



Efecto del envejecimiento de mezclas asfálticas en el ciclo de vida del pavimento desde el aspecto técnico y ambiental. Revisión del estado de conocimiento

Aging effect of asphalt mixtures in the pavement life cycle from the technical and environmental aspect. Review of the state of knowledge

Saieth Baudilio Chaves Pabón¹ Wendy Madeleyne Castellanos Guerrero²

Para citar este artículo: S. B. Chaves Pabón y W. M. Castellanos Guerrero, “Efecto del envejecimiento de mezclas asfálticas en el ciclo de vida del pavimento desde el aspecto técnico y ambiental. Revisión del estado de conocimiento”. *Revista Vínculos*, vol. 17, n°. 1, pp. 7-23, enero-junio. 2020. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.16227>

Recibido: 05-05-2020 / Aprobado: 25-05-2020

Resumen

Los pavimentos muestran cambios reológicos y químicos durante su ciclo de vida, principalmente a causa del envejecimiento a largo plazo (LTA); además de este fenómeno, pueden verse afectados por la influencia de los componentes de las mezclas asfálticas, presentando fallos como grietas, ahuellamiento, huecos, baches, entre otros, debido generalmente a variables externas (radiación solar, temperatura, humedad) e internas (materiales, aglomerantes, aditivos). Este artículo de revisión sistemática busca compilar investigaciones publicadas en los últimos cinco años, las cuales tienen como objetivo analizar múltiples condiciones de envejecimiento y determinar las variables más estudiadas por parte de los autores. El propósito del documento es ser un punto de inicio como parte del estado del arte para futuros proyectos de tipo experimental, a partir de los hallazgos que se han sintetizado.

Palabras clave: envejecimiento, durabilidad, LTA, mezclas asfálticas, pavimento.

Abstract

Pavements show rheological and chemical changes during their life cycle, mainly due to long-term aging (LTA), in addition to this phenomenon they can be affected by the influence of the components of the asphalt mixtures, presenting failures such as cracks, rutting, holes, potholes, among others, generally due to external (solar radiation, temperature, humidity) and internal (materials, binders, additives) variables. This systematic review article seeks to compile research published in the last 5 years that aims to analyze multiple aging conditions and determine the variables most studied by the authors. The purpose of the document is to be a starting point as part of the state of the art for future experimental projects, based on the findings that have been synthesized.

Keywords: aging, durability, LTA, asphalt mixtures, pavement.

- 1 Doctor en Ingeniería Geodésica y Cartografía. Docente tiempo completo de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Correo electrónico: saieth.chaves@unimilitar.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6950-9401>
- 2 Tecnólogo en Topografía. Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Correo electrónico: d7303309@unimilitar.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9756-1562>

1. Introducción

A través del tiempo, las mezclas asfálticas que componen el pavimento sufren cambios en su estructura física y química debido a múltiples factores externos e internos, estos ocasionan daños en las carreteras e influyen en su ciclo de vida, lo anterior se conoce como envejecimiento. En el diseño de pavimentos es de gran importancia comprender cómo se puede prevenir este fenómeno para garantizar una mayor durabilidad, considerando parámetros que se presentan con el paso del tiempo; es por esto que a partir de diferentes variables como el módulo complejo (G^*), ángulo de fase (δ), penetración (P), factor y resistencia al agrietamiento (CR) y al enrutamiento (RR), rigidez (S), punto de reblandecimiento (SP), viscosidad (V), ductilidad (D), módulo resiliente (MR), factor y resistencia de fatiga (FF), grado de rendimiento (PG), índice de carbonilo (Ic), índice de envejecimiento (IA), asfaltenos (A) y otras, se posibilita un análisis para determinar la influencia de la composición de las mezclas y el ambiente.

Con base en esta premisa, se exponen los hallazgos que se han recopilado en artículos investigativos a partir del 2015 y hasta el 2020, donde se analizan los comportamientos de las mezclas asfálticas con diferentes características en escenarios específicos.

2. Metodología

Con el fin de dar respuesta al objetivo de este proyecto, se realiza una matriz de datos con la información de 50 publicaciones respecto al efecto del envejecimiento de mezclas asfálticas en el ciclo de vida del pavimento. Se procede a depurar la información necesaria y solvente estableciendo las variables que son foco similar de observación en las investigaciones; de esta manera, se determinan las principales según su frecuencia de estudio, tal y como se ve en la Figura 1, permitiendo la creación de un artículo de revisión sistemática que condensa los hallazgos encontrados.

Los artículos objeto de estudio se recopilan a través de diferentes bases virtuales y repositorios digitales

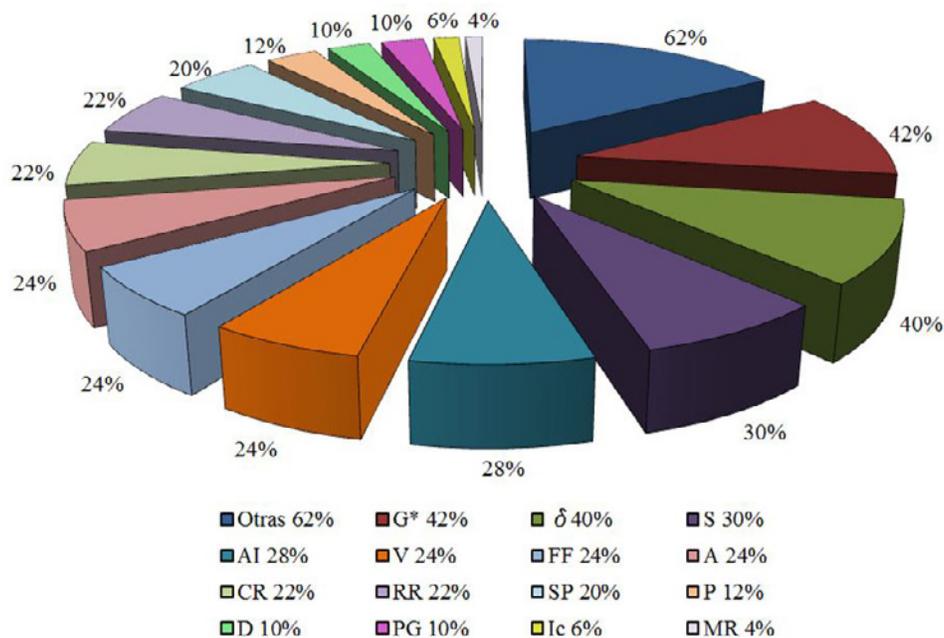


Figura 1. Principales variables de análisis

Fuente: elaboración propia.

de alto impacto a nivel internacional y nacional (Scopus, SciELO, Redalyc.org, IOPSCIENCE, Dialnet, ASCE Library American Society of Civil Engineers, TIB Leibniz Information Center for Science and Technology University Library, BASE Bielefeld Academic Search Engine, Hindawi), considerando cuatro aspectos básicos (técnico, económico, social y ambiental) en su selección.

3. Envejecimiento de mezclas asfálticas

Al analizar las mezclas asfálticas se utilizan ensayos de laboratorio para simular el efecto del envejecimiento bajo diferentes escenarios, considerando condiciones como temperatura, radiación UV y humedad, obteniendo hallazgos que permiten comprender y comparar su comportamiento para diseñar pavimentos que no solo resistan cargas de tránsito, sino que también soporten este efecto inevitable, el cual se presenta en dos etapas: a corto y a largo plazo.

3.1 Envejecimiento a corto plazo (STA)

El envejecimiento a corto plazo (STA, por sus siglas en inglés) se produce en cuestión de horas, ocurre desde el momento de fabricación, mezclado, transporte e instalación del pavimento. Uno de los principales factores de influencia es la temperatura, ya que esta produce la oxidación de los materiales; también la selección del tipo de mezcla, bien sea tibia (WMA) o caliente (HMA), conlleva a un mayor índice de envejecimiento a corto plazo, produciendo un aumento en la V. Para simular el STA en laboratorio, generalmente se maneja el método de ensayo RTFOT (siglas del inglés *Rolling Thin Film Oven Test*) bajo diferentes temperaturas que posteriormente pueden ser usadas para acondicionamientos a largo plazo.

En investigaciones llevadas a cabo por [1-3] se hacen simulaciones de STA con algunas variables, alcanzando resultados tanto reológicos como químicos

que demuestran la influencia del STA en asfaltos convencionales; lo anterior se define en la Tabla 1.

Los métodos de evaluación de prueba mencionados corresponden al reómetro de corte dinámico (DSR, por sus siglas en inglés); reómetro de haz de flexión (BBR, por sus siglas en inglés); cromatografía de permeación de gel (GPC, por sus siglas en inglés); análisis infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR, por sus siglas en inglés); viscosímetro rotacional de Brookfield (BRV, por sus siglas en inglés) y el análisis de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos (SARA). En [1] se evidencia que el G^* incrementa en 233 % respecto a sus valores iniciales a temperatura de 191 °C; por otro lado, el d presenta una disminución de hasta 31 % a esta misma temperatura. La FF bajo tensión de 5 % aumenta aproximadamente en 223 % a la más alta temperatura de análisis, mientras que la volatilización de los componentes más ligeros disminuye desde el inicio del envejecimiento. El IC no crece de manera exponencial y tampoco secuencial en todas las temperaturas, a 163 °C muestra un 30 %, pero a 191 °C su crecimiento es del 100 %.

En [2], las muestras sometidas a envejecimiento a 163 °C por 360 minutos exponen variación en G^* del 250 % en promedio; el d tiene un cambio de apenas 3 %, puesto que la temperatura se mantiene durante todo el ensayo. El módulo de S aumenta un 58 % al finalizar el tiempo; el cambio en la V de las muestras fue de aproximadamente un 76 %. Respecto a los resultados de SARA, saturados disminuyen en 9 %, aromáticos en 11 %, resinas sufre cambios tan mínimos que apenas son perceptibles, mientras el aumento en asfaltenos es de 133 %.

Por su parte, en los resultados de [3] existe un aumento del 120 % en V en el VG30, en el SP hay una variación de 13 % y la cantidad de A aumenta en 108 %; por el contrario, P disminuye en 17 % posterior al envejecimiento. Ahora bien, [4-5] realizan ensayos similares utilizando asfaltos no convencionales, es así que [4] aborda un enfoque ambiental

Tabla 1. Hallazgos por pruebas convencionales en especímenes regulares

Artículos	VARIABLES	MÉTODOS	Hallazgos en especímenes analizados	
[1]	T(°C) 163-191 t(min) 85 Especímenes: 8 Bitumen: A70 Mezcla: HMA Capa de análisis: subyacente	DSR BBR GPC FT-IR	Incremento: Módulo complejo Resistencia a la fatiga Factor enrutamiento Índice de carbonilo Oxidación	Disminución: Ángulo de fase Volatilización
[2]	T(°C) 163 t(min) 85, 180, 360 Especímenes: 5 Mezcla: HMA Capa de análisis: Subyacente	DSR BBR BRV SARA	Incremento: Módulo complejo Factor enrutamiento Módulo de rigidez Viscosidad Asfáltenos (SARA)	Disminución: Ángulo de fase Saturados (SARA) Aromáticos (SARA)
[3]	Especímenes: 28 Bitumen VG30 - VG40 Mezcla: HMA Capa de análisis: rodadura y subyacente	BRV SARA	Incremento: Viscosidad Punto de reblandecimiento Asfáltenos (SARA)	Disminución: Grado de penetración

Fuente: elaboración propia.

al estudiar mezclas HMA en capa de rodadura de pavimento de asfalto recuperado (RAP, por sus siglas en inglés) PG58-22 con aceite de cocina residual y aditivo de partículas de goma. Se envejecen por RTFOT a 165 °C durante 85 minutos, con pruebas de BBR, DSR, midiendo el PG de alta temperatura (HT, por sus siglas en inglés) y baja temperatura (LT, por sus siglas en inglés), humedad (M, por sus siglas en inglés) y pruebas de resistencia a la tracción indirecta (IDT, por sus siglas en inglés). Se descubre

que el aglutinante con aceite tiene un mejor PG a LT, la CR aumenta y la RR disminuye, la IDT húmeda y el parámetro de relación de húmedo a seco decrecen; caso contrario ocurre en estos dos últimos parámetros comparados con las mezclas con partículas de goma, para las cuales el PG más óptimo se presenta en HT. Se sugiere que es posible implementar mezclas con altos contenidos de RAP considerando el contenido adecuado de agentes de reciclaje.

Aditivos químicos comerciales en mezclas HMA y WMA son usados por [5] con betunes PG50-70, PG35-50 y PMB45/80-75 de capa de rodadura y subyacentes para envejecer especímenes por RTFOT; se evalúan la P y el SP. Se halla una P inferior y una mayor dureza del betún, estos cambios se dan en todas las muestras con y sin aditivos. Se evidencia un incremento en la V; en los que contienen aditivos derivados de aminas grasas se provoca un crecimiento del SP, por lo que se concluye que con el conocimiento de las propiedades y el comportamiento del betún se puede predecir y prevenir el STA.

En [6] se analiza la influencia de la rugosidad de los agregados y la temperatura del STA en HMA con ligantes AC30 de capas subyacentes. Se realizan simulaciones a 143°, 163° y 173°C, durante 85 minutos; posteriormente, se mide el SP, P, D y la viscosidad cinemática en agregados vírgenes y envejecidos. Se denota que la superficie de energía libre del aglutinante baja, esto implica que la energía de cohesión exhibe una disminución en HT. Hay un aumento en la humectabilidad y el parámetro de fuerza de unión; se amplía la viscosidad cinemática, lo que genera una S superior.

Para estimar la reducción de la vida útil de las mezclas de asfalto posterior al STA, en [7] se analizan capas de rodadura en WMA (PG64-22) a temperaturas entre 120 °C y 140 °C, además HMA entre 160 °C y 185 °C; también se mide el envejecimiento con GPC y se determina el PG a través del DSR. El resultado indica que el STA a HT induce a más IA, el cambio de temperatura en las mezclas HMA da un crecimiento considerable; no obstante, se observa un nivel menor en WMA, hallando ventajas en esta tecnología. Por lo general, los ensayos en las investigaciones de STA comparten métodos similares para variables de orden físico y químico, analizadas desde múltiples enfoques como el técnico y el ambiental, aunque en estas la única variable de estudio es la temperatura. Para determinar el efecto del envejecimiento en el ciclo de vida del pavimento, se hace necesario indagar en otras variables de

influencia del envejecimiento a largo plazo, sus causas y consecuencias.

3.2 Envejecimiento a largo plazo (LTA)

El envejecimiento a largo plazo (LTA, por sus siglas en inglés) se da durante todo el tiempo en el que el pavimento se encuentra en servicio, ello debido a los factores ambientales y las cargas que soportan. Esta etapa está relacionada con un incremento en la V y la S de las mezclas. La mayoría de los experimentos efectúan comparaciones de las propiedades del asfalto original y envejecido a través de simulaciones, el método de preferencia para realizarlas es con la cámara de envejecimiento a presión PAV (siglas del inglés *Pressure Aging Vessel*), la cual implica un envejecimiento inicial con RTFOT y, posteriormente, la exposición de la muestra a HT en un ambiente presurizado, consiguiendo efectos de envejecimiento de hasta veinte años.

En relación con lo anterior, [8] compara las propiedades de los aglutinantes (PEN70-100) en mezclas WMA de capas de rodadura y subyacentes en las dos etapas del envejecimiento, con RTFOT a temperaturas de 123 °C, 143 °C y 163 °C para STA y luego con PAV a 100 °C durante veinte horas. Se ejecuta prueba DSR que calcula P y SP, además de FT-IR y parámetros viscoelásticos lineales como el G^* y el d. Dentro de los resultados se aprecia una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la P después de PAV; todas las condiciones RTFOT tienen P promedio reducido a más de la mitad, demostrando que PAV es supremamente severo en comparación con RTFOT. Para el SP se presenta un aumento en ambas etapas, esto ocurre también con el valor del G^* , mientras tanto, para el d, parece inducir una reducción significativa después del PAV.

Partiendo de las pruebas ya mencionadas de envejecimiento (RTFOT y PAV), [9] incluye en su proyecto experimental la prueba de envejecimiento simple (SAT), trabajando en HMA con aglutinante virgen

(A-SK70#) y realizando pruebas DSR para determinar el rendimiento de fatiga del asfalto y la vida útil de falla (correspondiente al valor del d) en todas las capas del pavimento. Bajo la simulación STA y LTA, el G^* crece y el d disminuye. En comparación con el asfalto original, la sensibilidad a la temperatura del asfalto se reduce posterior a los métodos de envejecimiento, con mayor nivel se mejora la resistencia a la deformación en HT, la vida de fatiga decrece y la capacidad de relajación en LT empeora. El STA por debajo de 150 °C durante 154 minutos en la prueba SAT equivale a 85 minutos en RTFOT; el LTA por debajo de 95 °C durante cinco días en SAT corresponde a veinte horas en PAV; el STA de 150 °C durante 150 minutos y el LTA de 95 °C durante seis días en SAT son similares a quince años en el campo.

La combinación entre ambas metodologías tradicionales igualmente puede verse en [4], donde se evalúan mezclas por medio de STA y LTA, descubriendo que los aglutinantes con aceite de cocina residual envejecen más rápido que los vírgenes a largo plazo. Su PG en LT después del primer ciclo PAV es el mismo que el aglutinante virgen, las tasas de envejecimiento durante estos ciclos caen con el contenido de aceite, indicando que la selección del contenido óptimo de aceite basado en PG en HT produce un rendimiento apropiado a largo plazo.

Con el fin de examinar la oxidación en las capas del pavimento en mezclas HMA expuestas al sol en su vida útil *in situ*, [10-11] estudian asfaltos (PG60-80) modificados con polímeros y SBS (estireno-butadieno-estireno), envejeciéndolas mediante UV, [10] usa también RTFOT+PAV. Se realizan pruebas con DSR y resistencia a la fractura (FTT), muestran un aumento en G^* , RR y FF, además disminución en d . Ahora bien, en [10] existe un crecimiento en la V , se revela que el asfalto se endurece gradualmente a medida que el envejecimiento se acrecienta de RTFOT a UV y luego a PAV, el efecto de PAV en estos índices es el más obvio entre los tres métodos. Los asfaltos modificados han sido tendencia en la construcción de pavimentos, es por ello que se ha amplificado el análisis de

sus componentes y su influencia en su ciclo de vida, como lo demuestran ambas investigaciones.

La influencia de la M es un factor determinante en el ciclo de vida del pavimento y se puede apreciar en la publicación plasmada por [12], donde trabaja con dos aglutinantes HMA (PEN60-70) y dos WMA (uno de cada mezcla es modificado con polímeros PMBPG76-22), estos se envejecen con UV, calor, oxígeno y M, en una cámara de intemperismo QUV de doble ciclo con duración entre 2 y 108 días (ocho horas para ciclo diurno y cuatro para nocturno) para un análisis en capas de rodadura. Los prototipos se envejecen previamente utilizando el mismo protocolo, pero sin M; además, la aplicación de esta se realiza durante el ciclo nocturno. Se efectúa un análisis de microscopía de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés) que exhibe que todos los especímenes siguen este proceso de degradación en presencia de las condiciones mencionadas, aunque para M es más severa; la evolución de la microestructura con M no sigue una tendencia clara con el tiempo de envejecimiento y no es consistente para todos los ligantes. Se determina que la combinación de UV y M en lugar de un solo parámetro aumenta la fragilidad, el agrietamiento y la pérdida de material de los aglutinantes de asfalto durante el envejecimiento.

Un estudio similar es hecho por [13] con núcleos de rodadura de siete proyectos de campo WMA (PG70-22, PG76-28, PG64-28, PG58-34, PG58-28, PG64-22 y PG58-28); además, se recolectan aglutinantes de asfalto, agregados y materiales reciclados RAP/RAS (tejas de asfalto recuperado) para fabricar muestras compactadas en laboratorio, envejeciéndolas a 60 °C durante dos semanas y a 85 °C de tres a cinco días. Son sometidas a pruebas de seguimiento con la rueda de Hamburgo (HWTT, por sus siglas en inglés), midiendo MR, RR y M. Los protocolos de LTA por tres días o dos semanas son equivalentes a siete meses en servicio en climas cálidos y doce meses en fríos; cinco días es representativo a doce meses en cálido y veintitrés meses en frío. Se evidencia mayor S en la mezcla después del LTA en WMA;

también hay un incremento en la S del MR después del LTA para las mezclas de control, en comparación con las que contenían material reciclado RAP/RAS.

En Suiza, [14] investiga mezclas (PG50-70) WMA de laboratorio y otras de una planta mezcladora HMA como referencia. Se hace LTA a 85 °C; posteriormente, se sumergen en agua fría a 20 °C durante seis horas, consiguiendo el efecto de la precipitación. La deformación permanente y el índice de enrutamiento se evalúan con la prueba HWTT, se obtiene en WMA una alta profundidad de ahuellamiento después del envejecimiento, mientras que en la HMA es inferior. El comportamiento de fatiga es el mismo en ambas mezclas, lo que genera un acrecentamiento de la vida útil de fatiga para las mezclas envejecidas.

Las inclusiones de caucho (CRMG-60), polímeros (PMB-40) y aditivos en mezclas (PG64-16, VG-10, VG30) envejecidas con RTFOT+PAV son valoradas por [15] y [16] respectivamente, analizando las variaciones en IA. Se encuentra que en las mezclas de rodadura HMA de [15] y de capas subyacentes WMA de [16] hay una pérdida en la susceptibilidad al envejecimiento, haciendo que sean más resistentes; en cantidad de A medida con FT-IR nuevamente se comparten resultados, ya que hay un incremento de este parámetro; otros hallazgos son la mejora en CR por fatiga, en S y las menores magnitudes de V.

De acuerdo con las conclusiones que manifiesta [17], el envejecimiento no necesariamente reduce la vida de fatiga en los pavimentos de asfalto, la consecuencia puede ser positiva o negativa dependiendo de las condiciones de carga, la geometría de las capas y las propiedades de la mezcla. Lo anterior es comprobado a través de pruebas en un concreto asfáltico denso HMA (AC50-70 PG64-22), envejecido a 85 °C por dos días, 135 °C por dos días y 85 °C por 45 días, hallando fatiga y S. Se percibe que G^* aumenta y, por otro lado, se observa que las curvas de integridad del material versus la acumulación de daño presentan valores mayores

de integridad al evolucionar el envejecimiento. Se produce un material más resistente; sin embargo, después de cargas excesivas eventualmente habrá agrietamientos y rupturas de pavimentos.

Un caso de envejecimiento de aglutinante con impacto negativo en la CR por fatiga de las mezclas HMA de asfaltos es expuesto por [18], donde es notable dicho impacto en la capa de rodadura a mayor temperatura. Se realizan pruebas en hormigón de baja penetración (B20-25, AC-16UA, AC16A) usando RTFOT+PAV a 90 °C durante ocho días, analizándolo con DSR y midiendo su rendimiento mecánico con el método UGR-FACT (dispositivo para la evaluación del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas). La prueba DSR revela que el G^* del aglutinante se amplifica y existe una disminución en el d (haciéndolo duro y quebradizo). La susceptibilidad a los cambios de temperatura es menor y menos resistente al agrietamiento por fatiga, lo que concluye que la reología del aglutinante tiene una relación directa con el rendimiento mecánico a largo plazo, así como el contenido de A y el tamaño de las microestructuras.

La interrelación entre las propiedades reológicas y químicas de muestras de aglutinantes de asfaltos hechas en laboratorio y recuperadas *in situ* son objeto de estudio por [19-22], los cuales obtienen resultados similares. Las condiciones de ensayo se presentan en la Tabla 2.

Se encuentra que en todos los ensayos el G^* aumenta al igual que la cantidad de A y el IA; sin embargo, se presenta una disminución en d y D en los especímenes, principalmente los de 36 años. En [19], el índice de plasticidad (PI, por sus siglas en inglés) sube sobre el 100% después de PAV, el PI promedio del aglutinante no envejecido crece un 72% después del RTFOT y un 183% después del RTFOT+PAV.

Para [20-22] existe un aumento del 30% en SP y V es más alto, para las muestras de laboratorio aumenta

Tabla 2. Condiciones de ensayo de los artículos [19-22]

	[19]	[20]	[21]	[22]
Mezcla	HMA	HMA	HMA	HMA
Bitumen	PEN60-70	PEN60-70 PEN80-100	PEN80-100	PEN60-70 PEN80-100
Capa	Rodadura y subyacente	Rodadura	Rodadura y subyacente	Rodadura y subyacente
RTFOT	163 °C/85 min	-	-	-
PAV	100 °C/20 h	100 °C/20 h	90 °C/20, 40, 60, 80 h	-
In situ	-	7 y 36 años	1, 3, 6 y 9 años	7 y 36 años
Pruebas	AFM, DSR, GPC	DSR, FT-IR	DSR, FT-IR	DSR, GPC, FT-IR

Fuente: elaboración propia.

un 363 % y en las *in situ* hasta 513 %. En [21] el IC incrementa en un 235 % con el tiempo tanto en laboratorio como en núcleos de campo, siendo más evidente en las capas de rodadura. Con la evaluación de estos ensayos se determina que los aglutinantes se comportan como un sólido, produciendo mayor dureza y deterioro con el envejecimiento. De igual manera, [19] propone el método de AFM como una posibilidad prometedora para estudiar las propiedades del rendimiento del asfalto a nivel microscópico, las cuales se ven afectadas también por factores ambientales como la radiación UV mencionada por [10].

En relación con lo anterior, [23] emplea cuatro grupos de mezclas asfálticas HMA (SUPERPAVE PG58-22 y AC80-100) de la capa de rodadura, el primero corresponde a mezcla de control no envejecida; el segundo, muestras hechas en laboratorio envejecidas en una cámara UV durante períodos de 100, 200 y 500 horas; el tercero, mezcla fabricada con concreto asfáltico envejecido por PAV por períodos de 5, 20 y 50 horas; por último, prototipos extraídos de campo después de 1.5, 3, 5, 8 y 11 años de construcción. A todas las mencionadas, se les realizan pruebas de módulo dinámico, resistencia a la deformación permanente y fatiga trapezoidal. Después del envejecimiento en la cámara los niveles de deformación son más bajos que las muestras de

control; las mezclas de campo experimentan mayor RR con la exposición ambiental; la vida de fatiga disminuye con la edad debido a que se presenta una reducción en su resistencia por incrementos de la S; las pruebas de fatiga para mezclas envejecidas durante 500 horas en la cámara son equivalentes a 1.5 años *in situ*, por lo tanto, 700 y 1075 horas de exposición representan 3 y 5 años respectivamente. Para todas las mezclas asfálticas se observa un G* alto, también una elevada cantidad de A y resinas, lo que significa que los asfaltos se vuelven dúctiles y el material se ablanda.

Los efectos en las propiedades químicas y reológicas por envejecimiento UV son considerables, por eso [24] con FT-IR y SARA analiza a nivel químico 2 cementos asfálticos HMA (SUPERPAVE AC60-70 y AC80-100) de rodadura, envejecidos tanto por PAV durante 20 y 50 horas como por UV durante 1000 horas. En SARA se exhiben cantidades altas de asfaltenos y menos saturados, aromáticos y resinas; la relación de envejecimiento por exposición en la cámara es superior que en PAV, lo que significa que UV a largo plazo es supremamente oxidativo; por lo tanto, para simular apropiadamente las condiciones que experimenta el asfalto a lo largo de su vida útil, los estudios futuros deben considerar las

condiciones de temperatura, presión, humedad o radiación máxima.

Para analizar la fotooxidación en rodadura de tres tipos de aglutinantes de asfalto extraídos de pavimentos RAP y uno de asfalto fresco HMA, [25] realiza un envejecimiento con UV a 45 °C durante 100 horas, además de una exposición a rayos UV/humedad/condensación por cuatro horas. Posteriormente, durante quince minutos hace un rociado de agua y, por último, condensa a 40 °C las muestras por tres horas y 45 minutos. El IA de las muestras se calcula con la medición del porcentaje de peso de oxígeno (WPO, por sus siglas en inglés) que usa espectroscopia de rayos X de energía dispersiva, detectando un acrecentamiento en el WPO en los aglutinantes de tratamiento de UV continuo y, por tanto, en la tasa de envejecimiento fotooxidativo, lo que lleva a determinar que el envejecimiento UV/humedad/condensación es mucho más lento que el continuo UV, indicando que la condensación y la humedad reducen efectivamente la tasa de envejecimiento UV.

Mezclas recicladas HMA de varias capas de pavimento rejuvenecidas (PG67-22) con cinco agentes rejuvenecedores: destilado natural de petróleo (PND), biorrejuvenecedor a base de aceite, mezcla de ácidos orgánicos tricíclicos (BOF), extracto de disolvente destilado parafínico pesado (HPE) y una emulsión a base de agua de crudo nafténico sin cera con un contenido de residuos del 60% (CWE); se envejecen en LTA con PAV por [26-27]. Se encuentra que las mezclas con CWE y HPE envejecen más lento que con PND y BOF, aunque todas presentan susceptibilidad al agrietamiento y S por envejecimiento. Con la presencia de CWE mediante BBR se descubre una mejora en la CR de la mezcla, lo que indica que la selección del tipo de rejuvenecedor incide en el comportamiento del pavimento en su ciclo de vida.

Al igual que [26-27], [28] realiza un estudio de HMA con tres rejuvenecedores (dos de base biológica y

uno de aceite de motor reciclado destilado) agregados al aglutinante de asfalto (PMB25-55/55), envejecidos con RTFOT a 163 °C durante 3.5 horas. Las propiedades de estos son medidas con DSR, microscopía óptica y AFM. A nivel mecánico, la P del aglutinante disminuye, el SP y la V aumentan; los aglutinantes de base biológica tienen un alto impacto en la blandura del material envejecido, en general, todos los rejuvenecedores pueden restaurar la fluidez y alcanzar valores comparables con el aglutinante virgen. El G* es mayor y el d menor; la S del betún se amplifica y las propiedades del material cambian de blando/viscoso a duro/elástico, esto puede implicar una fragilización rápida del pavimento de asfalto y conducir a la falla del material. A nivel químico, en las pruebas de AFM se evidencia que los componentes ligeros se evaporan, mientras que otros se polimerizan.

Siguiendo con el efecto de rejuvenecedores en mezclas HMA (PG64-16) RAP (5.4%), [29] evalúa ensayos con diferentes tipos de rejuvenecedores orgánicos y a base de aceite, al igual que [26-28]. Se analiza el módulo de elasticidad, la fluencia dinámica, la fatiga por tracción indirecta y la fractura de temperatura intermedia en STA y LTA. Para preparar las mezclas, los agregados vírgenes y el material RAP se mantienen a 175 °C durante dos y dieciséis horas, las muestras STA a 135 °C durante cuatro horas y las LTA a 85 °C durante 120 horas. Los resultados para el módulo elástico de todas las mezclas recicladas son superiores que en el espécimen virgen.

En mezclas rejuvenecidas a base de aceite el módulo es más representativo que en otras mezclas después del LTA, mientras que en las mezclas que contienen rejuvenecedor orgánico no cambia; la resistencia a la tracción y la RR en las mezclas con RAP es mucho mayor; las rejuvenecidas a base de aceite tienen una mejora en resistencia confrontadas con las de base orgánica; en STA este progreso es atribuido a las mezclas a base de aceite, en LTA las mezclas rejuvenecidas a base orgánica se destacan.

La vida por fatiga de las mezclas RAP disminuye severamente en contraste con la mezcla de control, todo esto permite ver que las mezclas recicladas se ven altamente afectadas por el tipo de rejuvenecedor que se utiliza, conclusión compartida con [27] junto a otros autores con el mismo objetivo.

En el caso de aglutinantes de asfaltos modificados con polímeros, [30] presenta una comparación entre cuatro mezclas *in situ* (PG70-28, PG70-22 RAP10%, PG58-28 RAP17%, PG76-22 RAP15%), tres de ellas con polímeros y expuestas a tráfico durante cuatro años; de igual manera, obtienen muestras después del proceso constructivo en diferentes zonas climáticas (WMA y HMA) envejeciéndolas por RTFOT a 163 °C por 85 minutos y PAV a 100 °C durante veinte horas. Posteriormente, se tratan de nuevo con PAV a 85 °C durante dos, cinco y siete días. Se determina que los PG en HT de los aglutinantes con RTFOT son más bajos que el PG de aquellos extraídos justo antes de la construcción del pavimento, por lo tanto, este envejecimiento es insuficiente para simular STA, aunque PAV durante dos días sí es apropiado para ser comparado con los aglutinantes recuperados al momento de la construcción. Asimismo, los resultados de PG después de siete días poseen una buena correlación con los aglutinantes recuperados de dos a tres años, concluyendo que el aglutinante modificado con polímeros responde de manera diferente al no modificado, cuando se aplican diferentes parámetros para evaluar el envejecimiento.

En cuanto a comparaciones de mezclas regulares y modificadas, [31] realiza un estudio de envejecimiento de asfaltos HMA y WMA (PG50-70) con aditivos (agua natural y sintética), determinando los IA con base en la relación de dureza, empleando valores de IDT en mezclas con agregados de basalto y piedra caliza envejecidas en STA a 135 °C durante cuatro horas, las de LTA se acondicionan a 85 °C durante 124 horas después de STA. Se encuentra una reducción de la temperatura por el uso de la zeolita natural superior a la zeolita sintética. Se

demuestra que las zeolitas mejoran características de rendimiento de las mezclas bituminosas como la resistencia a la carga repetitiva y la capacidad de deformación permanente.

En el ciclo de vida de las capas de pavimento, [32-33] hacen un análisis de la influencia de los agregados. Utiliza [32] doce mezclas asfálticas HMA con tres tipos de agregados diferentes (dos fluviales y uno de cantera) y cuatro tipos de asfaltos (AC-24, AC-14, PMB65 y HMB14), estas se envejecen con un horno de aire forzado a 80 °C durante 48 y 192 horas. Por otro lado, [33] evalúa el comportamiento de betunes (PG50-70) y masillas con cargas minerales (piedra caliza y granito), fabrican dos especímenes de asfalto y se envejecen mediante RTFOT+PAV a 100 °C durante veinticinco horas. Se ejecutan pruebas FENIX, SARA, DSR, fluencia, recuperación de esfuerzo múltiple, deformación permanente y resistencia a la fatiga, obteniendo como resultado concordante entre uno y otro que el IA disminuye en todas las mezclas, la de agregados fluviales y granito son las que presentan mejores propiedades; se revela un aumento en S, menos notorio en las masillas. En cuanto a descubrimientos específicos, [33] expone menor P y mayor SP, principalmente en el relleno de granito; la reducción del d es proporcional al contenido de A del betún no envejecido. Por su parte, [32] descubre que el daño por M ocurre en todas las mezclas. La resistencia a la tracción tiene un desempeño sobresaliente en agregados de cantera incrementándose entre 1.2 y 2.5 veces.

Los efectos de M y UV son medidos por [34-35] en mezclas de rodadura HMA convencionales (B50-70) y modificadas con polímeros (PMB45/80-65 y PG64-28), envejecidas con LTA a 85 °C entre cinco y siete días. Adicionalmente, [35] realiza simulaciones con ciclos de radiación UV y pulverización de agua y dos acondicionamientos con una cámara ambiental para aplicar ciclos intensos de radiación solar seca y húmeda, mientras [34] inicia una inmersión en agua de las muestras por 72 horas a 40 °C. Los cambios en las propiedades reológicas

y químicas son calculados con DSR, FT-IR y prueba FENIX (únicamente usada por [34]). Se presentan los mismos hallazgos en S, donde, bajo condiciones húmedas, alcanza valores más altos; de igual modo, CR adquiere una mejora en los especímenes con M por el comportamiento de caída de d. En [35] se evidencia un crecimiento en el IC y sulfóxido y en [34] una reducción en la tenacidad de sus muestras, lo que las hace más frágiles y susceptibles al agrietamiento.

Las consecuencias de la temperatura pueden ser mayores que el envejecimiento, lo anterior es analizado en [36], donde se usan aglomerantes convencionales (PG50-70), aglutinantes modificados comúnmente utilizados (PMB40/80-85), y modificados en el laboratorio en mezclas HMA de todas las capas del pavimento. El primer conjunto de aglutinantes se mantiene virgen y el segundo se envejece a 85 °C durante cinco días. Las mezclas se evalúan con prueba de flexión semicircular (SCB, por sus siglas en inglés) para la resistencia a la propagación de grietas y la prueba de flexión de tres puntos de vigas sin muescas (3PB) para la elaboración de un diagrama de tensión/deformación que determina la energía de fractura. La LT provoca la contracción de las capas de asfalto, es así que las tensiones de tracción crecen, cuando la tensión alcanza la resistencia a la tracción hay grietas en la superficie, el agua puede infiltrarse en el pavimento y la capacidad de soporte se reduce. Para características más óptimas a LT se requiere un SP alto y un G* menor, cuanto mayor es el índice de P, mejor es la resistencia a la fractura en ambas mezclas.

En cuanto a las investigaciones de [37] enfocadas en LT, se crean mezclas HMA para capas de rodadura con dos tipos de aglutinantes, uno convencional (PG50-70) y otro modificado con polímeros (PMB45/80- 65); estas se tratan con LTA a 85 °C por siete días y se analizan a través del método EBADE (ensayo de barrido de deformaciones) para el cálculo del comportamiento de fatiga y el efecto del envejecimiento a -5 °C, 5 °C y 20 °C.

Con la disminución de la temperatura a 20 °C el módulo tiende a decrecer, cae más rápido para 5 °C y a -5 °C es aún más frágil. El criterio de falla de fatiga se establece con la curva de densidad de energía disipada, el espécimen con betún modificado presenta valores superiores. Es evidente que a LT las mezclas tienen un comportamiento de rigidez tal que el G* no puede incrementar y, por tanto, su condición (envejecida o no envejecida) apenas influye en su vida de fatiga. La S de la mezcla a LT es tan alta que su comportamiento es similar independientemente del tipo de betún empleado.

La influencia de la temperatura ha sido objeto de estudio en múltiples ocasiones; por su parte, [38] analiza la extensión de la vida útil del pavimento de asfalto a través de la reducción de la temperatura, estudiando el uso de un sello de viruta reforzado geosintético (GRCS) que contribuye a este fin, aumentando la reflectividad, sirviendo como aislamiento, alargando la vida útil y disminuyendo la entrada de la lluvia para evitar la aparición de daños por M. Las pruebas realizadas se llevan a cabo en una sección de pavimento HMA, donde se instala el GRCS, se aplica un aglutinante sobre la superficie y colocan una capa de geotextil no tejida, seguido de la aplicación de una emulsión catiónica de fraguado rápido modificada con polímeros y extendiendo un sello de agregado fino. La sección es equipada con una estación meteorológica y termopares obteniendo variables climáticas durante un año (septiembre de 2013 a agosto de 2014) en un intervalo de 30 minutos. Las temperaturas altas y medias en la sección con GRCS son más bajas que en las no modificadas al subir la temperatura del aire, también la efectividad; no parece tener ningún cambio durante los meses de invierno. Debido a esto, se estima que el uso de GRCS puede extender la vida útil, especialmente en regiones donde la HT del aire es cercana a 40 °C o por encima.

En Eslovaquia, bajo estándares europeos en pruebas de mezclas de asfalto HMA a temperaturas de 20 °C o superiores, [39] investiga el impacto de HT que

se simulan en laboratorio en mezclas de hormigón asfáltico con aglutinante (AC-11) y un betún modificado con polímeros (PMB25/55-65) y aditivos. A través del método de flexión de cuatro puntos con una muestra de viga prismática se mide la durabilidad mediante pruebas de fatiga y de energía disipada, las cuales indican que el comportamiento del material es más viscoso que elástico, lo que se evidencia con la observación del d . Desde el punto de vista de la falla, la HT influye positivamente en la vida útil de la mezcla por fatiga.

En muestras *in situ* HMA existen varios estudios, algunos de ellos por [40-41] enfocados al envejecimiento de asfalto en el estado de Qatar (condiciones climáticas cálidas). Se hace en [40] una recolección de 36 núcleos *in situ* (PEN40-50, PEN60-70, PG64-10, PMB60/70 y PG76/22) con edades de cinco años, evalúan viscosidad rotacional, G^* , d , pruebas de fluencia y recuperación de tensión múltiple (MSCR). Las secciones de la capa superior revelan aumento de la V a lo largo de la trayectoria de la berma en comparación con la de la rueda a causa de la oxidación. Debido al envejecimiento, el aglutinante se vuelve más rígido y resistente a la formación de surcos; el PG incrementa para los aglutinantes recuperados de la sección de capa de desgaste, lo que lo hace susceptible al agrietamiento por fatiga. En las pruebas MSCR, en la trayectoria de la rueda hay una menor RR, la de la berma envejece más en comparación y, por lo tanto, aumenta su RR. La velocidad de oxidación disminuye con la profundidad del pavimento, lo que produce menos envejecimiento y rigidez en la capa subyacente. Con base en los resultados que se obtienen en [40], [41] concluye que la duración del envejecimiento debe extenderse hasta 45 y 75 días en la región del golfo, puesto que la comparación del aglutinante envejecido con PAV y el envejecido en campo señala que se requiere una duración prolongada para simular LTA en el campo en Qatar, ello debido a las HT de la región.

En diferentes ubicaciones de Estados Unidos, [42] toma muestras de los núcleos de la capa superficial

del pavimento HMA y WMA en la construcción, se ejecutan pruebas de tensión directa de caracterización viscoelástica (VEC-DT), DSR y FT-IR para determinar el G^* y el módulo de relajación, además del gradiente de S . En la prueba de S se evidencia que el G^* es mayor en la superficie y existe un nivel superior en la oxidación y una reducción en la CR, lo que permite deducir que la superficie del pavimento envejece más rápido que el fondo, debido a la exposición a condiciones climáticas.

En Colombia, se realiza una evaluación de los parámetros mecánicos de una mezcla asfáltica HMA (AC60-70 y AC80-100) bajo las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C., [43] indica los cambios en el MR, la deformación permanente y la resistencia a la fatiga, fabricando cinco briquetas de capa subyacente del pavimento por cada porcentaje de asfalto entre 4.5 % y 6.5 % y exponiéndolas durante 48 meses. Cada tres meses a estas briquetas se les ejecutan ensayos de MR y resistencia a la deformación permanente, se encuentra que en las mezclas con altos contenidos de asfalto se presenta un crecimiento considerable en el MR (2.17 veces), esto en S genera una ampliación aproximada de diez veces en la vida de fatiga producto de su envejecimiento. Por otro lado, aquellas mezclas con menor contenido de asfaltos exponen valores menores en este módulo durante los primeros cinco meses de exposición, posiblemente por una microfisuración térmica, a partir del sexto mes empieza a subir alcanzando un 38 %.

En pavimentos con edades entre ocho y diez años, [44-45] analizan el efecto de los fallos en el envejecimiento. En [44] se evalúan asfaltos HMA (AC-13 y AC-16) modificados con SBS por SARA, FT-IR, IDT y pruebas de fatiga en tres secciones, (carril de conducción, trayectoria de la rueda y berma); por su parte, [45] trabaja con muestras HMA y WMA de tres autopistas, examinando las propiedades de fatiga residual con pruebas de esfuerzo de tracción indirecta (ITS, por sus siglas en inglés) e IDT. Dentro de los resultados de fatiga para ambas investigaciones

no existe una correlación entre sus propiedades y las fallas del pavimento; en los valores de ITS de la capa superficial se aprecia que sin importar el fallo siempre son altos, por esto, las autopistas de flujo de tráfico diario constante revelan una vida útil de fatiga inferior, mientras que las de tiempo de servicio prolongado presentan mayor sensibilidad al esfuerzo de carga.

Hallazgos propios de [44] indican, por medio de SARA, que en el aglutinante de la berma existe un elevado contenido de saturados y aromáticos. En la trayectoria de la rueda hay un incremento en el porcentaje de resina y menor presencia de saturados, lo que ilustra que la carga de tráfico es una influencia positiva de degradación. FT-IR permite ver que esta carga es una contribución positiva en la degradación de los enlaces de carbonilo produciendo oxidación; los especímenes de las trayectorias de la rueda poseen el G^* más grande y el d más pequeño, contrario a la de las bermas.

Por lo que se refiere a investigaciones enfocadas al estudio de variables particulares y métodos dirigidos al hallazgo de las mismas, [46] encamina el desarrollo de su proyecto a la evaluación preliminar de las características del proceso de calentamiento en mezclas recicladas HMA (PG50-70 y AC-16), ello mediante microondas o calentadores radiantes infrarrojos para determinar la influencia de cada método en el fenómeno de envejecimiento de las carpetas asfálticas y las propiedades del material. Para el caso de [47] y sus observaciones en pavimentos sostenibles, se considera el efecto de los vacíos de aire en el concreto asfáltico (SUPERPAVE PG76-22) y cómo pueden afectar en el lapso del envejecimiento.

En [48] se pretende diseñar un método teórico con base en ecuaciones para evaluar el envejecimiento del pavimento asfáltico de mezclas HMA modificadas con SBS (AC-13C), lo anterior considerando pruebas de resistencia con diferentes tasas de carga de prueba de fatiga. Utilizando un enfoque analítico,

[49] cuantifica el envejecimiento del aglutinante de asfalto de petróleo puro (B10-20, B20-30, B35-50, B50-70) a partir de las distribuciones aparentes de peso molecular utilizando el d , a través de un proceso llamado "método delta". Por último, [50] en ligantes HMA AC50-70 y PG64-22, por medio del modelo de daño continuo viscoelástico (S-VECD) representa el comportamiento del daño por fatiga, teniendo como objetivo demostrar que el envejecimiento produce materiales menos tolerantes al daño.

4. Conclusiones

La recopilación bibliográfica sistemática de antecedentes acerca del comportamiento de las mezclas asfálticas con diferentes características en escenarios específicos permitió comprender el efecto del envejecimiento y su afectación en el ciclo de vida del pavimento; del mismo modo, se evidenció que, a pesar de las nuevas metodologías propuestas, los métodos tradicionales siguen siendo eficientes y, por tanto, continúan vigentes en la mayoría de las investigaciones en lo que respecta a la evaluación y comparación de los parámetros reológicos y químicos.

Las consideraciones generales de los ensayos fueron similares, pues en estos la temperatura siempre se tomó en cuenta; sin embargo, también se incluyeron otras condiciones importantes como la radiación solar, la humedad y la presencia de elementos adicionales como los rejuvenecedores y los aditivos, comprobando su influencia en los cambios fisicoquímicos de los pavimentos y permitiendo interpretar la causa del aumento o la disminución de los factores de análisis que componen las variables. De lo anterior se concluye que al momento de realizar simulaciones de envejecimiento se requiere tener en cuenta los elementos externos e internos para un estudio adecuado de la durabilidad y su capacidad de soporte frente a los daños a los que estará expuesta la carpeta asfáltica. El aporte realizado por medio de este documento es base importante en la línea de investigación de pavimentos, siendo una

contribución apreciable para un estado del arte de un proyecto de tipo experimental que se enmarque en el territorio colombiano, también puede ser referencia de nuevas investigaciones que sean enfocadas al análisis de la influencia directa de los aglutinantes en las variaciones de los parámetros que inciden en el envejecimiento de las mezclas y el ciclo de vida del pavimento.

Agradecimientos

Los autores dan crédito a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada por el soporte financiero dado para la realización del presente producto de investigación a través del proyecto “Efecto de la granulometría sobre la durabilidad de mezclas de concreto asfáltico”, con código INV-DIS-2965 y vigencia 2019.

Referencias

- [1] W. Ye, W. Jiang, P. Li, D. Yuan, J. Shan y J. Xiao, “Analysis of mechanism and time-temperature equivalent effects of asphalt binder in short-term Agings”, *Construction and Building Materials*, vol. 215, pp. 823-838, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.197>
- [2] P. Li, Z. Ding, L. X. Ma y Z. G. Feng, “Analysis of viscous flow properties of asphalt in aging process”, *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 631-638, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.136>
- [3] Y. S. Kumbarger y K. P. Biligiri, “Understanding Aging Behaviour of Conventional Asphalt Binders used in India”, *Transportation Research Procedia*, vol. 17, pp. 282-290, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.094>
- [4] H. Majidifard, N. Tabatabaee y W. Buttler, “Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil”, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 6, n.º 4, pp. 396-406, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.11.002>
- [5] E. Remisova y M. Holy, “Properties of Bituminous Binders Exposed to Ageing Process”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 471, n.º 3, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/3/032030>
- [6] V. Mishra y D. Singh, “Impact of short-term aging temperatures of asphalt binder and aggregate roughness levels on bond strength”, *Construction and Building Materials*, vol. 218, pp. 295-307, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.125>
- [7] S. Kim, S. H. Lee, O. Kwon, J. Y. Han, Y. S. Kim y K. W. Kim, “Estimation of service-life reduction of asphalt pavement due to short-term ageing measured by GPC from asphalt mixture”, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 17, n.º 1, pp. 153-167, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2015.1066704>
- [8] B. Hofko, A. C. Falchettob, J. Grenfellc, L. Huberd, X. Lue, L. Porotf, L. D. Poulidakosg y Z. You, “Effect of short-term ageing temperature on bitumen properties”, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, n.º 2, pp. 108-117, 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2017.1304268>
- [9] S. H. Zhuang, Y. Zhang, X. Cheng y W. Ren, “Changes in rheological properties during asphalt aging”, *Petroleum Science and Technology*, vol. 37, n.º 13, pp. 1539-1547, 2019. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1587454>
- [10] H. Zhang, Z. Chen, G. Xu y C. Shi, “Evaluation of aging behaviors of asphalt binders through different rheological indices”, *Fuel*, vol. 221, pp. 78-88, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.087>
- [11] M. Luo, “Study of asphalt performance impact with ultraviolet aging”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 231, n.º 1, 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/231/1/012107>
- [12] I. Menapace y E. Masad, “The influence of moisture on the evolution of the microstructure of asphalt binders with aging”, *Road Materials and*

- Pavement Design*, vol. 21, n.º 2, 2018. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1491882>
- [13] F. Yina, E. Arámbula-Mercado, A. E. Martina, D. Newcombb y N. Tran, “Long-term ageing of asphalt mixtures”, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, n.º 1, pp. 2-27, 2017. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1266739>
- [14] C. Raab, I. Camargo, M. N. Partl, “Ageing and performance of warm mix asphalt pavements”, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 4, n.º 4, pp. 388-394, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2017.07.002>
- [15] Y. S. Kumbargerri y K. P. Biligiri, “Rational Performance Indicators to Evaluate Asphalt Materials’ Aging Characteristics”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, n.º 12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001681](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001681)
- [16] A. Behl y S. Chandra, “Aging Characteristics of Warm-Mix Asphalt Binders”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, n.º 10, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002013](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002013)
- [17] L. F. Babadopulos, J. B. Soares, J. L. S. Ferreira y L. A. H. Do Nascimento, “Evaluation of Fatigue Behavior of Aged Asphalt Mixtures Using the Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model”, en *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements*, vol. 13, pp. 9-15, 2016. https://doi.org/10.1007/978-94-024-0867-6_2
- [18] F. Moreno, M. Sol, G. García y M. C. Rubio, “Understanding the Effects of Ageing and Temperature on the Fatigue Cracking Resistance of Bituminous Mixtures”, en *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements*, vol. 13, pp. 229-234, 2016. https://doi.org/10.1007/978-94-024-0867-6_32
- [19] P. E. Y. Wang, K. Zhao, C. Glover, L. Chen, Y. Wen, D. Chong y C. Hu, “Effects of aging on the properties of asphalt at the nanoscale”, *Construction and Building Materials*, vol. 80, pp. 244-254, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.059>
- [20] C. H. Higuera, X. V. Camargo y E. A. Suárez, “Effect of Aging on the Properties of Asphalt and Asphalt Mixtures”, *Ingeniería y Universidad*, vol. 19, n.º 2, pp. 335- . <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-2.eapa>
- [21] J. Lin, J. Hong, J. Liu y S. Wu, “Investigation on physical and chemical parameters to predict long-term aging of asphalt binder”, *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 753-759. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.121>
- [22] Y. Wang, Y. Wen, K. Zhao, D. Chong y J. Wei, “Connections between the Rheological and Chemical Properties of Long-Term Aged Asphalt Binders”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, n.º 9, 2015, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001214)
- [23] W. D. Fernández, A. C. Vides, S. P. Roncallo, F. Bautista, H. A. Rondón y F. A. Reyes, “Effects of environmental aging and ultra violet radiation on asphalt mixture dynamic modulus, permanent deformation and fatigue life”, *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia*, n.º 80, pp. 89-. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n80a10>
- [24] W. D. Fernández, H. A. Rondón y F. A. Reyes, “Effects of aging by UV radiation on chemical and rheological properties of asphalt cements extracted from two Hot Mixed Asphalts”, *Revista ION*, vol. 30, n.º 2, pp. 7-16, 2017. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n2-2017001>
- [25] X. He, D. Hochstein, Q. Ge, A. W. Ali, F. Chen y H. Yin, “Accelerated aging of asphalt by UV Photo-Oxidation considering moisture and condensation Effects”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, n.º 04017261, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002120](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002120)
- [26] M. Mohammadafzali, H. Ali, J. A. Musselman, G. A. Sholar y A. Massahi1, “The Effect of Aging on the Cracking Resistance of Recycled Asphalt”, *Hindawi Advances in Civil Engineering*, vol. 2017, no. 1, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7240462>

- [27] M. Mohammadafzali, H. Ali, J. A. Musselman, G. A. Sholar, S. Kim y T. Nash, "Long-Term Aging of Recycled Asphalt Binders: A Laboratory Evaluation Based on Performance Grade Tests", en *Airfield and Highway Pavements*, junio 2015. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784479216.055>
- [28] D. Ganter, T. Mielke, M. Maier y D. C. Lupascu, "Bitumen rheology and the impact of rejuvenators", *Construction and Building Materials*, vol. 222, pp. 414-423, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.177>
- [29] H. Ziari, A. Moniri, P. Bahri y Y. Saghaf, "The effect of rejuvenators on the aging resistance of recycled asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, vol. 224, pp. 89-98, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.181>
- [30] W. Zhang, A. Bahadori, S. Shen, S. Wu, B. Muhunthan y L. Mohammad, "Comparison of Laboratory and Field Asphalt Aging for Polymer-Modified and Warm-Mix Asphalt Binders", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, n.º 7, 2018. <http://dx.doi.org/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002354>
- [31] A. Topal y P. A. Dokandari, "Laboratory Comparison of Aging Characteristics of Warm Mix Asphalts Involving Natural and Synthetic Water Containing Additives", *Materials Research*, vol. 17, n.º 5, pp. 1129-1136, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.228813>
- [32] G. Valdes, A. Calabi-Floody y E. Sanchez, "Evaluation of the durability of asphalt mixtures depending on the physical properties of aggregates", *Revista de la Construcción*, vol. 16, n.º 1, pp. 92-103, 2017. <http://dx.doi.org/10.7764/RDLC.16.1.92>
- [33] C. Carl, P. Lopes, M. da Costa, G. Canon, S. Leischner y R. Micaelo, "Comparative study of the effect of long-term ageing on the behaviour of bitumen and mastics with mineral fillers", *Construction and Building Materials*, vol. 225, pp. 76-89, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.150>
- [34] T. López, R. Miró y F. Pérez, "Effect of ageing and water action on the cracking resistance of asphalt mixtures", en *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements*, vol. 13, pp. 89-95, 2016. https://doi.org/10.1007/978-94-024-0867-6_13
- [35] Y. A. Alamdary, S. Singh y H. Baaj, "Laboratory simulation of the impact of solar radiation and moisture on long-term age conditioning of asphalt mixes", *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, n.º 2, pp. 521-. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1587496>
- [36] P. Vacková, J. Valentin y L. Benešová, "Comparison of influence of ageing on low-temperature characteristics of asphalt mixtures", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 236, 2017. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/236/1/012018>
- [37] T. López y R. Miró, "Ageing and temperature effect on the fatigue performance of bituminous mixtures", *Materiales de Construcción*, vol. 67, n.º 327, 2017. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2017.04216>
- [38] R. B. Mallick, D. Singh y A. Veeraragavan, "Extension of Asphalt Pavement Life by Reduction of Temperature", *Transportation in Developing Economies*, vol. 2, n.º 7, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40890-016-0013-x>
- [39] J. Mandula y T. Olexa, "High temperature impact on fatigue life of asphalt mixture in Slovakia", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 236, 2017. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/236/1/012023>
- [40] O. Sirin, D. K. Paul, E. Kassem y M. Ohiduzzaman, "Effect of aging on asphalt binders in the state of Qatar: A case study", *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, n.º 4, pp. 165-184, 2017. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389094>
- [41] O. Sirin, M. Ohiduzzaman, E. Kassem y D. K. Paul, "Comprehensive evaluation of long-term ageing of asphalt mixtures in hot climatic condition", *Road Materials and Pavement Design*,

- vol. 21, n.º 4, 2018. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1531777>
- [42] F. Yin, A. Epps, E. Arámbula-Mercado y D. Newcomb, "Characterization of non-uniform field aging in asphalt pavements", *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 607-615, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.144>
- [43] H. A. Rondón y F. A. Reyes, "Evaluación de los parámetros mecánicos de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C.", *Revista ingeniería de Construcción*, vol. 27, n.º 1, pp. 57- <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732012000100004>
- [44] S. Wu, Z. Zhao, Y. Xiao, M. Yi, Z. Chen y M. Li, "Evaluation of mechanical properties and aging index of 10-year field aged asphalt materials", *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 607-615, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.102>
- [45] P. Cui, Y. Xiao, M. Fang, Z. Chen, M. Yi y M. Li, "Residual Fatigue Properties of Asphalt Pavement after Long-Term Field Service", *Materials*, vol. 11, n.º 6, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11060892>
- [46] G. Flores, J. Gallego, F. Giuliani y F. Autelitano, "Aging of asphalt binder in hot pavement rehabilitation", *Construction and Building Materials*, vol. 187, pp. 214-219, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.216>
- [47] M. R. Islam, S. Ahmad y R. A. Tarefder, "Determining the Effect of Aging on the Air Void of Asphalt Concrete for Sustainable Pavement", *Procedia Engineering*, vol. 145, pp. 1044-1055, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.135>
- [48] [48] L. Song-tao, L. Zhaohui y X. Juan, "Fatigue performance of aging asphalt mixtures", *Polimery*, vol. 60, n.º 2, pp. 126-131, 2015. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.126>
- [49] [49] K. Krolkral, S. Haddadi y E. Chailleux, "Quantification of asphalt binder ageing from apparent molecular weight distributions using a new approximated analytical approach of the phase angle", *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, n.º 4, . <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1536610>
- [50] [50] L. F. de A. L. Babadopulos, J. L. S. Ferreira, J. B. Soares, L. A. H. do Nascimento y V. T. F. Castelo, "Aging-Effect Incorporation into the Fatigue-Damage Modeling of Asphalt Mixtures Using the S-VECD Model", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, n.º 12, 2016. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001676](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001676)

