación de carreteras [1], es por ello que el reciclaje de los bituminosos ha generado un debate y un desarrollo considerables en última década [2]. El asfalto de mezcla en caliente (HMA) ha sido el principal material para suelos flexibles que consisten en agregados y aglutinantes de asfalto que se mezclan y compactan a temperaturas elevadas [3], pero al mismo tiempo la gran mayoría de las fallas del pavimento de este tipo son el resultado de una mala adherencia que ocurre entre el asfalto y los agregados [4].

El daño por humedad en la HMA ocurre debido a una pérdida de adherencia o cohesión, lo que resulta en una reducción de su resistencia o rigidez, así como el desarrollo de diversas formas de deterioro del pavimento [5], es por ello que la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado juega un papel fundamental en la resistencia de la mezcla al daño por humedad y al agrietamiento por fatiga [6]. En general la humedad puede actuar sobre la pérdida de adherencia, lo que es el punto de partida de muchas fallas en el pavimento [7], su deterioro debido a la humedad es considerablemente alto, atacando directamente a la compatibilidad entre el asfalto y los áridos, así como la cohesión de la matriz de asfalto [8], es por ello que el daño inducido por la humedad es una de las razones más comunes del deterioro prematuro de los pavimentos de HMA [9].

Se han realizado varias investigaciones a lo largo de la última década para mejorar la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado mediante aditivos diferentes [10], dichos aditivos ayudan a mejorar la adherencia entre asfalto y áridos, y previenen la formación de surcos y grietas [11]. Los aditivos anti-adherentes se clasifican en dos categorías generales:

aditivos agregados al betún y aditivos agregados al agregado [12].

La adhesividad corresponde principalmente a la estabilidad del agua en el comportamiento de la carretera y al propósito de estudiarla entre el agregado grueso y el asfalto [13], cuanto mayor es el trabajo de adhesión, más energía se libera del sistema asfalto-agregado, lo que se traduce en una mejor estabilidad del sistema y una mejor compatibilidad entre las dos fases [14]. Debido a eso en la presente revisión literaria, se analizó diferentes artículos con el objetivo de determinar el desempeño de los diferentes adherentes utilizados en las mezclas asfálticas en caliente.

2. DESARROLLO

2.1. Tipos de Aditivos Naturales Adherentes en el Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente

Se ha realizado la modificación de mezclas bituminosas utilizando ceniza de dátil como relleno mineral, para evaluar la resistencia a la falla de humedad de dichas mezclas, indicando que la adherencia y cohesión entre los agregados y el betún se desarrollaron mejor mejorando la resistencia a la humedad [15]. Durante la exploración del potencial de los residuos de carburo de calcio (CCR) para su uso como relleno en HMA, sustituyendo el relleno de piedra caliza tradicional en varias proporciones, se encontró que las partículas CCR tienen capacidades de adsorción mejoradas y pueden generar mejores características de adhesión, lo que resulta en una unión más fuerte para mantener juntas las partículas agregadas [16].

Se desarrolló un estudio con el propósito de determinar los efectos de los nanoaditivos, incluida la nanoarcilla (NC) y la nanocaliza (NL), sobre la durabilidad de la mezcla de asfalto en caliente HMA, concluyendo que la adición de NC y NL hasta un contenido óptimo provocó un aumento en la adhesión de betún-agregado y una mayor durabilidad contra los ciclos de congelación-descongelación [17]. Así mismo, se evaluó el efecto del nano óxido de zinc (ZnO) en dos porcentajes diferentes por peso del ligante asfáltico como agente antideslizamiento sobre el daño por humedad de la HMA, teniendo como conclusión que el efecto del nano ZnO en la mejora de la adherencia del asfalto-agregado en condiciones húmedas fue mayor [18]. De igual manera, se investigó la influencia del polibutileno (PB) en la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas, hallando que el aditivo PB aumenta la resistencia de las mezclas asfálticas frente al daño por humedad así también el aditivo de PB mejora la adhesión entre los aglutinantes de asfalto y los agregados que eran susceptibles al daño por humedad [19].

Con el fin de estudiar la mejora de la cal hidratada (HL) en la adherencia del asfalto por mecanismo, se estableció un modelo de falla de adherencia asfalto-agregado basado en el método de energía libre superficial (SFE), los resultados mostraron que HL conduce a un aumento del trabajo de adhesión, lo que se traduce en una mejora de la adhesión entre el asfalto y el agregado [20]. También se investigó dos aditivos: cal hidratada y cenizas volantes, agregándolos a dos tipos de mezclas en las que se utilizan diferentes aglutinantes y agregados de asfalto, obteniendo como resultado que las pruebas de laboratorio indican que las mezclas, donde se utilizan agregados de alta calidad y aglutinante modificado con polímeros, son bastante auto-resistentes al daño de la humedad [21].

Se estudió el efecto del polietileno de peso molecular ultra alto (UHMWPE) sobre las propiedades reológicas del aglutinante asfáltico a diferentes temperaturas y características funcionales de las mezclas asfálticas. Los resultados mostraron que el uso de UHMWPE, proporciona una mejor adherencia entre aglomerante asfáltico y agregados, mayor vida a fatiga, reducción de la deformación permanente y mejoría la sensibilidad a la humedad de las muestras modificadas en comparación con las muestras control [22].

2.2. Tipos de Aditivos Químicos Adherentes en el Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente

Se modificó la mezcla asfáltica en caliente con el aditivo WarmMix Asphalt (WMA), que tiene el potencial de mejorar la propiedad de adhesión de los aglutinantes base, se determinó mediante una prueba de dispositivo de gota sécil (SDD) para averiguar el trabajo de adhesión de los aglutinantes modificados con aditivo WMA, la prueba demostró que las características adhesivas de la mezcla están en su mejor momento y los resultados inclinaron a la conclusión de que el aditivo WMA tuvo efecto sobre el comportamiento de adhesión y decapado [23].

Una buena adherencia de la película bituminosa sobre la superficie agregada es importante para un pavimento bituminoso duradero, el agotamiento de esta película de la superficie del agregado hidrófilo debido a la presencia de agua se denomina decapado, es por ello que se realizó un estudio utilizando dos agentes líquidos anti-decapado (ASA): 1) a base de silicio (ZycoTherm) y 2) a base de amina en la mezcla asfáltica. Los resultados mostraron que el uso de ASA reduce la susceptibilidad a la humedad de las mezclas bituminosas y también se observó que ZycoTherm con una dosis de 0,05% arrojó mejores resultados [24].

Se evaluaron mezclas de asfalto que contienen agentes anti-decapantes líquidos desarrollados (K), el agente K consta de aditivo de silano, tensioactivo de tipo amina y estabilizador, se

elaboraron 7 tipos del agente K, numerados del 1 al 7, tienen diferentes proporciones de aditivo de silano a tensioactivo de tipo amina. Los resultados mostraron que la mayor resistencia a la humedad se obtiene para las mezclas asfálticas modificadas con los agentes anti-decapantes, K-3, K-6 [25].

Se realizó un estudio con el fin de evaluar los efectos del uso de Zycosoil como aditivo anti-decapado sobre la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas en caliente, determinando el mecanismo que afecta la unión adhesiva entre el agregado y el ligante asfáltico utilizando el método de energía libre de superficie (SFE) y la prueba de laboratorio de módulo dinámico. Los resultados del método SFE muestran que Zycosoil disminuye la diferencia entre la energía libre de la adhesión del aglutinante de asfalto agregado en condiciones secas y húmedas y esta diferencia hace que la mezcla sea más resistente al daño por humedad [26]. Del mismo modo se afirmó que el zycosoil de nanotecnología como agente anti-decapado puede mejorar las propiedades mecánicas y la sensibilidad a la humedad de las mezclas de asfalto [27], y aumenta la adherencia entre los agregados y los aglutinantes de asfalto y, a su vez, influye en la resistencia a la humedad de la mezcla [28].

Se analizaron dos tipos de aditivos, un copolímero polar y uno de etileno con aglutinante de asfalto mineral en la mezcla de asfalto en caliente, utilizando el método de energía libre de superficie (SFE), los resultados muestran que el copolímero polar aumenta los componentes básicos y disminuye el componente ácido de la energía libre de la superficie del ligante de asfalto que aumenta la adhesión con agregados ácidos que son susceptibles al daño inducido por la humedad [29].

Se realizó un estudio para evaluar la susceptibilidad de los agregados y aglutinante asfáltico con y sin aditivos líquidos antideslizamiento (LAA) al daño por humedad en función de las propiedades que afectan la adhesión entre el agregado y el aglomerante asfáltico, y la fuerza de cohesión del aglutinante asfáltico utilizando el concepto de energía libre de superficie (SFE) y pruebas de laboratorio. Los resultados mostraron que la adición de LAA hace que aumente la SFE total del aglutinante asfáltico, lo que da una disminución en la separación entre el agregado y el aglutinante asfáltico en presencia de agua [30].

2.3. Métodos Utilizados para Determinar la Adherencia en el Diseño de HMA

La prueba de arranque para la fuerza de unión, es un método eficaz para comparar pares de adhesivos y adherentes, pero dado que los resultados de la prueba dependen de la geometría, éstas sólo se pueden utilizar para la evaluación cualitativa de la unión [31]. Por otro lado, la

prueba de adherencia Vialit, se aplica este método para determinar la capacidad de adhesión del aglutinante-agregado, siguiendo la especificación estándar EN 12272-3. Ésta se realiza en dos condiciones: secas y húmedas [32].

Por su lado, la prueba de Lottman modificada (AASHTO T283) es utilizada para determinar la susceptibilidad a la humedad, tiene la mayor extensión y generalidad de acuerdo con el estándar AASHTO T283; adoptada por el sistema Superpave como la prueba requerida para la determinación del daño por humedad [33] [34]. Así mismo, para explorar el daño por humedad de las mezclas de asfalto en caliente se utiliza la prueba del agua hirviendo, se considera un método cualitativo para evaluar el potencial de susceptibilidad a la humedad del betún [35], es uno de los métodos más simples que se usa para evaluar las características de adhesividad de las partículas agregadas con betún, empleando una clasificación visual del grado de desprendimiento después del acondicionamiento de prueba [36].

2.4. Porcentaje Óptimo de Aditivos Adherentes en HMA

Se investigó la combinación de poliolefinas en polvo y la fibra de vidrio, utilizando diferentes porcentajes como aditivo en mezclas asfálticas en caliente, los resultados indicaron que el uso de hasta un 0,12% de la fibra sintética por peso de la mezcla total mejoró el rendimiento y la adherencia de la mezcla [37]. De igual forma se evaluó el desempeño de HMA modificado por óxido de grafeno (GO), los resultados experimentales indicaron que la adición de GO al 0,05% por peso de ligante mejora significativamente la resistencia a la humedad [38]. Por otro lado, se evaluó el efecto de la cal hidratada (HL) sobre la sensibilidad a la humedad del HMA aplicando conceptos termodinámicos y el método de energía libre de superficie (SFE), se mostraron hallazgos que el contenido óptimo de cal hidratada fue de 1,5% y 2% , mejorando la adherencia y la resistencia a la humedad [39].

Se estudió también la adición de Gilsonita al betún en mezclas asfálticas calientes, en diferentes porcentajes, demostrando que la Gilsonita aumenta considerablemente la estabilidad Marshall, y a su vez que su adición a las mezclas asfálticas reduce la sensibilidad a la humedad, agregando 4,6% Gilsonita al betún puro [40]. También se investigó la posibilidad de usar cenizas volantes de neumáticos, como relleno mineral para una mezcla de asfalto en caliente, indicando que la cantidad óptima de cenizas volantes de neumáticos es el 5,0%, mejorando la resistencia a la humedad y una mejora de adhesión en asfalto-agregado [41].

2.5. Uso de Aditivos Adherentes para Mejorar la Resistencia a la Humedad

Se estudió el uso de una mezcla de fibras de polipropileno y aramida para evaluar las

características de desempeño de una mezcla asfáltica en caliente, en cuanto a su adhesión y propiedades mecánicas, teniendo como resultado que la adición de mezclas de fibras de polipropileno y aramida a la mezcla asfáltica en caliente, aumenta la adhesión de asfalto-agregado, mejora sus propiedades mecánicas, y retrasa el desarrollo de deterioros en el pavimento de asfalto y prolongar su vida útil [42].

Se realizó un estudio, adicionando los aditivos anti-decapado como la (cal hidratada y Zycosoil), en las mezclas asfálticas en caliente, utilizando la metodología de Superficie de Respuesta (RSM), se obtuvo como resultado que el aditivo Zycosoil mejora la resistencia a la humedad y el rendimiento a largo plazo de las mezclas asfálticas en comparación con la cal hidratada [43].

Una de las principales causas de la falla prematura del pavimento es el daño por humedad de la capa de concreto asfáltico, debido a eso se determinó el efecto de aditivos como la cal hidratada, y el betún modificado con polímero elastomérico, mediante la prueba de Lottman modificada (AASHTO T 283), los resultados indicaron que la adición de cal hidratada y la modificación del polímero aumentaron la resistencia de las mezclas asfálticas al efecto perjudicial del agua [44].

Se determinó el efecto del uso de nanocompuesto de estireno-butadieno-estireno (SBS), como un nuevo aditivo anti-decapado en asfalto de mezcla en caliente, utilizando la prueba de Lottman modificada, se halló que la adición de material nanocompuesto SBS aumentó la adhesión y cohesión de la mezcla, no permitió que el betún se moviera rápidamente sobre la superficie de los agregados y provocó que la mezcla tuviera una mayor resistencia a la humedad después de los ciclos de congelación-descongelación, en comparación con otras muestras sin aditivos [45].

Por otro lado se realizó una investigación con el propósito de evaluar la influencia de los aditivos anti-decapado (ASA) en las propiedades de desempeño y susceptibilidad a la humedad de las mezclas en caliente ,modificadas con polvo de neumático (CR), y Caucho de estireno-butadieno (SBR), los resultados revelaron que la adición de ASA a las mezclas modificadas de SBR / CR, mejora el módulo elástico, las propiedades de formación de surcos, la resistencia a la tracción, la energía de fractura y la resistencia a la fatiga y al daño por humedad de las muestras [46].

Se determinó la viabilidad de un método de prueba de resistencia de adherencia asfáltica (ABS), modificado para su uso con un nuevo dispositivo de prueba de adherencia con tres

puntas de extracción diferentes y su aplicación, para evaluar el aditivo WarmMix Asphalt (WMA) y base de cera de polietileno (PE). El método de prueba ABS modificado se utilizó para evaluar la pérdida de adherencia y cohesión en el asfalto, los resultados mostraron que, las muestras preparadas con el aditivo líquido PE exhibió una mejor resistencia a la humedad que las muestras de con las muestras WMA [47].

Se estudió el efecto de los aditivos líquidos a base de poliaminoamida y ácido folifosfórico sobre el decapado, la susceptibilidad a la humedad, la formación de surcos y la fatiga del hormigón asfáltico, utilizando la prueba de la resistencia a la tracción indirecta retenida después de la inmersión en agua utilizando el método de prueba de estabilidad Marshall. Los resultados demostraron que la introducción de aditivos de adhesión en base de poliaminoamida o ácido folifosfórico puede mejorar significativamente la resistencia al daño por agua de las mezclas de granito y asfalto [48].

Adicionalmente, se investigó la influencia de tres agentes líquidos anti-decapado (ASA) (denominados M1, T9 y LOF-6500) con tres dosis 0,25%, 0,50% y 0,75%, en el rendimiento de laboratorio de la mezcla de asfalto modificado con caucho granulado (CRMA), que fueron evaluadas por energía libre de superficie (SFE), resistencia a la tracción indirecta de congelación-descongelación (ITS), estabilidad Marshall. En los resultados se observa que la adición de ASA puede mejorar eficazmente la unión de adhesión entre el agregado y el aglutinante CRMA en condiciones secas o húmedas y mejora la resistencia la humedad de la mezcla con CRMA [49].

Se realizó un estudio sobre un agente anti-decapado para asfalto ecológico, y la predicción y evaluación del efecto de mejora de este agente sobre las propiedades cohesivas y adhesivas de una mezcla asfáltica basada en simulación de dinámica molecular. Se utilizó tereftalato de bis (2-hidroxietil) (BHET), mezclado con asfalto para construir un modelo asfalto / BHET por primera vez, cuyo resultado fue que la resistencia al daño por humedad de la mezcla de asfalto mejoró en un 42% [50].

3. CONCLUSIÓN

La revisión literaria realizada demostró que existen dos tipos de aditivos adherentes, uno producido de desechos naturales como ceniza de dátil, residuos de carburo de calcio, nano óxido de zinc, polibutileno, cal hidratada y polietileno. El otro, son aditivos líquidos químicos como WarmMix Asphalt, Zycosoil, ZycTherm, amina, y aditivos a base de copolímero polar y un copolímero de etileno, adicionados en la mezcla de asfalto en caliente. Según los trabajos

revisados, los aditivos adherentes, tienen un rendimiento excepcional, en cuanto a la resistencia al daño causado por la humedad. Los porcentajes de los aditivos adherentes varían de acuerdo al tipo de agregado que es utilizado en la mezcla en caliente.

En cuanto a los métodos utilizados para determinar la adherencia en el diseño de mezclas asfálticas en caliente, fueron: la prueba de arranque, adherencia Vialit, prueba de Lottman modificada y prueba de agua hirviendo. Es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos y los beneficios que se hallaron tras el uso de aditivos adherentes, están ligados al objetivo de cada estudio analizado.

4. REFERENCIAS

- [1] A. Modarres y M. Rahmanzadeh, «Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt,» *Construction and Building Materials*, vol. 66, p. 476–483, 2014
- [2] B. Sengoz y J. Oylumluoglu, «Utilization of recycled asphalt concrete with different warm mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen» *Construction and Building Materials*, vol. 45, p. 173–183, 2013
- [3] T. Yee y M. Hamzah, «Asphalt mixture workability and effects of long-term conditioning methods on moisture damage susceptibility and performance of warm mix asphalt» *Construction and Building Materials*, vol. 207, p. 316–328, 2019
- [4] L. Zhou , W. Huang, F. Xiao y Q. Lv, «Shear adhesion evaluation of various modified asphalt binders by an innovative testing method» *Construction and Building Materials*, vol. 183, p. 253–263, 2018
- [5] F. Moghadas, M. Arabani, G. Hamedi y A. Azarhoosh, «Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt» *Construction and Building Materials*, vol. 47, p. 1523–1527, 2013
- [6] L. Zhou, W. Huang, Y. Zhang, Q. Lv, C. Yan y Y. Jiao, «Evaluation of the adhesion and healing properties of modified asphalt binders» *Construction and Building Materials*, vol. 251, pp. 1-12, 2020
- [7] T. Valentová, J. Altman y J. Valentin, «Impact of asphalt ageing on the activity of adhesion promoters and the moisture susceptibility» *Transportation Research Procedia*, vol. 14, p. 768 – 777, 2016
- [8] J. Aguiar, A. Baldi, J. Salazar, J. Pacheco, L. Loria, F. Reyes y N. Cely, «Adhesive properties of asphalts and aggregates in tropical climates» *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 19, pp. 1-11, 2016
- [9] K. H. Al Helo, Z. I. Qasim y D. A. Khalaf, «Evaluation of moisture-induced damage of stone matrix asphalt mixture with polymer modified binder» *Materials Science and Engineering*, vol. 737, n° 8, pp. 738-747, 2020

- [10] A. Azarhoosh, F. Moghaddas y A. Khodaii, «Evaluation of the effect of nano-TiO₂ on the adhesion between aggregate and asphalt binder in hot mix asphalt» *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 22, n° 8, pp. 946-961, 2016
- [11] H. Gibreil y C. Feng, «Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt» *Construction and Building Materials*, vol. 142, pp. 101-108, 2014
- [12] G. Hamedia y S. Tahami, «The Effect of Using Anti-Stripping Additives on Moisture Damage of Hot Mix Asphalt» *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 81, pp. 90-97, 2017
- [13] L. Wang, A. Shen y J. Yao, «Effect of different coarse aggregate surface morphologies on cement emulsified asphalt adhesion» *Construction and Building Materials*, vol. 262, pp. 1-15, 2020
- [14] J. Zhu, K. Zhang, K. Liu y X. Shi, «Adhesion characteristics of graphene oxide modified asphalt unveiled by surface free energy and AFM-scanned micro-morphology» *Construction and Building Materials*, vol. 244, n° 1-12, 2020
- [15] S. Foroutan, M. Khabiri, A. Kavussi y M. Jalal , «Applying surface free energy method for evaluation of moisture damage in asphalt mixtures containing date seed ash» *Construction and Building Materials*, vol. 125, p. 408–416, 2016
- [16] A. Dulaimi, H. Shanbara, H. Jafer y M. Sadique, «An evaluation of the performance of hot mix asphalt containing calcium carbide residue as a filler» *Construction and Building Materials*, vol. 261, pp. 1-10, 2020
- [17] A. Akbari y A. Modarres, «Effect of clay and lime nano-additives on the freeze–thaw durability of hot mix asphalt» *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, n° 3, pp. 646-669, 2016
- [18] G. Hamedi, F. Nejad y K. Oveisi, «Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide» *Materials and Structures*, vol. 49, p. 1165–1174, 2015
- [19] G. Hamedia, A. Sahraeia y M. Esmaeeli, «Investigate the effect of using polymeric anti-stripping additives on moisture damage of hot mix asphalt» *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 22, pp. 1-15, 2018
- [20] S. Han, S. Dong, M. Liu, X. Han y Y. Liu, «Study on improvement of asphalt adhesion by hydrated lime based on surface free energy method» *Construction and Building Materials*, vol. 227, pp. 1-9, 2019
- [21] Y. Kim, I. Pinto y S. Park, «Experimental evaluation of anti-stripping additives in bituminous mixtures through multiple scale laboratory test results» *Construction and Building Materials*, vol. 29, p. 386–393, 2012

- [22] G. Hossein, K. Shamami y M. Pakenari, «Effect of ultra-high-molecular-weight polyethylene on the performance characteristics of hot mix asphalt» *Construction and Building Materials*, vol. 258, pp. 1-14, 2020
- [23] S. Rahmad, N. Yusoff, S. Rosyidi, K. Badri y I. Widyatmoko, «Effects of Rediset on the adhesion, stripping, thermal and surface morphologies of PG76 binder» *Construction and Building Materials*, vol. 241, pp. 1-12, 2020
- [24] M. Alam y P. Aggarwal, «Effectiveness of anti stripping agents on moisture susceptibility of bituminous mix» *Construction and Building Materials*, vol. 264, pp. 1-15, 2020
- [25] D. Park, W.-J. Seo, J. Kim y H. Vo, «Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixture using liquid anti-stripping agents» *Construction and Building Materials*, vol. 144, p. 399–405, 2017
- [26] A. Khodaii, V. Khailfeh, M. Dehand y G. Hamed, «Evaluating the effect of Zycosoil on moisture damage of hot mix asphalt using the surface energy method» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, n° 2, pp. 1-37, 2014
- [27] H. Behbahani, H. Ziari, N. Kamboozia, A. Khaki y S. Mirabdolazimi, «Evaluation of performance and moisture sensitivity of glasphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an anti-stripping additive» *Construction and Building Materials*, vol. 78, p. 60–68, 2015
- [28] M. Ameri, S. Kouchaki y H. Roshani, «Laboratory evaluation of the effect of nano-organosilane anti-stripping additive on the moisture susceptibility of HMA mixtures under freeze–thaw cycles» *Construction and Building Materials*, vol. 48, p. 1009–1016, 2013
- [29] G. Hamed, M. Asadi, F. Nejad y M. Esmaeeli, «Applying asphalt binder modifier in reducing moisture-induced damage of asphalt mixtures» *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 23, pp. 1-19, 2019.
- [30] M. Arabania y G. Hamed, «Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistrip additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt» *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 15, n° 1, pp. 66-78, 2014
- [31] S. Yang, F. Rachman y H. Susanto, «Effect of moisture in aggregate on adhesive properties of warm-mix asphalt» *Construction and Building Materials*, vol. 190, p. 1295–1307, 2018.
- [32] N. Awazhar, F. Khairuddin, S. Rahmad, S. Fadzil, A. Hend, N. Yusoff y K. Badri, «Engineering and leaching properties of asphalt binders modified with polyurethane and Cecabase additives for warm-mix asphalt application» *Construction and Building Materials*, vol. 238, pp. 1-11, 2020.

- [33] G. Hamedí y F. Nejad, «Evaluating the Effect of Mix Design and Thermodynamic Parameters on Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, n° 2, pp. 1-11, 2016.
- [34] H. Rahmani, G. Hamedí y H. Shirmohammadi, «Effect of Asphalt Binder Aging on Thermodynamic Parameters and Its Relationship with Moisture Sensitivity of Asphalt Mixes» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, n° 11, pp. 1-11, 2018.
- [35] S. Liu, S. Zhou y A. Peng, «Analysis of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt based on cohesion, adhesion, bond strength, and morphology» *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, pp. 1-12, 2020.
- [36] M. Nazirizad, A. Kavussi y A. Abdi, «Evaluation of the effects of anti-stripping agents on the performance of asphalt mixtures» *Construction and Building Materials*, vol. 84, p. 348–353, 2015.
- [37] H. Ziari y A. Moniri, «Laboratory evaluation of the effect of synthetic Polyolefin-glass fibers on performance properties of hot mix asphalt» *Construction and Building Materials*, vol. 213, p. 459–468, 2019.
- [38] J. Zhu, K. Zhang, K. Liu y X. Shi, «Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide» *Construction and Building Materials*, vol. 217, p. 273–282, 2019.
- [39] F. Nejad1, G. Hamedí y A. Azarhoosh, «The Use of Surface Free Energy Method to Evaluate the Mechanism of the Effect of Hydrate Lime on Moisture Damage of Hot Mix Asphalt» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, n° 8, pp. 1-32, 2013.
- [40] H. Jahanian, G. Shafabakhsh y H. Divandari, «Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite» *Construction and Building Materials*, vol. 131, p. 156–164, 2017.
- [41] M. Choi, Y. Kim, H. Kim y J. Lee, «Performance evaluation of the use of tire-derived fuel fly ash as mineral filler in hot mix asphalt concrete» *Journal of traffic and transportation engineering*, vol. 7, n° 2, pp. 249-258, 2019.
- [42] L. Klinsky, K. Kaloush, V. Faria y V. Bardini, «Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt» *Construction and Building Materials*, vol. 176, p. 747–752, 2018.
- [43] H. Haghshenas, A. Khodaii y M. Saleh, «Long term effectiveness of anti-stripping agents» *Construction and Building Materials*, vol. 76, p. 307–312, 2015.
- [44] C. Gorkem y S. Burak, «Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime» *Construction and Building Materials*, vol. 23, p. 2227–2236, 2009

- [45] H. Abandansari y A. Modarres , «Investigating effects of using nanomaterial on moisture susceptibility of hot-mix asphalt using mechanical and thermodynamic methods» *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 667-675, 2016.
- [46] A. Ameli, N. Norouzi, E. Khabbaz y R. Babagoli, «Influence of anti stripping agents on performance of binders and asphalt mixtures containing Crumb Rubber and Styrene-Butadiene-Rubber» *Construction and Building Materials*, vol. 261, pp. 1-16, 2020.
- [47] T. Ahmed, H. Lee y R. Williams, «Using a Modified Asphalt Bond Strength Test to Investigate the Properties of Asphalt Binders with Poly Ethylene Wax-based Warm Mix Asphalt Additive» *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 11, nº 1, pp. 28-37, 2017
- [48] V. Haritonovs, «Evaluation of polyaminoamide as a surfactant additive» *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 10, nº 2, p. 112–117, 2015
- [49] C. Zhu, J. Tang, H. Zhang y H. Duan, «Effect of liquid anti-stripping agents on moisture sensitivity of crumb rubber modified asphalt binders and mixtures» *Construction and Building Materials*, vol. 225, p. 112–119, 2019
- [50] H. Zhang, M. Huang, J. Hong, F. Lai y Y. Gao, «(2-hidroxietil) de tereftalato (BHET) terephthalate on adhesive properties of asphalt-aggregate interface» *Fuel*, vol. 285, pp. 1-14, 2020