

Revisión sistemática del comportamiento convencional y reológico del biocompuesto asfalto-biomasas producidas

Systematic review of the conventional and rheological behavior of the asphalt-biomass biocomposite produced

Sócrates Pedro Muñoz-Pérez ^{1a}, María Magaly Morante-Santamaría ^{1b}, Helmer Félix Huamán-Manayay ^{1c}

¹ Universidad Señor de Sipán, Perú. Orcid: 0000-0003-3182-8735 ^a, 0000-0002-0866-0033 ^b, 0000-0001-8161-6445 ^c.
Correos electrónicos: msocrates@crece.uss.edu.pe ^a, msantamariam@crece.uss.edu.pe ^b,
hmanayayhelmerf@crece.uss.edu.pe ^c

Recibido: 25 diciembre, 2021. Aceptado: 21 septiembre, 2022. Versión final: 28 febrero, 2023.

Resumen

La ingeniería de pavimentos, busca con ahínco materiales no petrolíficos como sustituyentes/mejoradores del asfalto. La producción de bioasfalto con biomasa es la técnica más usual con beneficios económicos, sociales y medioambientales. Este documento tiene como objetivo realizar una revisión literaria del mejoramiento del asfalto con biomasa en subproductos de biocarbón o bioaceite. Se efectuó una revisión de 80 artículos científicos, los cuales estudiaron las propiedades convencionales y reológicas del asfalto con porcentajes óptimos de adición de biomodificadores, considerándolos como nuevas tecnologías en las construcciones viales. Los resultados muestran que la dosis y tipo del biomaterial influye mucho como modificador, dado que el rendimiento del bioasfalto a base de biomasa garantiza reacciones positivas con una mínima adición de 1% de aceite de palma hasta 100% de ceniza de madera como máximo. En conclusión, a mayor dosis de biomodificador a altas temperaturas mayor es la mejora en la viscosidad, estabilidad, grado de penetración, punto de reblandecimiento, resistencia a la tracción indirecta, módulo de resistencia, resistencia a la deformación, resistencia a la fatiga, resistencia al deslizamiento y resistencia a la humedad del asfalto, además de tener mejores condiciones de envejecimiento oxidativo, pues generalmente el ligante asfáltico es compatible con la mayoría de los biomateriales, siendo viable como fuente de energía renovable, sostenible y de calidad.

Palabras clave: asfalto; bioasfalto; biomasa; propiedades convencionales; propiedades reológicas.

Abstract

In pavement engineering, non-petroleum based materials are strongly sought as substitutes/improvers for asphalt. Bioasphalt production with biomass is the most common technique with economic, social and environmental benefits. This paper aims to conduct a literature review of asphalt upgrading with biomass in biochar or bio-oil by-products. A review of 80 scientific articles was carried out, which studied the conventional and rheological properties of asphalt with optimal percentages of biomodifiers addition, considering them as new technologies in road constructions. The

results show that the dose and type of the biomaterial has a great influence as a modifier, since the performance of biomass-based bioasphalt guarantees positive reactions with a minimum addition of 1% palm oil up to 100% wood ash as a maximum. In conclusion, the higher the dose of biomodifier at high temperatures, the greater the improvement in viscosity, stability, penetration degree, softening point, indirect tensile strength, modulus of resistance, deformation resistance, fatigue resistance, skid resistance and moisture resistance of asphalt, besides having better oxidative aging conditions, since the asphalt binder is generally compatible with most biomaterials, being viable as a source of renewable, sustainable and quality energy.

Keywords: asphalt; bioasphalt; biomass; conventional properties; rheological properties.

1. Introducción

La construcción de carreteras es uno de los importantes activos de un país, facilitando el acceso a los servicios esenciales para la humanidad [1], en los Estados Unidos existe una demanda progresiva de nuevas carreteras, así como de ampliación, mantenimiento y rehabilitación de las que ya existen [2], sin embargo, la construcción vial es una de las actividades que produce mayor contaminación, debido a la creciente demanda de materias primas fósiles [3].

Sabemos que las mezclas asfálticas constan del árido, ligante asfáltico y relleno, siendo el ligante como producto del refinado del petróleo [4] el material clave en el sector de la pavimentación flexible en las carreteras en Europa [5] [6], lo que conlleva al aumento de su coste [7], depreciación de las reservas de asfalto [8] con el agotamiento de los recursos petrolíferos [9] [10], también su envejecimiento oxidativo es otra disyuntiva [11] en las características termomecánicas del ligante, causando el aumento de la rigidez, fragilidad, disminución de ductibilidad [12] y el agrietamiento prematuro del pavimento [13], además de la alta presencia de huecos, baja resistencia inicial y la mejora de la misma a paso lento son los desafíos de las mezclas en frío [14] [15], como consecuencias de un mal diseño de carreteras [16], así mismo su deterioro con el pasar del tiempo; siendo el primero en la preparación de la mezcla asfáltica, y el segundo durante la vida útil de la estructura [17].

Por otro lado, el creciente volumen de tráfico y el aumento de las cargas axiales admisibles requiere la mejora de los materiales de pavimentación [18].

En los últimos tiempos, la industria de la construcción se enfrenta a la inestabilidad de las reservas energéticas, sabiendo que el espacio de las carreteras asciende en todo el mundo [19], por ello muchos investigadores para hacer frente a esta problemática se plantean cuestiones como: "¿Existirá materia alternativa al betún de petróleo?" y "¿cuáles son los efectos de beneficio?" [20], y así aliviar la dependencia de petróleo con alternativas al ligante asfáltico [21], con gran potencial de rendimiento en las mezclas, dentro de ellos, los subproductos obtenidos de

la combustión de biomasa como las cenizas volantes [22] y los bioaceites. Otro proceso de transformación de la biomasa es la pirólisis, obteniendo bioaceite, biocarbón y gases [23].

Otro tema de suma importancia es la eliminación y uso de la biomasa [24] como residuos de la botánica o criaturas no aptos para la alimentación [25], se ha evidenciado que la UE reutiliza el 90% de las cenizas volantes, India y China cerca del 60%, y Estados Unidos el 50% [26] por tanto, estos restos sólidos suelen vertirse en los tiraderos [27], y su producción continua afecta a la expansión de los mismos e incluso supone una grave amenaza a nuestra salud [28], debido a su facilidad de lixiviación y a la emisión de gases liberando compuestos peligrosos [29] y metales como el cadmio, el cobalto, el cromo, el níquel y el plomo, impactando cáusticamente en el medio ambiente [30], por el contrario su ventaja es tener poco carbono incorporado, además de ser un excelente recurso renovable, como sustitución parcial del asfalto bituminoso en la ingeniería de pavimentos o como aditivo mejorador de su rendimiento [31].

Actualmente las centrales eléctricas sostenidas con biomasa en Portugal generan de 100,000.00 a 200,000.00 Ton. de materia pulverizada [32], las estadísticas indicaron que la obtención anual de restos de madera es de 85,000,000 Ton. en China reutilizando solo el 10% de ello y 19,600,000,000 Ton. de estiércol de cerdo en todo el mundo, pero la razón de uso es menor al 50%, provocando graves daños medioambientales [33].

En Indonesia, el bioasfalto es una alternativa de betún que se obtiene a partir de materiales no fósiles. [34], he allí el interés por explorar metodologías innovadoras a fin de reducir costos y emisiones dañinas vinculadas con la construcción vial [35], promoviendo la sostenibilidad de estructuras duraderas [36] y las nuevas técnicas de producción de asfalto paralelo al respeto por el medio ambiente. El objetivo de este documento es revisar las investigaciones más recientes sobre las propiedades convencionales y reológicas del aglutinante asfáltico mejorado con el uso de biomasa como energía verde, limpia y renovable, evaluando su potencial y viabilidad hacia una pavimentación sostenible y de calidad.

2. Materiales y métodos

La revisión se elaboró empleando 80 artículos indexados: 44 en la base de datos Scopus, 10 en ScienceDirect, 1 en Scielo, 12 en IOPscience, 9 en Proquest y 4 en EBSCOhost, donde se encontró, 1 artículo en el año 2013, 2 artículos en el año 2014, 4 en el año 2015, 4 en el año 2016, 8 en el año 2017, 9 en el año 2018, 7 en el año 2019, 17 en el año 2020, 27 en el año 2021 y 1 en el año 2022. En la búsqueda de los artículos se usaron las siguientes palabras clave: asphalt and biomass, "fly ash" and "asphalt", asphalt and waste biomasses, biomass in asphalt y biomass in asphalt in the construction en base de datos Scopus, asphalt and biomass y asphalt and fly ash en ScienceDirect, fly ash as bitumen en Scielo, asphalt and biomass, "fly ash" and "asphalt", fly ash bitumen, "bio-oil" and "asphalt" y asphalt mixture with fly ash en IOPscience, asphalts AND residual biomasses en Proquest y asphalt and biomass en EBSCOhost.

Para un mejor detalle en la [tabla 1](#), se muestra los artículos distribuidos según la base de datos y el año de publicación.

En la [tabla 2](#), se detalla los artículos distribuidos según los diferentes criterios de búsqueda y los seleccionados por cada base de datos.

3. Resultados análisis de la investigación

3.1. Identificación del asfalto (bitumen, betún o ligante asfáltico)

El asfalto es el aglutinante bituminoso compuesto por asfaltenos y maleatos, de textura pegajosa, color negro o marrón oscura y muy viscosa [37], es el material base la industria de la construcción gracias a su propiedad de impermeabilización [38], sin embargo, la escases de petróleo crudo conduce a explorar nuevas aplicaciones

para la producción de este material de origen biológico o como mejorador de sus propiedades ingenieriles [39].

El ligante asfáltico es un material altamente visco elástico, que contribuye consistencia y define su comportamiento frente al tiempo, la temperatura y la tasa de carga [40] [41], ayudando en la adhesión de las partículas de los áridos [42], es también un material termoplástico [43] ya que se convierte en sólido a mayores temperaturas y líquido cuando esta disminuye [44], pues la calidad, la naturaleza y su compleja estructura química influye grandemente en la durabilidad de los pavimentos asfálticos [45].

Generalmente hay dos formas de construir carreteras de asfalto con un mejor rendimiento, la principal es establecer un diseño de mezcla apropiado, consecuentemente del uso de un adecuado e innovador material en dicha mezcla [46].

Existen asfaltos de emulsión, asfalto líquido y asfalto de cemento, siendo el último determinado según el grado de penetración como 40/50, 60/70, 80/100, 120/150 y 200/300 [44], y el más usado para la fabricación de mezclas asfálticas es el asfalto PEN 60/70 [47].

En la [tabla 3](#), se observa las características generales del asfalto con grado de penetración 60/70.

3.2. Modificación del asfalto

La modificación del asfalto consiste en el mejoramiento de sus características y propiedades, haciéndolo apto para su aplicación en la ingeniería vial, endureciendo el ligante a altas temperaturas para reducir los problemas de ahuecamiento, ablandarlos para mejorar las tolerancias de deformación a bajas temperaturas, y mejorar la resistencia a la fatiga, entre otras [48].

Tabla 1. Artículos distribuidos según las fuentes y años de publicación

Fuente	Año de publicación										Total
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
SCOPUS	-	2	2	2	3	6	6	9	13	1	44
ScienceDirect	-	-	-	2	-	-	-	3	5	-	10
Scielo	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1
IOPscience	-	-	-	-	3	1	1	3	4	-	12
Proquest	-	-	-	-	1	1	-	2	5	-	9
EBSCOhost	1	-	2	-	1	-	-	-	-	-	4
Total	1	2	4	4	8	9	7	17	27	1	80

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Artículos distribuidos según los diferentes criterios de búsqueda

Fuente	Palabras clave	Sin filtro	Año de búsqueda	Filtro de búsqueda	Con filtro	Seleccionados
SCOPUS	asphalt and biomass	195	2017-2021	Subjet area: Engineering / Environmental Science / Materials Science / Chemical Engineering Document type: Article / Review	73	10
	"fly ash" and "asphalt"	614	2015-2021	Subjet area: Engineering / Environmental Science / Materials Science / Chemical Engineering / Earth and Planetary Sciences / Energy Document type: Article / Review	195	3
	asphalt and waste biomasses	62	2014-2021	S/F	62	17
	biomass in asphalt	182	2017-2021	Subjet area: Engineering Document type: Article	28	9
	biomass in asphalt in the construction	30	2015-2022	Subjet area: Engineering Document type: Article	9	5
ScienceDirect	asphalt and biomass	4213	2016-2021	Article type: Review articles / Research articles Subjet areas: Environmental Science / Energy / Engineering / Material Science / Agricultural and Biological Sciences / Chemical Engineering	1296	6
	asphalt and fly ash	4111	2016-2021	Article type: Review articles / Research articles Subjet areas: Environmental Science / Engineering / Material Science / Chemical Engineering	1329	4
Scielo	fly ash as bitumen	1	2018	S/F	1	1
IOPscience	asphalt and biomass	22	2017-2021	Date published: The last 5 years / Publication type: Articles	10	3
	"fly ash" and "asphalt"	21			11	4
	fly ash bitumen	15	2017-2021	S/F	15	1
	"bio-oil" and "asphalt"	5			5	1
	asphalt mixture with fly ash	12			12	3
Proquest	asphalts AND residual biomasses	2785	2017-2021	Limitar a: Artículos evaluados por expertos Tipo de Fuente: Revistas científicas Año de publicación: Últimos 5 años	378	9
EBSCOhost	asphalt and biomass	163	2013-2021	S/F	120	4

Tabla 3. Características generales del asfalto pen 60/70

Ensayo	Método	Unidad	Valor
			60/70
Penetración (25°C, 100g, 5s)	ASTM D-5	0.1 mm	62.5
Índice de penetración	NLT 181/88		-0.7
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	°C	52.5
Viscosidad absoluta (60 °C)	ASTM D-4402	Poises	1750
Gravedad específica	AASHTO T 228-04		1.012
Viscosidad a 135 °C	AASHTO T-316	Pa-s	0.6
Ductibilidad (25 °C, 5cm/min)	ASTM D-113	Cm	>105
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0.47
Penetración (25°C, 100g, 5s) en porcentaje de penetración original	ASTM D-5	%	72
Incremento del punto de ablandamiento	ASTM D-6-95	°C	5

Fuente: [47].

3.3. Modificación del asfalto con Biomasa

La biomasa es la materia orgánica producto de los vegetales, animales, microorganismos [49], residuos agroindustriales y urbanos, representando el 10%-14% como industria suministradora anual de energía en el mundo equivalente a 1.25 millones de toneladas de petróleo [50] y las grandes industrias lo emplean para producir bioasfalto [51].

3.3.1. Modificación del asfalto con biocarbón o cenizas volantes

El carbón es el combustible fósil que existe con abundancia en todo el mundo, aproximadamente en un billón de toneladas, por lo que su combustión es el proceso más importante para la generación de energía, cuando se quema en las centrales térmicas, genera residuos en pequeñas partículas que son transportadas por los gases de combustión, denominados cenizas volantes y se recogen mediante sistemas de filtrado [30].

Las cenizas volantes son un subproducto mineral de la ignición del carbón [52], [53], partículas muy finas, se percibe pulverizado y de forma esférica, compacta o hueca, con un diámetro máximo de 75 µm y de color variable. Su estructura química es primordialmente sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), óxido férrico (Fe₂O₃) y óxido cálcico (CaO) [54], y su combinación entre ellos clasifican a las cenizas volantes en dos tipos. Si contienen más del 70% de estos tres compuestos se define como ceniza clase F, mientras que el contenido entre el 50-70% define a la clase C, en la que el contenido de CaO es mayor [30], por otro lado, las cenizas volantes se componen por el 85% de Si y Al en peso y el 15% de óxidos menores como el K, Fe y Ca [55].

El incorporar estos polvos residuales como mejoradores de la mezcla asfáltica, es la técnica más usual en los tiempos modernos [45], reduciendo el calor de hidratación debido a que es un producto cementicio generador de calor [55] y como aditivo de relleno cubre los vacíos entre los áridos finos y gruesos mejorando la densidad de la mezcla [44], la estabilidad y la rigidez, la resistencia a la rodadura y al empuje de la mezcla asfáltica [45].

Las cenizas estudiadas para el mejoramiento del asfalto, tienen diferente composición química, como se observa en la tabla 4.

3.3.2. Modificación del asfalto con bioaceite

Los bioaceites son líquidos con capacidad de combustión, de compuestos orgánicos como ácido, alcohol, aldehído, cetona, fenol, furano y otras, constituidas por elementos químicos de C, H y O [59]. Resultan de la conversión termoquímica de la biomasa [60], mediante la pirólisis, descomponiendo la biomasa seca a pocos segundos, sin aire y a temperaturas de 500 °C - 1000 °C, y tasas de calentamiento de 1000 °C/min. obteniendo aceite apto para su aplicación directa como bioaglomerante alternativo [20], siendo los más usados los restos del aceite de motor, aceite de palma, aceite de soja, estiércol del cerdo, aceite natural y restos de uva [61].

Cuando el bioaceite se agrega al ligante convencional en menos del 10% es para el modificador, del 10%-75% para el diluyente y 75%-100% para el ligante alternativo [62].

Para reducir la viscosidad a bajas temperaturas se utilizan aditivos químicos sin embargo por primera vez en Colombia se usó el aceite crudo de palma como aditivo

reductor de viscosidad del asfalto, por ende, es el primer productor de aceite de palma en América Latina y el cuarto a nivel mundial [63].

Los bioaceites proporcionan mayor rigidez a los aglutinantes ante el envejecimiento, aportando resistencia a las roderas, el asfalto modificado con este material suele sacrificar cierta rigidez para evitar el agrietamiento térmico [64].

Los bioaceites más utilizadas para el mejoramiento del asfalto, tienen diferente composición química, como se detalla en la tabla 5.

Existen evidencias de la construcción con biomasa, la empresa Shell construyó dos carreteras en Noruega con bioasfalto de aceite vegetal y Christopher Williams una carretera para bicicletas con bioasfalto a base de roble en Iowa de 3,048 m. de ancho y con 5% de bioasfalto, sin embargo, no se conoce el estado de uso. Zhou construyó un pavimento de prueba con un 10% de bioasfalto de aceite vegetal en China. Colas y Shell aplicaron con éxito el bioasfalto a base de linaza y colza, mostrándose en buenas condiciones [59] [67].

4. Discusión

Las propiedades mejoradas del asfalto en las mezclas fueron la viscosidad, la estabilidad, el grado de penetración y el punto de reblandecimiento como propiedades convencionales, la resistencia a la tracción indirecta, la resistencia a las roderas o deformación permanente [56], resistencia a la fatiga, resistencia al deslizamiento, resistencia a la humedad y la prueba de módulo de resistencia [68] como propiedades reológicas, además de sus propiedades beneficiosas con el ambiente.

4.1. Propiedades convencionales

4.1.1. Viscosidad

La evaluación al asfalto PEN 60/70, adicionando a la mezcla 0.3%, 0.5%, 0.7% y 1% de aceite crudo de palma en peso de asfalto a 60 °C, 80 °C, 100 °C, 135 °C y 150 °C en la muestra “dismaprim” y “palmagro”, redujo la viscosidad del asfalto base de 199,000, 18,563, 3,220, 371 y 186 cP a 122,600, 9,968, 1,654, 178 y 101 cP con 1% del aditivo en la muestra “dismaprim” respectivamente a cada una de las temperaturas, logrando un 52% de mejora a 135° C [63].

Tabla 4. Composición química de las cenizas estudiadas en porcentajes

Compuesto	Valor(%)						
	Ceniza volante	Ceniza de hoja de palma	Ceniza de madera	Ceniza de cáscara de arroz	Ceniza de cáscara de cacahuete	Ceniza de semilla de dátil	Ceniza de caña de azúcar
SiO ₂	30.9	66.64	28.11	88.42	19.7	58.65	73.41
Al ₂ O ₃	17.6	8.55	5.14	0.11	-	4.92	2.78
Fe ₂ O ₃	14.8	1.87	2.91	-	3.9	-	1.21
CaO	23.24	18.90	29.53	1.03	32.9	4.84	9.06
MgO	2.12	1.41	5.14	0.82	10	3.47	1.52
K ₂ O	3.87	3.04	9.64	2.59	6.7	0.46	10.01
LOI	1.2	2.05	-	2.1	11.5	2.81	-
SO ₃	-	-	0.97	-	3.1	-	-
Na ₂ O	-	-	0.32	1.12	1.4	7.25	-
P ₂ O ₅	-	-	2.48	-	3.3	-	-
Referencia:	[45]	[56]	[46]	[18]	[57]	[18]	[58]

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Composición química de los bioaceites más usados

Componente	Bioaceite	Aceite de residuos de madera	Aceite de estiércol de cerdo
Carbono (%)	81.00	77.01	72.58
Hidrógeno (%)	11.00	10.39	9.76
Oxígeno (%)	7.50	12.14	13.19
Referencia:	[65]	[66]	[10]

Fuente: elaboración propia.

Según [69], el ligante asfáltico 60/70 al 0% tiene una viscosidad de 583.00 cP representando el 44% en comparación con el ligante puro de 404.38 cP, mientras que al adicionar 1.5% y 2.5% de aceite de semilla de dátil se redujo en un 6% y 20%, obteniendo 380.63 cP y 323.13 cP respectivamente a 135 °C.

Al añadir 10% de bioaceite en peso de asfalto en la mezcla disminuye la viscosidad, obteniendo la mayor reducción de 45% a 105 °C con bioaceite de pallet de madera y el valor más bajo de 12.5% con la adición de bioaceite de estiércol porcino en comparación con los 38 cgs según la ASTM D4402 [70].

En la investigación [71], estudiaron al asfalto virgen PG 58-28 modificado con 2%, 4%, 6% y 8% de lignina identificando que la viscosidad de bioasfalto con 2% de lignina era de 1.616 Pas a 110 °C, y disminuyó un 74.94% a 135 °C; 50.62% a 150 °C y 37.50% a 165 °C, apreciando que al aumentar temperatura la viscosidad y la variación de disminución eran menores en comparación con el asfalto virgen. Además, la viscosidad del bioasfalto con 2% de lignina disminuyó gracias a la velocidad de rotación, siendo de 0.425 Pas a 10 rpm, 0.405 Pas a 20 rpm y 0.38 Pas a 50 rpm.

4.1.2. Estabilidad

Según [45], mediante la prueba de Marshall expresan el 5% como óptimo contenido de asfalto de la mezcla control, posteriormente modificada con 5% de cenizas volantes, 5% polvo de horno de cemento y 7% polvo de metacaolín logrando mejoras en la estabilidad de la mezcla del 10.4 kN a valores máximos del 11.7 kN, 13.6 kN y 14.4 kN respectivamente, determinando un 38.50% de mejora con metacaolín.

4.1.3. Grado de penetración

Se analizó al ligante asfáltico PEN 60/70 a múltiples temperaturas y con adición de aceite de semilla de dátil en volúmenes de 0%, 1.5% y 2.5%, logrando un aumento del 6% de la penetración del ligante modificado con 1.5% de semilla de dátil [69].

Al evaluar las mezclas asfálticas con betún tradicional 50/70 añadiéndole bioaceite renovable de la madera con papel en 5%, 10% y 15% en relación al peso del betún, se generó el incremento del grado de penetración a 70/100, 100/150 y 160/220 para cada adición, reflejando 6.60% de mejora con un contenido óptimo de 10% de aditivo [65].

Estudiosos analizaron al asfalto PEN 80/100 con adición de residuos de aceite de cocina en 0.2 y 3% determinando que el 2% era la dosis óptima obteniendo 95 de penetración a 25 °C, y al agregar 20, 40 y 60% de aceite de almendra de palma en la mezcla, sólo el 20% promovió la mejora logrando 98 a los 25 °C, siendo el 18.75% y 22.50% de mejora respectivamente [72].

En la investigación [66], evaluaron al asfalto base de grado de penetración de 50 y al bioasfalto con bioaceite de madera en contenidos de 5%, 10% y 30% del peso total del ligante reflejando incrementos de penetración del 12.3% y 79.2% respectivamente haciendo referencia que a mayor contenido de bioaceite mayor es el cambio.

4.1.4. Punto de reblandecimiento

Al estudiar al ligante asfáltico con base de penetración 70 y al bioasfalto con 2, 5, 10 y 15% de ceniza de cáscara de arroz más 1% de estireno-butadieno-estireno, pues se obtuvo que el aditivo mejoró el punto de reblandecimiento de la ligante virgen de 48.2 °C, aumentando un 4.7%, 6.0%, 8.3% y 9.3% respectivamente, mejorando la capacidad a la deformación a altas temperaturas [73].

En el documento [74], estudiaron al asfalto Karamay con grado de penetración 70 y al bioasfalto con adición de polvo de concha de ostra al 5%, 10% y 15% en peso de asfalto, donde los puntos de reblandecimiento del asfalto puro de 50.5 °C se incrementaron en un 3.7%, 6.7% y 9.8% respectivamente.

En la investigación [43], estudiaron al cemento asfáltico 30/45 con adición de poliéster (aceite de cemento asfáltico, un polioliol producto de la oxipropilación del bagazo de la caña de azúcar posteriormente polimerizado con anhídrido piromelítico), verificando que el punto de reblandecimiento es 63.9 °C en el cemento asfáltico convencional, 64 °C y 62.8 °C con 11% y 16% de aditivo mostrando que el modificado es compatible para producir asfalto y 0.15% es la mejora con 11% de dosis óptima.

Al analizar el asfalto PEN 60/70, el asbustón y el bioasbustón siendo el asbustón con adición de aceite de cáscara de coco en dosis de 4%, 5%, 6%, 8% y 16% de asfalto, se consideró el 6% como contenido óptimo ya que aumenta el punto de reblandecimiento alcanzando 51 °C, 58.5 °C y 53.5 °C con 0.28, 0.50, 0.50 de desviación estándar para cada tipo de ligante en estado fresco mientras que en estado envejecido fueron 56 °C, 65 °C y 57 °C con desviación estándar de 0.11, 0.07 y 0.28, por ello el bioasbustón tiene mejores criterios de envejecimiento que el asbustón [75].

4.2. Propiedades reológicas

4.2.1. Resistencia a la tracción indirecta

A partir de la investigación [68] sobre el asfalto AC60/70 con 5% de contenido óptimo de asfalto en las mezclas, se evaluó la resistencia a la tracción indirecta en muestras secas y húmedas con 1%, 3% y 5% de cenizas volantes, obteniendo un ligero aumento de resistencia máxima de la muestra control de 603 kPa y 86 kPa a valores de 663 kPa y 132 kPa en muestra seca a 25 °C y 55 °C respectivamente mientras que en la muestra húmeda de 57 kPa a 126 kPa a 55 °C con un contenido óptimo del 5% de ceniza volante, siendo el 9%, 53.5% y 121.1 % de mejoras.

4.2.2. Módulo de resistencia

Según estudios realizados al asfalto AC60/70 con el 5% de contenido óptimo de asfalto, evaluando la prueba del módulo de resistencia en las mezclas asfálticas con adición de 1%, 3% y 5% de cenizas volantes determinando que el contenido adecuado es el 3% porque incrementó la rigidez de la mezcla con valores del 3.247 MPa y 240 MPa a 3.325 MPa y 324 MPa en la muestra seca a 25 °C y 55 °C respectivamente y en la muestra húmeda mejoró de 153 MPa a 174 MPa a 55 °C [68].

Se evaluó la propiedad del módulo de resistencia de un asfalto PEN 60/70 con un contenido óptimo de 5.7% de asfalto y se elaboraron mezclas asfálticas sustituyendo al relleno tradicional por ceniza de madera en 25%, 50%, 75% y 100% en peso, resultando que el valor inicial de 2500 MPa de la propiedad de la mezcla se incrementó en un 17.5% y 40% con 25% y 100% de ceniza [46].

Al modificar al ligante bituminoso PEN 60/70 con 5% de lignina de residuos de las astillas de madera de álamo y 5% de residuos de tallo de maíz en peso de asfalto, resultó un efecto positivo en su rendimiento a baja temperatura, ya que a -18 °C los biomodificadores redujeron la rigidez del ligante base en 16% y 14% de 441 MPa a 369 MPa y 378 MPa, respectivamente [76].

Otras investigaciones determinaron que la resistencia del ligante bituminoso 60/90 con adición de cenizas volantes de alto calcio (FA1) es mayor que la del ligante bituminoso con adición de cenizas volantes de bajo calcio (FA2) a 20 °C, 0 °C y 50 °C siendo 4.02, 6.77 y 0.87 MPa con FA1 y 3.20, 5.86 y 0.74 MPa para FA2, gracias a la mayor densidad de los sólidos en el ligante bituminoso modificado con FA1. Las variaciones de resistencia están entre el 16%-20% [19].

4.2.3. Resistencia a la deformación permanente

En la investigación [68], al asfalto AC60/70 con adición 1%, 3% y 5% de cenizas volantes, se afirmó el 3% como contenido óptimo de dicho material proporcionando resistencia a la deformación permanente de la carpeta asfáltica dado que disminuye el valor inicial de la deformación acumulada a 1800 ciclos de 1.43% y 1.62% a 0.55% y 1.50% a 25 °C y 55 °C en la muestra seca, mientras que en la muestra húmeda a 55 °C disminuyó de 2.38% a 0.94%.

La adición de ceniza de madera al 25%, 50%, 75% y 100% en peso del asfalto PEN 60/70 a la mezcla asfáltica, mostraron que a mayor presencia de ceniza de madera en la producción de la mezcla menor es el porcentaje de deformación permanente, pues la deformación de la mezcla control está comprendido entre 1%-1.2% y al reemplazar el relleno con ceniza de madera en su totalidad está queda entre 0.06%-0.08% [46].

Otro estudio indicó que el contenido óptimo de asfalto fue de 6.005% respecto al peso de la mezcla, además fabricaron mezclas usando ligante asfáltico modificado con 5%, 10%, 15% y 20% de ceniza de cáscara de cacahuate a 40 °C y 60 °C y con tensiones de 100 y 300 kPa, brindando mejoras en la deformación final y en la resistencia a las roderas. Para 40 °C y una tensión de 100 kPa, la deformación final de 0.6% de la mezcla patrón disminuyó un 16.97% con 5% de ceniza, mientras que para el 10, 15 y 20% fue 23.27, 38.2 y 42.08% respectivamente [57].

4.2.4. Resistencia a la fatiga

El uso de ceniza de cáscara de cacahuate en 5, 10, 15 y 20%, mejoró el comportamiento a la fatiga de las mezclas modificadas e incrementó la resistencia a los esfuerzos de tracción repetidos. Para una tensión de 400 kPa a 25 °C, los ciclos hasta el fallo de 2500 aprox. mejoraron con dosis de 5, 10, 15 y 20% de aditivo a 1.75, 3.82, 5.54 y 4.78 veces superiores a los de las mezclas control respectivamente, determinando al 15% de aditivo como contenido máximo en las mezclas [57].

Expertos mezclaron el ligante convencional con bioaceite en dosis de 2%, 4%, 6%, 8% y 10% en peso de ligante, logrando extender la resistencia a la deformación de rotura del ligante convencional con valor de 5.5% a 6.1%, 6.6%, 7.4%, 7.7% y 9.1% con cada una de las adiciones, traduciéndolo como un aumento de la tensión admisible lo que conlleva a mayor vida a la fatiga del nuevo ligante. El número de ciclos hasta el fallo por fatiga del ligante convencional a una tensión del 2.5% es

de 3,082 que ascendió a 5,897 con 2% de bioaceite, representando un 47.7% de mejora de la propiedad en comparación con el ligante convencional y con la adición de 4%, 6%, 8% y 10% aumentó a 10,248, 16,929, 21,384 y 31,777 [77].

En el informe [78], evaluaron al asfalto base PEN 60/80 y al bioasfalto con bioaceite en dosis de 1%, 3% y 5% en peso de asfalto, el asfalto patrón tuvo 46,374 ciclos hasta el fallo mientras que los modificadores lo incrementaron a 51,087, 67,481 y 69,543 para una tensión de 2.5% y de 2,357 a 2,270, 4,171 y 4,905 para una tensión de 5%, por ello al obtener altos números de ciclos de fallo se mejoró la resistencia a la fatiga en las mezclas asfálticas.

Según [79], en su estudio al betún virgen con grado de penetración 70, al betún compuesto por polímeros-10% de caucho-2% de estireno-butadieno (PMA) y al betún compuesto con adiciones 10%, 12%, 15%, 18% y 20% de bioaceite de maíz (Bio1+PMA) y bioaceite de madera (Bio2+PMA) en peso de betún evaluaron la vida de fatiga para cada tipo, obteniendo valores de 3.5×10^4 (asfalto virgen), 6.9×10^4 (PMA), 6.8×10^4 (15% Bio1+PMA) y 8.6×10^4 (15% Bio2+PMA), así que añadir bioaceite de madera en una dosis óptima del 15% en el PMA es la mejor opción mejorando la durabilidad en un 24%.

4.2.5. Resistencia al deslizamiento

En la investigación [58], estudiaron al asfalto PEN 40/60 con un contenido óptimo del 6.2% de asfalto y adicionando las cenizas de caña de azúcar como reemplazo al betún en dosis del 6%, 12% y 18% en peso a 150 °C aportando resistencia al deslizamiento en el asfalto a grado abierto tanto en condición seca como húmeda en más de un 25 % con una dosis óptima del 18% de ceniza.

4.2.6. Resistencia a la humedad

El uso de bioaceite en el asfalto reveló mejoras en la resistencia a la humedad del aglutinante, resultando muy importante porque la separación del aglutinante del árido inducido por el agua causa fallas en el pavimento flexible. La hexadecanamida y el ácido hexadecanoico son surfactantes, compuestos por químicos polares y no polares, responsables de mejorar la adherencia entre el aglutinante y el árido en el agua [80].

4.3. Propiedades medioambientales

En el estudio [2] compararon el ciclo de vida de un ligante asfáltico puro y de un bioligante con 10% de aceite de estiércol de cerdo, mostrando mejoras en el impacto ambiental. La energía de mezcla y compactación

necesaria para mantener la trabajabilidad del asfalto se redujo en más del 50%, mientras que su producción emite 5 veces menos CO₂ y 3 veces menos de metano al medio ambiente y el índice de potencial de calentamiento global mejoró en un 7.8% en comparación con el ligante asfáltico puro.

5. Conclusiones

Al aumentar la dosis de adición de bioamodificadores a altas temperaturas mejoran considerablemente las propiedades convencionales del asfalto como reduciendo la viscosidad, aumentando la estabilidad, el grado de penetración y el punto de reblandecimiento del asfalto.

A mayor presencia de biomodificadores a elevadas temperaturas, mayor es el porcentaje de mejora de las propiedades reológicas del asfalto, extendiendo la resistencia a la tracción indirecta, el módulo de resistencia, resistencia a la deformación permanente, resistencia a la fatiga, resistencia al deslizamiento y la resistencia a la humedad.

El bioasfalto a base de subproductos de biomasa tiene mejores condiciones de envejecimiento oxidativo.

A partir de los resultados el rendimiento del bioasfalto a base de residuos de biomasa a altas y bajas temperaturas garantizan reacciones positivas en la ingeniería de los pavimentos, con una mínima adición de 1% de aceite crudo de palma hasta 100% de ceniza de madera como máximo, siendo un producto viable, energético, sostenible y de calidad.

Financiación

Esta investigación no recibió financiación externa.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] S. M. Saeed et al., “Optimization of rubber seed oil content as bio-oil rejuvenator and total water content for cold recycled asphalt mixtures using response surface methodology,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, p. e00561, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00561>
- [2] A. Samieadel, K. Schimmel, and E. H. Fini, “Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-modified binder and conventional asphalt binder,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 20, no. 1, pp. 191–200, Jan. 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1467-1>
- [3] J. Suárez-Macías, J. M. Terrones-Saeta, F. J. Iglesias-Godino, F. A. Corpas-Iglesias, “Development of Cold In-Place Recycling with Bitumen Emulsion and Biomass Bottom Ash,” *Crystals*, vol. 11, no. 4, p. 384, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/cryst11040384>
- [4] A. M. Al-Sabaei, M. B. Napiyah, M. H. Sutanto, S. Rahmad, N. I. M. Yusoff, and W. S. Alaloul, “Determination of rheological properties of bio-asphalt binders through experimental and multilayer feed-forward neural network methods,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 3485–3493, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.003>
- [5] F. Bühler, T. V. Nguyen, B. Elmegaard, “Sustainable production of asphalt using biomass as primary process fuel,” *22nd Int. Congr. Chem. Process Eng. CHISA 2016 19th Conf. Process Integr. Model. Optim. Energy Sav. Pollut. Reduction, PRES 2016*, vol. 2, pp. 1063–1064, 2016.
- [6] L. V. Espinosa et al., “Multi-scale study of bio-binder mixtures as surface layer: Laboratory evaluation and field application and monitoring,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 287, p. 122982, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122982>
- [7] Z. Elahi et al., “Waste Cooking Oil as a Sustainable Bio Modifier for Asphalt Modification: A Review,” *Sustainability*, vol. 13, no. 20, p. 11506, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/su132011506>
- [8] J. Ren, G. Zang, and Y. Xu, “Formula and Pavement Properties of a Composite Modified Bioasphalt Binder Considering Performance and Economy,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 10, Oct. 2019, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002888](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002888)
- [9] J. Hui, T. Wang, R. Jiang, B. Zhu, and X. Wang, “Research on Polymer Modifiers of Bio-asphalt Synthesized by Controlled/Living Radical Polymerization,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 371, p. 012058, 2018, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/371/1/012058>
- [10] Y. Fang, Z. Zhang, J. Yang, and X. Li, “Comprehensive review on the application of bio-rejuvenator in the regeneration of waste asphalt materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 295, p. 123631, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123631>
- [11] H. Kumar Behera, D. Giri, and S. Sekhar Das, “Modification of Bitumen Using Sustainable Materials for Pavement Design,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 970, no. 1, p. 012022, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/970/1/012022>
- [12] M. Zadshir, D. J. Oldham, S. Hosseinezhad, E. H. Fini, “Investigating bio-rejuvenation mechanisms in asphalt binder via laboratory experiments and molecular dynamics simulation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 190, pp. 392–402, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.137>
- [13] S. Hosseinezhad, A. M. Hung, M. Mousavi, B. K. Sharma, and E. Fini, “Resistance Mechanisms of Biomodified Binders against Ultraviolet Exposure,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 6, pp. 2390–2398, 2020, doi: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b05490>
- [14] K. R. Usman, M. R. Hainin, M. K. I. Mohd Satar, M. N. Mohd Warid, S. N. N. Kamarudin, and S. Abdulrahman, “Palm oil fuel ash application in cold mix dense-graded bituminous mixture,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 287, p. 123033, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123033>
- [15] X. Zhang, J. Zhu, C. Wu, Q. Wu, K. Liu, K. Jiang, “Preparation and Properties of Wood Tar-based Rejuvenated Asphalt,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 5, p. 1123, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13051123>
- [16] M. Dahim, “Crude Oil Fly Ash Waste for Road Pavement Application,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 801, no. 1, p. 012006, 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/801/1/012006>

- [17] C. Higuera-Sandoval, X. V. Camargo-Amaya, E. A. Suárez-Molano “Effect of Aging on the Properties of Asphalt and Asphalt Mixtures,” *Ing. y Univ.*, vol. 19, pp. 89–103, 2015, doi: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-2.eapa>
- [18] S. A. Tahami, M. Arabani, and A. Foroutan Mirhosseini, “Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 170, pp. 547–556, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.102>
- [19] M. S. Lebedev, N. I. Kozhukhova, and I. L. Chulkova, “Effect of phase and size characteristics of fly ash from power station on properties of bitumen composites,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 222, p. 012005, 2017, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/222/1/012005>
- [20] E. Chailleux, M. AUDO, S. Goyer, C. Queffelec, and O. yazoghli, *Advances in the development of alternative binders from biomass for the production of biosourced road binders. In Huang, Di Benedetto (Eds) Advances in Asphalt Materials, Road and Pavement Construction.* 2015.
- [21] Y. Ding, B. Shan, X. Cao, L. Yugui, M. Huang, B. Tang, “Development of bio oil and bio asphalt by hydrothermal liquefaction using lignocellulose,” *Journal of Cleaner Production*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125586>
- [22] S. Dimter, M. Šimun, M. Zagvozda, T. Rukavina, “Laboratory Evaluation of the Properties of Asphalt Mixture with Wood Ash Filler,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 3, p. 575, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14030575>
- [23] A. Kumar, R. Choudhary, R. Narzari, R. Katakai, and S. K. Shukla, “Evaluation of bio-asphalt binders modified with biochar: a pyrolysis by-product of Mesua ferrea seed cover waste,” *Cogent Eng.*, vol. 5, no. 1, p. 1548534, 2018, doi: <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1548534>
- [24] Y. Lei et al., “Evaluation of the effect of bio-oil on the high-temperature performance of rubber modified asphalt,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 191, pp. 692–701, Dec. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.064>
- [25] H. Wang, Z. Ma, X. Chen, M. R. Mohd Hasan, “Preparation process of bio-oil and bio-asphalt, their performance, and the application of bio-asphalt: A comprehensive review,” *J. Traffic Transp. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 137–151, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.002>
- [26] D. Paul, M. Suresh, and M. Pal, “Utilization of fly ash and glass powder as fillers in steel slag asphalt mixtures,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, p. e00672, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00672>
- [27] H. Choo, N. N. Yeboah, and S. E. Burns, “Small to intermediate strain properties of fly ashes with various carbon and biomass contents,” *Can. Geotech. J.*, vol. 53, no. 1, pp. 35–48, 2016, doi: <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0069>
- [28] S. Mansor, S. Haron, M. I. Joohari, M. Razali, R. Ramli, “The Effect of Utilizing Fly Ash and Bottom Ash as a Replacement of Mineral Filler in Porous Asphalt Mixtures,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1144, no. 1, p. 012086, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1144/1/012086>
- [29] M. S. S. Lima et al., “Environmental potentials of asphalt mixtures fabricated with red mud and fly ash,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 22, no. sup1, pp. S690–S701, 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1900899>
- [30] B. C. Amoni et al., “Effect of coal fly ash treatments on synthesis of high-quality zeolite A as a potential additive for warm mix asphalt,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 275, p. 125197, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125197>
- [31] W. Dong, F. Ma, C. Li, Z. Fu, Y. Huang, J. Liu, “Evaluation of Anti-Aging Performance of Biochar Modified Asphalt Binder,” *Coatings*, vol. 10, no. 11, p. 1037, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings10111037>
- [32] T. P. da Costa, P. Quinteiro, L. A. C. Tarelho, L. Arroja, and A. C. Dias, “Environmental assessment of valorisation alternatives for woody biomass ash in construction materials,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 148, pp. 67–79, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.022>

- [33] X. Zhou et al., “Effects of pyrolysis parameters on physicochemical properties of biochar and bio-oil and application in asphalt,” *Sci. Total Environ.*, vol. 780, p. 146448, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146448>
- [34] A. V. Rouly Sihombing, “Development of resilient modulus model proposed for bio-asphalt as modifier in asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement,” *Int. J. Geomate*, vol. 19, no. 71, 2020, doi: <https://doi.org/10.21660/2020.71.68349>
- [35] Z. A. Jattak, N. A. Hassan, M. K. I. Mohd Satar, “Moisture susceptibility and environmental impact of warm mix asphalt containing bottom ash,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, p. e00636, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00636>
- [36] B. Yang et al., “Environmental impact of solid waste filler in porous asphalt mixture,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 303, p. 124447, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124447>
- [37] A. Setyawan, B. Widiharjo, Djumari, “Selecting the Best Materials Compositions of Resin Based Bioasphalt,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 75, p. 012019, Jul. 2017, doi: [10.1088/1755-1315/75/1/012019](https://doi.org/10.1088/1755-1315/75/1/012019).
- [38] J. Plachý, J. Vysoká, R. Vejmelka, “Influence of Amount of Filler on Thermal Resistance of Bitumen Sheets,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1066, no. 1, p. 012009, 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1066/1/012009>
- [39] S. Ren et al., “Multi-scale characterization of lignin modified bitumen using experimental and molecular dynamics simulation methods,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 287, p. 123058, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123058>
- [40] M. Amrani et al., “Feasibility of using phosphate wastes for enhancing high-temperature rheological characteristics of asphalt binder,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 22, no. 5, pp. 1407–1417, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01026-1>
- [41] S. Abbasalizadeh Boura and S. Hesami, “Laboratory evaluation of the performance of asphalt mixtures containing biomass fillers,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 21, no. 7, pp. 2040–2053, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1572528>
- [42] E. Remišová and M. Holý, “Changes of Properties of Bitumen Binders by Additives Application,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 245, p. 032003, Oct. 2017, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/3/032003>
- [43] F. de Araújo, I. S. V. da Silva, D. Pasquini, “Application of polyester derived from biomass in petroleum asphalt cement,” *Polímeros*, vol. 27, no. 2, pp. 136–140, 2017, doi: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2401>
- [44] Chaira and Veranita, “The Effect of Combining Coal Fly Ash and Lokan Shells As Filler Towards The Mixture Of Asphalt Concrete Wearing Course,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1625, no. 1, p. 012033, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1625/1/012033>
- [45] H. H. Joni and H. H. Zghair, “Properties of modified asphalt mixtures with additives of fillers materials,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 737, no. 1, p. 012120, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012120>
- [46] Y. Bi, F. Jakarni, “Evaluating properties of wood ash modified asphalt mixtures,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 512, p. 012004, 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/512/1/012004>
- [47] H. A. Rondón Quintana, O. I. León Vergara, W. D. Fernández Gómez, “Behavior of a warm mix asphalt made in an asphalt plant,” *Ing. y Desarro.*, vol. 35, no. 1, pp. 153–173, 2017, doi: <https://doi.org/10.14482/inde.35.1.8947>
- [48] A. Loaiza, E. Garcia, and H. A. Colorado, “Evaluation of asphalt binder blended with coconut coir dust and residual coconut fibers for structural applications,” *Rev. la construcción*, vol. 17, no. 3, pp. 542–554, 2019, doi: <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.542>
- [49] M. Zahoor, S. Nizamuddin, S. Madapusi, F. Giustozzi, “Recycling asphalt using waste bio-oil: A review of the production processes, properties and future perspectives,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 147, pp. 1135–1159, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.032>
- [50] P. Procházka et al., “Availability and Applicability of Wood and Crop Residues for the Production of Wood Composites,” *Forests*, vol. 12, no. 5, p. 641, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/f12050641>

- [51] Z. Y. Mahssin et al., “Converting Biomass into Bio-Asphalt – A Review,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 682, no. 1, p. 012066, 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012066>
- [52] R. Mistry and T. K. Roy, “Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt,” *Perspect. Sci.*, vol. 8, pp. 307–309, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.061>
- [53] R. Veropalumbo, N. Viscione, A. Formisano, “Hot mix asphalt with fly ashes for dense-graded surface layers of rural roads,” *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, pp. 93–105, 2018, doi: <https://doi.org/10.2495/EID180091>
- [54] D. M. Ayala Valderrama, J. A. Gómez Cuaspud, “Characterization of fly ash, slag and glass hull for the obtaining of vitreous materials,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 935, p. 012040, 2017, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/935/1/012040>
- [55] R. Pradoto, E. Puri, T. Hadinata, Q. D. Rahman, R. M. Az-zuchruf, “Improving Strength of Porous Asphalt: A Nano Material Experimental Approach,” *J. Rekayasa Sipil*, vol. 15, no. 2, p. 75, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.25077/jrs.15.2.75-89.2019>
- [56] S. Al-Merzah, S. Al-Busaltan, and H. Al Nageim, “Characterizing Cold Bituminous Emulsion Mixtures Comprised of Palm Leaf Ash,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 6, 2019, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002714](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002714)
- [57] M. Arabani and N. Esmaeeli, “Laboratory evaluation on effect of groundnut shell ash on performance parameters of asphalt binder and mixes,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 21, no. 6, pp. 1565–1587, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1560356>
- [58] R. Al-Yasari and S. Al-Busaltan, “The effects of reed fly ash modified bitumen on the volumetric and mechanical properties of open grade friction course mixtures,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1067, no. 1, p. 012075, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1067/1/012075>
- [59] N. Su, F. Xiao, J. Wang, L. Cong, S. Amirhanian, “Productions and applications of bio-asphalts – A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 183, pp. 578–591, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118>
- [60] S. Aflaki, P. Hajikarimi, E. H. Fini, B. Zada, “Comparing Effects of Biobinder with Other Asphalt Modifiers on Low-Temperature Characteristics of Asphalt,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 3, pp. 429–439, Mar. 2014, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000835](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000835)
- [61] N. A. Abdul Raman, M. R. Hainin, N. Abdul Hassan, F. N. Ani, “A Review on the Application of Bio-oil as an Additive for Asphalt,” *J. Teknol.*, vol. 72, no. 5, 2015, doi: <https://doi.org/10.11113/jt.v72.3948>
- [62] X. Jiang, P. Li, Z. Ding, A. Wang, H. Bing, J. Zhang, “Thermochemical liquefaction of wheat straw and its effectiveness as an extender for asphalt binders: Characterization of liquefied products and potential opportunities,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 305, p. 124769, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124769>
- [63] C. Lopera, G. Córdoba, “Diseño de mezcla asfáltica tibia a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma,” *Dyna*, vol. 80, pp. 99–108, 2013.
- [64] M. H. Nahi, I. B. Kamaruddin, N. Madzlan, “The Utilization of Rice Husks Powder as an Antioxidant in Asphalt Binder,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 567, pp. 539–544, Jun. 2014, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.567.539>
- [65] L. P. Ingrassia, X. Lu, G. Ferrotti, F. Canestrari, “Chemical, morphological and rheological characterization of bitumen partially replaced with wood bio-oil: Towards more sustainable materials in road pavements,” *J. Traffic Transp. Eng.* vol. 7, no. 2, pp. 192–204, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.04.003>
- [66] J. Gao, H. Wang, Z. You, M. Mohd Hasan, Y. Lei, and M. Irfan, “Rheological Behavior and Sensitivity of Wood-Derived Bio-Oil Modified Asphalt Binders,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 6, p. 919, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/app8060919>
- [67] A. M. Al-Sabaeei, M. B. Napiah, M. H. Sutanto, W. S. Alaloul, and A. Usman, “A systematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: Coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions,” *J. Clean. Prod.*, vol. 249, p. 119357, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119357>

- [68] S. Likitlersuang, T. Chompoorat, “Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 337–344, Sep. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.002>
- [69] S. A. Alattieh, G. G. Al-Khateeb, W. Zeiada, A. Shanableh, “Performance assessment of bio-modified asphalt binder using extracted bio oil from date seeds waste,” *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 11, no. 6, pp. 1260–1270, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s13198-020-00980-1>
- [70] E. H. Fini, S. Hosseinneshad, D. J. Oldham, E. Chailleux, and V. Gaudefroy, “Source dependency of rheological and surface characteristics of bio-modified asphalts,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 18, no. 2, pp. 408–424, Mar. 2017, doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1163281>
- [71] J. Gao, H. Wang, C. Liu, D. Ge, Z. You, and M. Yu, “High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 230, p. 117063, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117063>
- [72] R. Zhang, Z. You, J. Ji, Q. Shi, and Z. Suo, “A Review of Characteristics of Bio-Oils and Their Utilization as Additives of Asphalts,” *Molecules*, vol. 26, no. 16, p. 5049, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/molecules26165049>
- [73] Z. Lu, A. Sha, W. Wang, J. Gao, “Studying the Properties of SBS/Rice Husk Ash-Modified Asphalt Binder and Mixture,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2020, pp. 1–11, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1155/2020/4545063>
- [74] X. Wang, Y. Guo, G. Ji, Y. Zhang, J. Zhao, H. Su, “Effect of Biowaste on the High- and Low-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binders,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2021, pp. 1–14, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/5516546>
- [75] A. V. R. Sihombing, B. S. Subagio, E. S. Hariyadi, A. Yamin, “Chemical, morphological, and high temperature rheological behaviour of Bioasbuton® as an alternative binder for asphalt concrete in Indonesia,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 33, no. 5, pp. 308–317, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.006>
- [76] C. Xu et al., “Effect of Lignin Modifier on Engineering Performance of Bituminous Binder and Mixture,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 7, p. 1083, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13071083>
- [77] S. Girimath, D. Singh, “Effects of bio-oil on performance characteristics of base and recycled asphalt pavement binders,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 116684, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116684>
- [78] C. Wang, T. Xie, W. Cao, “Performance of bio-oil modified paving asphalt: chemical and rheological characterization,” *Mater. Struct.*, vol. 52, no. 5, p. 98, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1399-9>
- [79] D.-X. Bao, Y.-Y. Yu, and Q.-M. Zhao, “Evaluation of the chemical composition and rheological properties of bio-asphalt from different biomass sources,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 21, no. 7, pp. 1829–1843, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1568287>
- [80] A. M. Hung, M. Mousavi, F. Pahlavan, and E. H. Fini, “Intermolecular Interactions of Isolated Bio-Oil Compounds and Their Effect on Bitumen Interfaces,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 9, pp. 7920–7931, Sep. 2017, doi: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01462>