Use of Crude Palm Oil in Warm Mix Asphalt to Mitigate Temperature Effects

Tipo de contribución: FULL PAPERS (FP)

Formato: Full Paper (FP): general

Alan Garcia Mendoza[1], Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia[2], Jully Pahola Calderón Saldaña[3], Fiorella Sthefany Valladolid Marcos[2], Javier Alejandro Pineda Medina[4], Juan Godoy Caso[5], Rodolfo Arévalo Marcos[2]

Organización: 1: Universidad Nacional de Barranca: Barranca, PE; 2: Universidad Norbert Wiener - Programa Académico de Enfermería ((PE); 3: Universidad de San Martín de Porres - Escuela Profesional de Obstetricia (PE); 4: Pontificia Universidad Católica del Perú - - Maestría en Gerencia Social-(PE); 5: Universidad César Vallejo - Escuela de Postgrado (PE)

Autor corresponsal : Dr. Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia (Universidad César Vallejo - (PE), ID: 2566

***Abstract* - This study aimed to determine the optimal percentage of crude palm oil in asphalt mixtures during production to mitigate temperature effects, using the Marshall test conducted in 2021. The research employed a deductive, quantitative approach with a retrolective and longitudinal data collection process within an experimental design framework.**

The findings indicate that conventional asphalt exhibits the highest specific gravity, but as the proportion of crude palm oil increases, specific gravity also rises. Regarding air voids, the null hypothesis was accepted, signifying that palm oil incorporation did not cause statistically significant variations in void content. A similar trend was observed in flow measurements, where no substantial differences were detected across experimental groups.

Furthermore, the study revealed that the most significant number of air voids occurred at 1% and 1.5% palm oil concentrations, although these values did not differ markedly from other tested formulations. The highest flow values corresponded to conventional asphalt, but an increase in palm oil concentration led to a proportional rise in flow. However, the corrected stability of the asphalt mixture decreased as the palm oil content increased, with conventional asphalt demonstrating the highest stability. Additionally, the stiffness index followed a declining trend as palm oil concentration rose, indicating a reduction in the mixture's structural rigidity.

Keywords: Crude palm oil, warm asphalt mix, temperature mitigation, Marshall test.

[1] Introducción

El desarrollo de infraestructuras viales en el Perú ha estado tradicionalmente basado en el uso de mezclas asfálticas convencionales, diseñadas mediante el método Marshall y empleando granulometría continua. Sin embargo, la necesidad de optimizar los procesos constructivos y reducir el impacto ambiental de la pavimentación ha llevado a la adopción de tecnologías más sostenibles, como las mezclas asfálticas tibias (MAT). A diferencia de los concretos asfálticos en caliente, las MAT permiten reducir la temperatura de producción y aplicación en aproximadamente 30-40°C, disminuyendo así el consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) sin comprometer su desempeño estructural (Caputo et al., 2020).

En este contexto, la incorporación de aditivos orgánicos, como el aceite de palma crudo, ha emergido como una alternativa prometedora para mejorar las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos y contribuir a la sostenibilidad ambiental de la industria vial. Investigaciones previas han demostrado que los aceites vegetales pueden actuar como modificadores de viscosidad, reduciendo la resistencia al cizallamiento del betún y facilitando su trabajabilidad a temperaturas más bajas (D'Angelo et al., 2021). Esto se traduce en un menor consumo de combustible en las plantas de producción y una reducción de las emisiones de CO_2, lo que favorece la mitigación del cambio climático.

El cambio climático es una de las principales problemáticas globales del siglo XXI, impulsado en gran parte por el aumento de las emisiones de CO_2 derivadas de actividades humanas. Desde la Revolución Industrial, la concentración de este gas en la atmósfera ha aumentado drásticamente, alcanzando niveles sin precedentes en la era moderna (IPCC, 2019). La industria del transporte, incluyendo la pavimentación de carreteras, es una de las principales fuentes de emisiones contaminantes, debido a la alta demanda energética de la producción y colocación de mezclas asfálticas. Por esta razón, diversas investigaciones han explorado alternativas para reducir la huella de carbono en la construcción vial, promoviendo el uso de tecnologías más limpias y eficientes (World Bank, 2020).

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de la incorporación de aceite de palma crudo en la producción de mezclas asfálticas tibias, determinando el porcentaje óptimo de dosificación y su efecto en la reducción de temperatura durante la fabricación. Para ello, se empleará el ensayo Marshall como herramienta de análisis, permitiendo caracterizar las propiedades mecánicas de las mezclas modificadas y su viabilidad dentro del marco normativo peruano (MTC, 2013).

Entre los principales beneficios esperados con esta innovación se encuentra la reducción del consumo de energía en la producción asfáltica, la disminución de las emisiones contaminantes y la posibilidad de incorporar insumos renovables en la industria de la pavimentación. Sin embargo, una de las principales limitaciones del estudio ha sido el acceso al insumo de aceite de palma crudo, cuya disponibilidad se vio afectada por la pandemia de COVID-19, generando retrasos en la ejecución de los experimentos y la obtención de resultados concluyentes.

Desde la década de 1980, se ha observado un creciente interés en la investigación y desarrollo de tecnologías orientadas a la sostenibilidad ambiental, impulsado por la necesidad de reducir el impacto de la actividad humana en el medioambiente (UNEP, 2021). En este sentido, la industria de la construcción y el transporte han adoptado nuevas estrategias para mejorar la eficiencia de los materiales empleados, promoviendo la reutilización de residuos y la incorporación de aditivos ecológicos en la producción de mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas tibias han demostrado ser una solución viable para disminuir la temperatura de fabricación y aplicación del pavimento, sin comprometer su desempeño en servicio. La incorporación de aceite de palma crudo como aditivo en estas mezclas representa una estrategia innovadora que no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental, sino que también fomenta el desarrollo de una economía circular mediante el aprovechamiento de subproductos agroindustriales.

Por lo tanto, esta investigación busca aportar evidencia científica sobre la viabilidad técnica y ambiental del uso de aceite de palma crudo en mezclas asfálticas tibias, estableciendo una base para su posible implementación en proyectos de infraestructura vial en el Perú. Además, los resultados obtenidos podrán servir como referencia para futuras normativas y regulaciones que promuevan el uso de tecnologías más sostenibles en la construcción de carreteras.

[2] MATERIAL Y MÉTODOS

Tipo de Investigación

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, dado que se fundamentó en la medición objetiva de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas. Se adoptó un método deductivo, ya que se partió de principios generales sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas tibias modificadas con aceite de palma crudo para evaluar su desempeño en condiciones específicas de laboratorio.

Desde una perspectiva metodológica, la investigación tuvo una orientación explicativa y descriptiva. La fase descriptiva permitió caracterizar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional y la modificada con aceite de palma crudo, mientras que la fase explicativa buscó establecer la influencia de este aditivo en la reducción de temperatura de fabricación y su impacto en las propiedades de la mezcla.

Dado que el estudio analizó datos preexistentes de ensayos de laboratorio validados, la recolección de información se realizó de manera retrolectiva, permitiendo evaluar y comparar los resultados obtenidos en condiciones controladas.

Diseño de la Investigación

El diseño empleado en la investigación fue experimental, ya que se sometieron a prueba dos tipos de mezclas asfálticas en condiciones de laboratorio, aplicando tratamientos diferenciados para determinar el impacto del aceite de palma crudo en sus propiedades mecánicas y térmicas. La investigación tuvo un enfoque explicativo y longitudinal, pues permitió analizar la evolución de las propiedades de las mezclas a lo largo del desarrollo de los ensayos, obteniendo datos en diferentes momentos del proceso experimental.

Población y Muestra

La población de estudio estuvo constituida por las mezclas asfálticas utilizadas en proyectos viales, mientras que la muestra se conformó por un total de 24 especímenes, distribuidos en dos grupos:

12 especímenes de mezcla asfáltica convencional.

12 especímenes de mezcla asfáltica modificada con aceite de palma crudo.

Los especímenes fueron elaborados y evaluados siguiendo los procedimientos establecidos por normativas internacionales como la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y la ASTM (American Society for Testing and Materials), así como la Norma Técnica Peruana (MTC-2013).

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para la obtención de los datos, se emplearon diferentes técnicas e instrumentos de recolección de información, garantizando la rigurosidad metodológica y la validez de los resultados.

Análisis de Documentos

Se utilizó esta técnica para recopilar información a partir de documentos técnicos que contienen los procedimientos y estándares de evaluación de mezclas asfálticas. En esta fase, se revisaron las normativas nacionales e internacionales relacionadas con el diseño, producción y ensayo de mezclas asfálticas, con énfasis en la metodología Marshall.

Observación

Se aplicó la observación estructurada como técnica fundamental para la recolección de datos en los ensayos de laboratorio. Mediante esta técnica, se registraron las propiedades mecánicas y térmicas de los especímenes, permitiendo obtener datos cuantitativos sobre su desempeño.

Instrumentos de Recolección de Datos

Los instrumentos utilizados para la recopilación de datos fueron:

Guía de Documentos: Se empleó la normativa MTC-2013 sobre el ensayo Marshall, que establece la metodología de evaluación de las mezclas asfálticas, incluyendo parámetros como estabilidad, fluidez y densidad.

Guía de Observación: Se utilizaron formatos estandarizados de registro para documentar los resultados de cada ensayo, garantizando la precisión en la recopilación de datos.

La combinación de estas técnicas e instrumentos permitió obtener información confiable y objetiva sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas, proporcionando evidencia empírica sobre el efecto del aceite de palma crudo en la reducción de temperatura y la mejora de las propiedades mecánicas del material.

Bases teoricas

Resumen y Síntesis de las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) y Tibias (MAT)

Las mezclas asfálticas son componentes fundamentales en la construcción de pavimentos, ya que su calidad impacta directamente en la durabilidad y resistencia de las carreteras. En este artículo se abordarán las dos principales categorías de mezclas asfálticas: las mezclas asfálticas calientes (MAC) y las mezclas asfálticas tibias (MAT), destacando sus propiedades, ventajas, procesos de fabricación, y sus aplicaciones en la industria vial.

1. Mezclas Asfálticas Calientes (MAC)

Las mezclas asfálticas calientes (MAC) son ampliamente utilizadas en la construcción de pavimentos y se definen como una combinación de agregados, ligantes hidrocarbonados y aditivos cuando son requeridos. Según Padilla Rodríguez (2004), estas mezclas deben cumplir con una serie de requisitos técnicos para asegurar su desempeño durante la vida útil de la carretera. El proceso de fabricación de las MAC involucra calentar el ligante junto con los agregados y polvo mineral, de modo que estos componentes se combinen homogéneamente antes de ser transportados a obra a temperaturas significativamente más altas que la del ambiente.

Las propiedades fundamentales de las MAC incluyen la durabilidad, estabilidad, flexibilidad, impermeabilidad, resistencia a la fatiga, y resistencia al deslizamiento. A continuación se describen algunas de estas propiedades clave:

Durabilidad: Capacidad de la mezcla para resistir el desgaste por el tránsito y las condiciones ambientales.

Estabilidad: Resistencia a las deformaciones causadas por el peso de los vehículos.

Vacíos de aire: Espacios diminutos dentro de la mezcla que influyen en su compacidad y resistencia.

Flexibilidad: La capacidad de adaptarse a las deformaciones sin agrietarse, incluso cuando las subcapas del pavimento se asientan.

Impermeabilidad: Impide que el agua ingrese a las capas inferiores, lo que preserva la integridad del pavimento.

Resistencia al deslizamiento: Evita que los vehículos pierdan tracción en condiciones de humedad.

El diseño de las mezclas asfálticas calientes se basa en la selección de la granulometría adecuada y el tipo de asfalto necesario. El Método Marshall es comúnmente utilizado para este propósito. Este método, que involucra ensayos mecánicos para determinar el porcentaje óptimo de asfalto, es fundamental para asegurar que la mezcla cumpla con las propiedades requeridas. Se crean probetas de 2 ½" de altura y 4" de diámetro que se compactan con un martillo Marshall. Los ensayos realizados sobre estas probetas incluyen la evaluación de la densidad-huecos, la estabilidad y la fluidez del material.

2. Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)

Las mezclas asfálticas tibias (MAT), también conocidas como Warm Mix Asphalt (WMA), se desarrollaron como una respuesta a los problemas ambientales derivados de la producción de mezclas asfálticas a altas temperaturas. Según Ulloa Calderón (2011), las MAT surgieron en Europa durante el Protocolo de Kyoto y la Comunidad Económica Europea en 1997, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Este tipo de mezcla, que fue introducido en Estados Unidos por la National Asphalt Pavement Association (NAPA) en colaboración con la Federal Highway Administration (FHWA), se destaca por la reducción de las temperaturas de trabajo, particularmente durante la compactación.

El objetivo principal de las tecnologías MAT es disminuir la viscosidad del ligante asfáltico mediante el uso de aditivos, lo que permite reducir la temperatura de producción y compactación entre 10°C y 50°C en comparación con las MAC. Esta reducción en la temperatura no solo mejora la trabajabilidad del material, sino que también incrementa la eficiencia en la compactación, lo que resulta en una mayor durabilidad del pavimento.

Las tecnologías utilizadas para producir MAT incluyen:

Reducción de la viscosidad con aditivos orgánicos: Modificadores que mejoran la fluidez del asfalto a temperaturas más bajas.

Asfaltos espumados: Proceso que introduce vapor de agua en el asfalto caliente, reduciendo su viscosidad y mejorando su manejabilidad.

Tecnologías acuosas: Uso de agua para reducir la viscosidad del ligante asfáltico.

Aditivos químicos: Emulsiones que ayudan a reducir la temperatura de trabajo.

Además de sus beneficios ambientales, las MAT permiten un ahorro de combustible entre un 10% y un 30% durante el proceso de calentamiento de los agregados, lo que también

contribuye a la reducción de emisiones de compuestos tóxicos como dióxido de carbono, dióxido de sulfuro, monóxido de carbono y óxidos nitrosos.

3. Comparación entre MAC y MAT

Aunque las mezclas asfálticas calientes (MAC) han sido el estándar en la construcción de pavimentos durante décadas, las mezclas asfálticas tibias (MAT) ofrecen varias ventajas, especialmente en términos de sostenibilidad y eficiencia. Las MAT, al operar a temperaturas más bajas, no solo reducen el consumo de energía y las emisiones de gases contaminantes, sino que también mejoran las condiciones laborales durante la construcción de la carretera.

Una de las principales ventajas de las MAT sobre las MAC es la reducción significativa de la temperatura de producción y compactación, lo que resulta en un menor impacto ambiental. Además, la menor temperatura de trabajo mejora la trabajabilidad del asfalto, lo que puede facilitar la compactación y garantizar una mayor calidad del pavimento final.

Por otro lado, las mezclas asfálticas calientes (MAC) siguen siendo preferidas en muchos proyectos debido a su larga tradición y la amplia experiencia acumulada en su uso. A pesar de su mayor impacto ambiental y mayores requerimientos de energía, las MAC continúan siendo una opción robusta para una amplia variedad de condiciones climáticas y de tráfico.

Tanto las mezclas asfálticas calientes (MAC) como las mezclas asfálticas tibias (MAT) ofrecen soluciones efectivas para la construcción de pavimentos. Sin embargo, las MAT presentan una alternativa más sostenible y eficiente desde el punto de vista energético, con beneficios tanto para el medio ambiente como para las condiciones de trabajo en obra.

La evolución de las tecnologías de pavimentación asfáltica, incluyendo el desarrollo de las MAT, refleja el creciente enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia energética en la industria de la construcción vial. A medida que la demanda de soluciones más respetuosas con el medio ambiente continúa creciendo, es probable que las MAT ganen terreno frente a las MAC en proyectos viales, especialmente en regiones donde las preocupaciones ambientales son una prioridad.

La implementación de estas tecnologías puede marcar un paso importante hacia la reducción de la huella de carbono en la infraestructura vial y hacia la construcción de pavimentos más duraderos y ecológicos, sin comprometer la calidad y la seguridad.

Beneficios

A continuación se describen los beneficios constructivos asociados al uso de mezclas asfálticas tibias (MAT):

El gradiente de enfriamiento de las mezclas asfálticas tibias (MAT) es menor en comparación con las mezclas asfálticas calientes (MAC), debido a que las primeras presentan una menor diferencia entre la temperatura de la mezcla y la temperatura ambiente. Esto permite transportar la mezcla a mayores distancias y ofrece más tiempo para el proceso de instalación y compactación, como se ilustra en la Figura 3.

Reduce el envejecimiento prematuro potencial, ya que las temperaturas y presiones de producción son más bajas, lo que disminuye la rigidez oxidativa del ligante asfáltico, resultando en una mayor durabilidad del pavimento.

Ofrece la capacidad de compactar mezclas con menos energía gracias a las temperaturas más bajas y a su alta trabajabilidad. Esto también permite la apertura temprana al tráfico.

Permite incorporar mayores porcentajes de concreto asfáltico reciclado.

Diseño Marshall

Cáceres Morales (2007) describe el concepto del método Marshall, desarrollado por el ingeniero de asfalto de Mississippi, Bruce Marshall. Este método tiene como objetivo determinar el contenido óptimo de betún para una combinación específica de agregados. También proporciona información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, determinando la densidad óptima y el contenido de vacíos necesarios durante la construcción del pavimento.

El método Marshall es aplicable únicamente a mezclas bituminosas calientes que emplean cementos asfálticos de viscosidad o permeabilidad adecuada y con un tamaño de agregado de 25 mm o menos. Este procedimiento se utiliza tanto para el diseño en laboratorio como para el control de campo de mezclas asfálticas para pavimentación.

En este método, se preparan probetas estandarizadas de 64 mm de espesor y 103 mm de diámetro. Para cada tipo de mezcla, se crean varias probetas utilizando diferentes tipos de bitumen mediante un proceso específico de calentamiento, mezcla y compactación de los agregados asfálticos. Los parámetros más importantes del diseño de mezclas Marshall incluyen el análisis de densidad-vacío y las pruebas de estabilidad y fluidez de muestras presurizadas.

Preparación del Procedimiento Marshall (AASHTO T 245)

Según Cáceres Morales (2007), los agregados y bitúmenes presentan diferentes características que impactan la calidad del pavimento. El primer paso en el diseño es determinar las

cualidades deseadas para la mezcla de pavimentación (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.), y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir estas propiedades. Una vez seleccionados los materiales, se procede con los ensayos correspondientes.

Selección de Muestras de Materiales

Cáceres Morales (2007) señala que la preparación inicial para los ensayos consiste en reunir muestras representativas del asfalto y del agregado que se utilizarán en la mezcla de pavimentación. Es crucial que las muestras de asfalto y agregado tengan características idénticas a las del asfalto y el agregado que se usarán en la mezcla final, ya que los datos obtenidos en los ensayos determinan la fórmula de la mezcla de pavimentación. Variaciones entre los materiales probados y los utilizados en la obra pueden generar graves problemas, desde una mala trabajabilidad hasta fallas prematuras del pavimento.

Preparación de Agregados

Cáceres Morales (2007) menciona que la relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico debe ser conocida para establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. Los procedimientos preliminares se centran en analizar las características del agregado, lo que incluye secado, determinación de peso específico y análisis granulométrico por lavado.

Secado de Agregados

De acuerdo con Cáceres Morales (2007), el método Marshall requiere que los agregados estén libres de humedad. Para ello, se coloca cada muestra de agregado en una bandeja y se calienta en un horno a 110°C (230°F). El proceso se repite hasta que el peso de la muestra se estabiliza, lo que indica que la humedad ha sido completamente eliminada.

Análisis Granulométrico por Vía Húmeda

El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento utilizado para identificar las proporciones de partículas de diferentes tamaños en las muestras de agregado. Cáceres Morales (2007) detalla los pasos de este proceso: secado y pesaje de las muestras, lavado a través de un tamiz de 0.0075 mm (No. 200) para eliminar el polvo mineral, secado nuevamente y determinación del peso seco de las muestras.

Determinación del Peso Específico

Cáceres Morales (2007) explica que el peso específico de una sustancia es la proporción entre el peso y el volumen de una unidad de esa sustancia comparado con la proporción de peso-volumen de agua. El peso específico del agregado se calcula comparando el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, bajo la misma temperatura.

Preparación de Muestras de Ensayos

Cáceres Morales (2007) explica que las muestras para las pruebas se preparan con diferentes proporciones de betún. Este rango inicial se basa en experimentos previos con los agregados utilizados, y sirve como punto de partida para determinar con precisión el contenido final de betún.

Determinación del Peso Específico Total (AASHTO T166)

Cáceres Morales (2007) aclara que el peso específico total de cada probeta se determina después de que las probetas compactadas se hayan enfriado a temperatura ambiente. Esta medición es esencial para realizar un análisis preciso de densidad y vacíos.

Ensayos de Estabilidad y Fluencia

Cáceres Morales (2007) describe los ensayos de estabilidad y fluencia para medir la resistencia a la deformación de la mezcla y la deformación bajo carga. Las probetas son calentadas a 60°C (140°F), se les aplica una carga a velocidad constante y se registra el valor de la carga máxima como el valor de estabilidad Marshall.

Valor de Estabilidad Marshall

El valor de estabilidad Marshall es la carga máxima que una probeta puede resistir antes de deformarse o fallar. Según Cáceres Morales (2007), las estabilidades extremadamente altas pueden ser contraproducentes, ya que pueden afectar la durabilidad del pavimento.

Valor de Fluencia Marshall

La fluencia Marshall mide la deformación de la probeta bajo carga. Los valores bajos de fluencia y altos valores de estabilidad indican que la mezcla puede ser demasiado rígida, mientras que valores altos de fluencia pueden indicar una mezcla demasiado plástica, susceptible a deformaciones bajo tráfico.

Densidad y Valores de Vacío

Finalmente, Cáceres Morales (2007) menciona que, tras los ensayos de estabilidad y fluencia, se realiza un análisis de densidad y vacíos para determinar el porcentaje de porosidad en la mezcla compactada, lo cual es crucial para asegurar la calidad del pavimento.

III. Resultados

Peso Específico Aparente del Espécimen

El análisis del peso específico aparente de las muestras de asfalto convencional y asfalto modificado con aceite de palma crudo en distintas concentraciones (0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%) muestra diferencias estadísticamente significativas ($F = 4.015$; $p = 0.014$). La media del peso específico aparente para el asfalto convencional fue de 2.38, mientras que para las mezclas con aceite de palma se observaron valores

ligeramente inferiores (2.36 a 2.37), indicando una leve variación en la densidad del material con la adición del biocomponente.

El intervalo de confianza del 95% para la media en el asfalto convencional estuvo entre 2377.34 y 2393.86, mientras que para las mezclas con aceite de palma oscilaron entre 2325.22 y 2401.04, lo que indica una menor variabilidad en las mezclas convencionales. A pesar de esta variabilidad, los resultados sugieren que la inclusión de aceite de palma mantiene un peso específico comparable con el asfalto convencional.

Vacíos con Aire

El análisis de los vacíos con aire en las muestras de asfalto convencional y modificado con aceite de palma no arrojó diferencias estadísticamente significativas ($F = 0.832$; $p = 0.519$). El asfalto convencional presentó una media de 4.62%, mientras que las mezclas con aceite de palma variaron entre 5.37% y 5.50%.

El intervalo de confianza del 95% para la media del asfalto convencional estuvo entre 38.16% y 54.23%, mientras que las mezclas con aceite de palma presentaron valores entre 40.91% y 68.14%. Aunque el porcentaje de vacíos con aire es un indicador clave en la durabilidad y resistencia de la mezcla asfáltica, los resultados sugieren que la adición de aceite de palma no afecta significativamente este parámetro.

Flujo

En cuanto al flujo, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre el asfalto convencional y las mezclas modificadas con aceite de palma ($F = 9.523$; $p = 0.000$). La media del flujo en el asfalto convencional fue de 10.81 (0.01 pulgadas), mientras que las mezclas con aceite de palma presentaron valores superiores (13.00 a 13.33).

El intervalo de confianza del 95% para la media en el asfalto convencional fue de 101.59 a 114.53, mientras que en las mezclas con aceite de palma los valores oscilaron entre 105.15 y 154.84. Esto indica que el asfalto modificado con aceite de palma presenta un mayor flujo, lo que podría estar relacionado con una mayor capacidad de deformación plástica y flexibilidad del material.

Estabilidad Corregida

La estabilidad corregida también presentó diferencias significativas entre las muestras analizadas ($F = 9.019$; $p = 0.000$). El asfalto convencional obtuvo una media de 1377.53, mientras que las mezclas con aceite de palma presentaron valores inferiores, con medias que oscilaron entre 1095.00 y 1244.67.

El intervalo de confianza del 95% para la media del asfalto convencional fue de 1355.38 a 1399.68, mientras que para las mezclas con aceite de palma los valores variaron entre 605.30 y 1578.61. Esto indica una disminución en la estabilidad mecánica con la inclusión de aceite de palma, lo que podría tener implicaciones en la resistencia estructural del pavimento.

Índice de Rigidez

El análisis del índice de rigidez mostró diferencias estadísticamente significativas ($F = 20.144$; $p = 0.000$). El asfalto convencional presentó un índice de rigidez medio de 5063.89, mientras que las mezclas con aceite de palma mostraron valores inferiores (3242.13 a 3676.30).

El intervalo de confianza del 95% para la media del asfalto convencional estuvo entre 48146.26 y 53131.47, mientras que para las mezclas con aceite de palma los valores oscilaron entre 16493.35 y 48349.31. Estos resultados sugieren que la inclusión de aceite de palma reduce la rigidez de la mezcla, lo que podría traducirse en una mayor flexibilidad, pero también en una posible menor capacidad de carga.

.

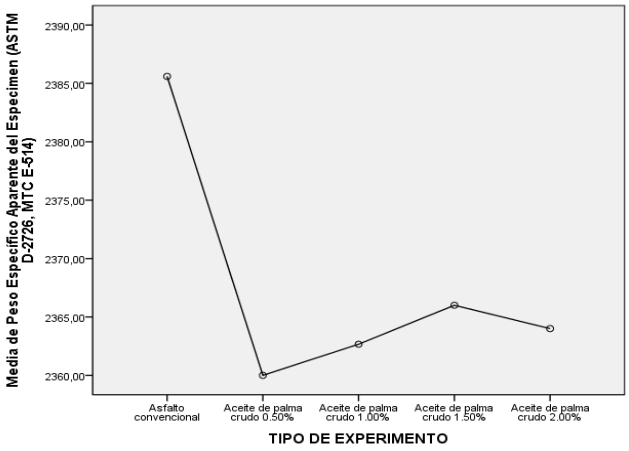
Análisis Comparativo de las Propiedades del Asfalto Convencional y Modificado con Aceite de Palma

Peso Específico Promedio del Asfalto Convencional vs. Asfalto con Aceite de Palma

El análisis del peso específico promedio del asfalto convencional en comparación con el asfalto modificado con aceite de palma en concentraciones de 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0% reveló diferencias estadísticamente significativas. Se encontró que el peso específico del asfalto convencional es de 2.38 cc, mientras que para las mezclas modificadas con aceite de palma, los valores fueron de 2.36 cc para 0.5%, 2.36 cc para 1.0%, 2.37 cc para 1.5% y 2.36 cc para 2.0%. El análisis estadístico reportó un valor de F de 4.05 y un valor de $p < 0.05$, lo que permite rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis del estudio.

Estos resultados indican que el asfalto convencional presenta el mayor peso específico. Sin embargo, al incrementar la proporción de aceite de palma en la mezcla, se observa una reducción en este parámetro (Tabla 5).

Tabla 5: Peso específico promedio según asfalto convencional vs asfalto con aceite de palma al 0.5, 1.0,1.5 y 2.0



F = 4, 015 P = 0,014

Estudios previos, como los de Lopera y Córdova (2013), han mostrado tendencias similares. En su investigación, analizaron el uso del aceite crudo de palma como aditivo en mezclas asfálticas tibias (WMA), logrando una reducción de la viscosidad del asfalto y una disminución en los costos de producción debido a la menor demanda de combustible. La inclusión de aceite de palma como aditivo en Colombia permitió mejorar el desempeño de la mezcla en comparación con las mezclas asfálticas en caliente.

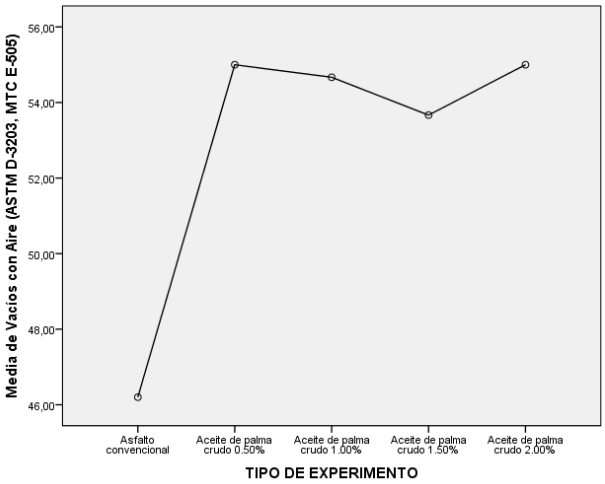
Vacíos de Aire Promedio en el Asfalto Convencional vs. Asfalto con Aceite de Palma

El análisis de los vacíos de aire promedio mostró que el asfalto convencional presenta un valor del 4.62%, mientras que las mezclas con aceite de palma registraron valores de 5.50% para 0.5%, 5.47% para 1.0%, 5.37% para 1.5% y 5.50% para 2.0%. El análisis estadístico arrojó un valor de F de 0.832 y un valor de $p > 0.05$, lo que indica la aceptación de la hipótesis nula.

Estos resultados sugieren que la mayor cantidad de vacíos de aire se encuentra en las mezclas con aceite de palma en concentraciones de 1.0% y 1.5%, sin diferencias significativas entre los grupos estudiados (Tabla 6).

Tabla 6: Vacíos con aire según asfalto convencional vs asfalto con aceite de palma al 0.5, 1.0,1.5 y 2.0

.



F = 0,832 P = 0,519

De manera similar, Usquiano y Villarreal (2018) diseñaron una mezcla asfáltica tibia utilizando aceite crudo de palma, encontrando que la incorporación de este aditivo redujo el porcentaje óptimo de asfalto. La investigación concluyó que el tipo de aceite de palma empleado en mezclas asfálticas tibias debe ser del tipo industrial y recomendó la realización de estudios en tramos de prueba para evaluar su comportamiento en pavimentos flexibles.

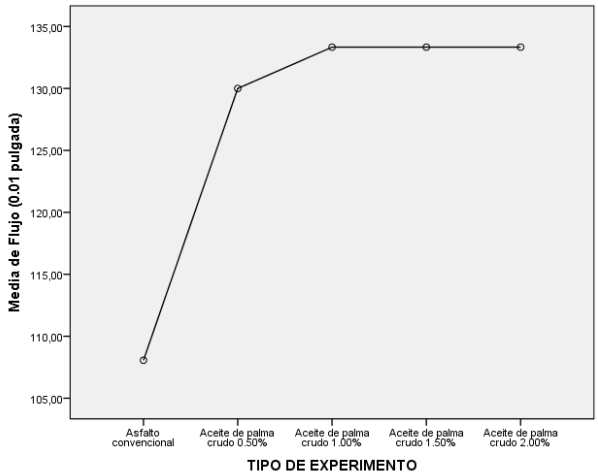
Flujo Promedio en el Asfalto Convencional vs. Asfalto con Aceite de Palma

En cuanto al flujo promedio, se determinó que el asfalto convencional presenta un valor de 10.81 pulg, mientras que las mezclas modificadas con aceite de palma mostraron valores de 13.00 pulg para 0.5%, 13.33 pulg para 1.0%, 13.30 pulg para 1.5% y 13.33 pulg para 2.0%. El análisis estadístico reportó un valor de F de 9.52 y un valor de $p < 0.01$, lo que permite rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis del estudio.

Estos resultados evidencian que el asfalto convencional presenta menor flujo en comparación con las mezclas modificadas, mostrando una tendencia creciente conforme aumenta la proporción de aceite de palma (Tabla 7).

Tabla 7: Flujo según asfalto convencional vs asfalto con aceite de palma al 0.5, 1.0,1.5 y 2.0

.



F = 9, 523 P = 0,000

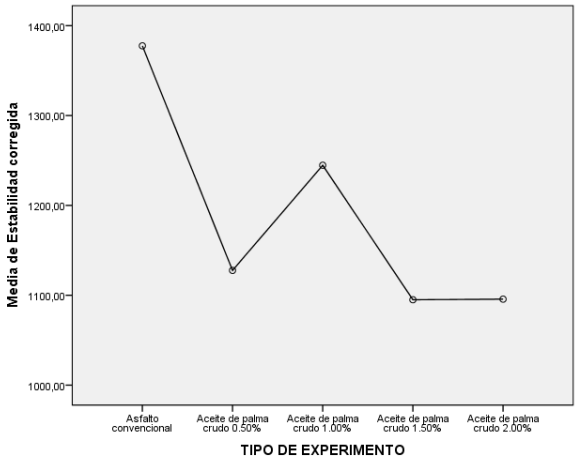
Investigaciones previas, como las de Guevara y Ruiz (2016), han evaluado la incorporación de modificadores en asfaltos, destacando el uso de caucho reciclado de llantas para mejorar el desempeño físico-mecánico de las mezclas asfálticas. Dichos estudios concluyen que la implementación de asfaltos modificados permite reducir la deformación por fatiga y mejorar la sostenibilidad ambiental.

Estabilidad corregida en el Asfalto Convencional vs. Asfalto con Aceite de Palma

En relación con la estabilidad corregida, se encontró que el asfalto convencional presenta un valor de 1377.53 kg, mientras que las mezclas modificadas registraron valores de 1127.67 kg para 0.5%, 1244.67 kg para 1.0%, 1095.00 kg para 1.5% y 1095.67 kg para 2.0%. El análisis estadístico indicó un valor de F de 9.02 y un valor de $p < 0.01$, permitiendo rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis del estudio. Estos resultados sugieren que la estabilidad corregida es mayor en el asfalto convencional y disminuye conforme se incrementa la concentración de aceite de palma en la mezcla (Tabla 8).

Tabla 8: Estabilidad corregida según asfalto convencional vs asfalto con aceite de palma al 0.5, 1.0,1.5 y 2.0

.



F = 9,019 P = 0,000

Estudios como los de De La Cruz y Porras (2015) han evaluado la calidad de las carpetas asfálticas mediante pruebas como la rueda cargada de Hamburgo, utilizando el Método Marshall en proyectos de rehabilitación vial. Dichos estudios concluyeron que el Método Marshall presenta un buen desempeño en condiciones extremas, validando su aplicación en mezclas modificadas.

Índice de Rigidez en el Asfalto Convencional vs. Asfalto con Aceite de Palma

El índice de rigidez fue evaluado en el asfalto convencional y en mezclas modificadas con aceite de palma en concentraciones de 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%. Se determinó que el índice de rigidez disminuye conforme se incrementa la proporción de aceite de palma, lo que sugiere una reducción en la resistencia estructural de la mezcla modificada en comparación con la convencional (Tabla 9).

Tabla 9: Índice de rigidez según asfalto convencional vs asfalto con aceite de palma al 0.5, 1.0,1.5 y 2.0

Índice de rigidez

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Asfalto convencional	15	5063,89	4501,06573	1162,17017	48146,2595	53131,4738	43591,00	57701,00
Aceite de palma crudo 0.50%	3	3419,57	4557,77910	2631,43499	22873,5157	45517,8176	30776,00	39370,00
Aceite de palma crudo 1.00%	3	3676,30	3582,07663	2068,11291	27864,6284	45661,3716	33580,00	40642,00
Aceite de palma crudo 1.50%	3	3242,13	6411,87565	3701,89813	16493,3512	48349,3154	28608,00	39824,00
Aceite de palma crudo 2.00%	3	3244,00	6476,96140	3739,47541	16350,3359	48529,6641	28492,00	39915,00
Total	27	4322,38	9628,51609	1853,00879	39414,9007	47032,7289	28492,00	57701,00

F = 20, 144 P = 0,000

Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que han analizado la incorporación de aditivos en mezclas asfálticas, destacando la necesidad de estudios complementarios en campo para validar su aplicabilidad en pavimentación de carreteras.

Conclusiones:

Se determinó que el asfalto convencional presenta el mayor peso específico; sin embargo, a medida que se incrementa la proporción de aceite de palma en la mezcla, también aumenta el peso específico.

La mayor cantidad de vacíos en la mezcla se observó en las formulaciones con 1% y 1.5% de aceite de palma, sin diferencias significativas entre los grupos analizados, lo que indica que el porcentaje de vacíos no varía de manera relevante con la adición del aceite.

El flujo de la mezcla asfáltica aumenta proporcionalmente con la concentración de aceite de palma, siendo el asfalto convencional el que presenta el menor flujo.

La estabilidad corregida de la mezcla asfáltica es mayor en el asfalto convencional, mientras que el incremento en la concentración de aceite de palma disminuye significativamente la estabilidad corregida.

El índice de rigidez es mayor en el asfalto convencional y tiende a reducirse a medida que se incrementa la concentración de aceite de palma en la mezcla.

Recomendaciones

Se recomienda el uso de aceite de palma como aditivo en la mezcla asfáltica solo en casos donde el empleo del asfalto convencional no sea viable o cuando se busquen alternativas con mayor disponibilidad local.

La incorporación de aceite de palma en mezclas asfálticas debe priorizarse en regiones donde este insumo sea abundante, con el fin de adaptar las mezclas a las condiciones climáticas y ambientales específicas del entorno.

Es fundamental realizar estudios complementarios que evalúen el desempeño mecánico y la durabilidad de las mezclas asfálticas con aceite de palma en distintas condiciones de carga y temperatura.

Se recomienda explorar el uso de otros aditivos en combinación con el aceite de palma para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica y garantizar su aplicabilidad en infraestructuras viales.

Se sugiere la implementación de normativas y protocolos que regulen el uso de aceite de palma en mezclas asfálticas, asegurando su viabilidad técnica y su impacto ambiental en la infraestructura vial.

Discusión

La incorporación de aceite de palma crudo en mezclas asfálticas ha sido objeto de diversas investigaciones que buscan mejorar las propiedades mecánicas y ambientales de los pavimentos. Este análisis se centra en evaluar los efectos de dicha adición, considerando aspectos como la sostenibilidad, el rendimiento mecánico y las implicaciones económicas.

Sostenibilidad y Reducción de Temperatura

Una de las principales ventajas de utilizar aceite de palma en mezclas asfálticas es la posibilidad de reducir la temperatura de producción y compactación. Estudios han demostrado que la adición de aceite de palma puede disminuir la viscosidad del asfalto, permitiendo la fabricación de mezclas a temperaturas más bajas sin comprometer sus propiedades mecánicas (Lopera & Córdova, 2013). Esta reducción de temperatura conlleva una disminución en el consumo de energía y, por ende, una menor emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo a prácticas de construcción más sostenibles.

La modificación del asfalto con aceite de palma influye en diversas propiedades mecánicas de la mezcla. Por ejemplo, se ha observado que la adición de aceite de palma puede mejorar la flexibilidad de la mezcla, lo que es beneficioso para absorber deformaciones sin agrietarse (Ortega De La Vega, 2021). Sin embargo, es crucial determinar la dosificación óptima, ya que cantidades excesivas podrían reducir la estabilidad y resistencia de la mezcla. Investigaciones sugieren que una adición del 1% al 3% de aceite de palma es efectiva para mejorar las propiedades sin comprometer la integridad estructural (Lopera & Córdova, 2013).

La durabilidad de las mezclas asfálticas es un factor crítico, especialmente en climas húmedos. La adición de aceite de palma puede influir en la resistencia de la mezcla a la acción del agua. Algunos estudios indican que la incorporación de aceite de palma mejora la adhesión entre el asfalto y los agregados, reduciendo la susceptibilidad al daño por humedad (Ortega De La Vega, 2021). No obstante, es necesario realizar evaluaciones a largo plazo para confirmar estos hallazgos y asegurar que la mezcla mantenga su integridad en diversas condiciones ambientales.

Desde una perspectiva económica, el uso de aceite de palma como aditivo en mezclas asfálticas puede ser beneficioso, especialmente en regiones productoras de palma. La disponibilidad local de este recurso puede reducir los costos asociados con la importación de aditivos tradicionales. Además, la reducción en la temperatura de producción disminuye el consumo de combustible, generando ahorros adicionales (Lopera & Córdova, 2013). Sin embargo, es importante considerar las fluctuaciones en el mercado del aceite de palma y evaluar la viabilidad económica a largo plazo.

Aunque el uso de aceite de palma presenta ventajas ambientales, también es necesario considerar los posibles impactos negativos asociados con su producción. La expansión de plantaciones de palma ha sido vinculada con la deforestación y la pérdida de biodiversidad en algunas regiones (Ortega De La Vega, 2021). Por lo tanto, es esencial asegurar que el aceite de palma utilizado provenga de fuentes sostenibles y certificadas, minimizando así el impacto ambiental y promoviendo prácticas responsables.

Conclusiones

La adición de aceite de palma crudo en mezclas asfálticas ofrece múltiples beneficios, incluyendo la reducción de la temperatura de producción, mejoras en la flexibilidad y potenciales ventajas económicas. Sin embargo, es fundamental realizar una evaluación integral que considere las propiedades mecánicas, la durabilidad, los impactos ambientales y la viabilidad económica. Futuras investigaciones deben enfocarse en determinar las dosificaciones óptimas, evaluar el desempeño a largo plazo y asegurar que las prácticas de producción del aceite de palma sean sostenibles..

Agradecimientos

A la Universidad Ricardo Palma por sus laboratorios y asesores teóricos y a la PUCP por sus asesores metodológicos y estadísticos para la realización de esta investigación.

Referebcias

[1] Alarcón, A. (2016). Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente, empleando cal, en los aeropuertos del sur de Perú (Tesis, pp. 58-59). Recuperado de http://repositorio.uancv.edu.pe/bitstream/handle/UANCV/727/TESIS%20DE%20ADELAIDA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[2] Alarcón, J. (2003). Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta (Tesis doctoral). Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93221/11CAPITULO4a.pdf?sequence=11&isAllowed=y

[3] Álvarez, A., Aaron, A., & Kirby, C. (2013). Evaluación de laboratorio de la compactibilidad y el desempeño de mezclas asfálticas tibias. Revista EIA, (19), 111-121. Recuperado de http://www.redalyc.org/pdf/1492/149228694010.pdf

[4] Álvarez, A., Carvajal, J., & Reyes, O. (2012). Estructura interna de mezclas asfálticas tibias compactadas en laboratorio. DYNA, 79(172), 38-45. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532012000200004

[5] Álvarez, A., Macías, N., & Fuentes, L. (2012). Análisis de vacíos conectados en mezclas asfálticas tibias. DYNA, 79(172), 29-37. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S001273532012000200003&script=sci_arttext&tlng=en

[6] Andrade, S. (2015). Características de la mezcla asfáltica (Tesis, pp. 20-22). Recuperado de https://es.scribd.com/document/338072948/Tesis-Estudio-Para-Conocer-La-Resistencia-Al-Desgaste-de-Una-Mezcla-Asfaltica-Tibia-Empleando-Aditivo-Tb1

[7] Cáceres, C. (2007). Diseño de Marshall (Tesis, pp. 4-11). Recuperado de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo_1.html

[8] Caputo, P., Porto, M., & Loise, V. (2020). The role of additives in warm mix asphalt technology: An insight into their mechanisms of improving an emerging technology. Nanomaterials, 10(6), 1202. Recuperado de https://www.mdpi.com/2079-4991/10/6/1202

[9] Celis, L., & Serrano, C. (2008). Diseño de mezcla asfáltica tibia (Tesis, pp. 55-56). Recuperado de http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1921/2/128645.pdf

[10] Cutti, E. (2019). Aceites vegetales para reducción de temperatura de mezcla y su efecto en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas tibias para el diseño de la Av. Leoncio Prado Chilca - Huancayo 2019 (Tesis de ingeniería civil). Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6968/T010_45592399_T.pdf?sequence=1

[11] D'Angelo, J., Kvasnak, A., Dongre, R., Turner, P., & Corrigan, M. (2021). Effect of bio-based modifiers on the performance of warm mix asphalt binders. Journal of Materials in Civil Engineering, 33(4), 04021019. Recuperado de https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0003975

[12] De La Cruz, P., & Porras, M. (2015). Evaluación de desempeño de mezclas asfálticas en caliente diseñadas por la metodología Marshall con el ensayo de la rueda cargada de Hamburgo para el proyecto de rehabilitación de la carretera dv Imperial-Pampas (Tesis de ingeniería civil). Universidad Ricardo Palma. Recuperado de https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/2188/delacruz_p-porras_mj.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[13] Guevara, J., & Ruiz, R. (2016). Análisis comparativo de áridos del sector El Milagro estabilizados con asfalto de caucho reciclado y asfalto convencional para capas bases (Tesis de ingeniería civil). Universidad Privada Antenor Orrego. Recuperado de https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/20.500.12759/3564/1/REP_ING.CIVIL_JIM.GUEVARA_ROBERTO.RUIZ_AN%C3%81LISIS.COMPARATIVO.%C3%81RIDOS.SECTOR.EL.MILAGRO.ESTABILIZADOS.ASFALTO.CAUCHO.RECICLADO.ASFALTO.CONVENCIONAL.CAPAS.BASES.pdf

[14] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). Climate change and land: An IPCC special report. Cambridge University Press. Recuperado de https://www.ipcc.ch/srccl/

[15] Lopera, C., & Córdoba, J. (2013). Diseño de mezcla asfáltica tibia a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma. DYNA, 80(179), 99-108. Recuperado de http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n179/v80n179a11.pdf

[16] Manual de Carreteras, EG – 2013. Especificaciones técnicas generales para construcción. (2013). Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Recuperado de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf

[17] Méndez, G., Moran, J., & Pineda, L. (2014). Diseño de mezcla asfáltica tibia, mediante la metodología Marshall, utilizando asfalto espumado (Tesis, pp. 182-183). Recuperado de http://ri.ues.edu.sv/6286/1/Dise%C3%B1o%20de%20mezcla%20asf%C3%A1ltica%20tibia%2C%20mediante%20la%20metodolog%C3%ADa%20Marshall%2C%20utilizando%20asfalto%20espumado.pdf

[18] Padilla, A. (2004). Mezclas asfálticas calientes (MAC). Revista, (3), 47-48. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14

[19] Perleche, J., & Vilchez, G. (2015). Diseño de una mezcla asfáltica en caliente con adición de cal hidratada en el departamento de Lambayeque (Tesis de ingeniería civil). Recuperado de http://repositorio.uss.edu.pe/xmlui/bitstream/handle/uss/1070/INGENIER%C3%8DA%20CIVIL.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[20] United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). Sustainable infrastructure for climate resilient development. Nairobi, Kenia. Recuperado de https://www.unep.org/resources/report/sustainable-infrastructure-climate-resilient-development

[21] Usquiano Tantalean, I. A., & Villarreal Guimarey, J. F. B. (2018). Diseño de una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de palma. INGnosis, 4(1), 41-47. Recuperado de https://www.readcube.com/articles/10.18050%2Fingnosis.v4i1.2060

[22] World Bank. (2020). Movilidad sostenible para un futuro con baja emisión de carbono. Washington, D.C. Recuperado de https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33320

.