Efecto del aceite crudo de palma como aditivo modificador en una mezcla asfáltica usando productos del departamento de Nariño

Autores:

Ana Gabriela Moncayo Obando

Asly Camila Solarte Delgado

Bryan Camilo Toro Guerra

Lina María Solarte Rodríguez

Universidad Mariana

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

San Juan de Pasto

2024

Efecto del aceite crudo de palma como aditivo modificador en una mezcla asfáltica usando productos del departamento de Nariño

.

Autores:
Ana Gabriela Moncayo Obando
Asly Camila Solarte Delgado
Bryan Camilo Toro Guerra
Lina María Solarte Rodríguez

Informe de investigación para optar al título de: Ingeniero Civil

Juan Diego Muñoz Ordoñez
Ingeniero Civil
Asesor

Gerardo Andrés Dorado Jurado
Ingeniero Civil Mg

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
San Juan de Pasto
2024

Contenido

1. Resumen del proyecto 9
1.1. Resumen 9
1.2. Introducción 10
1.3. Descripción del problema 12
1.4. Formulación del problema 13
1.5. Justificación 13
1.6. Objetivos 14
1.6.1. Objetivo general 14
1.6.2. Objetivos Específicos 14
1.7. Antecedentes 14
1.7.1. Internacionales 15
1.7.2. Nacionales 18
1.8. Metodología 20
1.9. Cumplimento del primer objetivo 21
1.9.1. Revisión bibliográfica de documentos 22
1.9.2. Solicitud de materiales. 22
1.9.3. Caracterización física y reológica del cemento asfáltico base 22
1.10. Cumplimiento del segundo objetivo. 26
1.10.1. Revisión bibliográfica de documentos 26
1.10.2. Determinación de la composición física del aceite crudo de palma 27
1.10.3. Interpretación de los resultados 29
1.11. Cumplimiento del tercer objetivo 29
1.11.1. Adición de porcentaje de aceite crudo de palma al cemento asfáltico base 29
1.11.2. Mezclado del aceite crudo de palma y el cemento asfáltico 30
1.11.3. Ensayos físicos y reológicos al cemento asfáltico modificado 30
1.12. Cumplimiento del cuarto objetivo 30
1.12.1. Caracterización de Agregado Grueso y Fino 30

1.12.2. Diseño Marshall 39

1.12.3. Variables 45

2. Presentación de resultados 46

2.1. Propiedades del cemento asfáltico base 46

2.1.1. Caracterización física del cemento asfáltico base 46

2.1.2. Caracterización reológica del cemento asfáltico base 47

2.2. Propiedades del aceite crudo de palma 48

2.2.1. Determinación de la composición física del aceite crudo de palma 48

2.3. Propiedades del cemento asfáltico modificado con aceite de palma 49

2.3.1. Ensayos físicos al cemento asfáltico modificado 49

2.3.2. Ensayos reológicos al cemento asfáltico modificado 51

2.3.3. Determinación del porcentaje de aceite crudo de palma óptimo 52

2.4. Diseño Marshall para briquetas convencionales y modificadas 53

2.4.1. Caracterización de Agregado Grueso y Fino 53

2.4.2. Diseño Marshall 56

3. Conclusiones 64

4. Recomendaciones 67

Referencias bibliográficas 68

Anexos 72

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo para desarrollo de los objetivos 21
Figura 2: Copa abierta de Cleveland 23
Figura 3: Equipo ensayo de penetración 23
Figura 4: Viscosímetro rotacional 24
Figura 5: Equipo para ensayo de punto de ablandamiento 25
Figura 6: Muestras para ensayo 25
Figura 7: Reómetro Anton Paar 26
Figura 8: Equipo para ensayo punto de ebullición 27
Figura 9: humedad y material volátil 28
Figura 10: Índice de refracción 29
Figura 11: Granulometría: A) Inicio del proceso, B) Separación de fracciones 31
Figura 12: Calibrador de espesores longitudes 33
Figura 14: Inmersión agregado grueso 34
Figura 15: Secado superficial de las partículas 34
Figura 16: Fracciones para máquina de los Ángeles: A) retenido ½", B) retenido 3/8", C) retenido ¼", D) retenido No. 4 36
Figura 17: A) Muestra después del ensayo, B) Tamizaje de la muestra 36
Figura 18: Prueba del cono de arena A) Muestra descartada, B) Muestra aprobada 37
Figura 19: Proceso equivalente de arena 39
Figura 20: Equipo para determinar la gravedad especifica máxima teórica 43
Figura 21: Curva de viscosidad 47
Figura 22: Graficas análisis reológico; A) muestra 1, B) muestra 2 48
Figura 23: Viscosidades de todos los ligantes 49
Figura 24: Curva granulométrica 54
Figura 25: Elaboración de briquetas 58

Índice de tablas

Tabla 1: Temperaturas de mezclado y compactación 50
Tabla 2: Punto de ablandamiento al ligante modificado 51
Tabla 3: Propiedades reológicas de los ligantes modificados 52
Tabla 4: Resumen de datos cemento asfáltico normal y modificado 52
Tabla 5: Datos granulometría 53
Tabla 6: Resultados gravedad específica agregado grueso 54
Tabla 7: Resultados gravedad agregado fino.....55
Tabla 8: Lectura y resultado de equivalente de arena 56
Tabla 9: Cantidad en gramos de material necesario.....57
Tabla 10: Valores de gravedad, densidad y absorción de especímenes 58
Tabla 11: Resultados parciales estabilidad y flujo 59
Tabla 12: Datos de gravedad específica máxima teórica 59
Tabla 13: Resumen de datos análisis volumétrico mezcla asfáltica modificada.....61
Tabla 14: Comparativa de datos mecánicos y volumétricos mezclas asfálticas 62

Índice de anexos

Anexo 1: Tamices a utilizar 72
Anexo 2: Masa de la muestra partículas fracturadas....72
Anexo 3: Grupo de tamices partículas alargadas y planas....73
Anexo 4: Masa mínima a utilizar partículas alargadas y planas 73
Anexo 5: Masa mínima de la muestra gravedad especifica agregado grueso....73
Anexo 6: Masa de las fracciones desgaste en máquina de los ángeles 74
Anexo 7: Número de esferas y masa....74
Anexo 8: Fracciones por tamices 75
Anexo 9: Datos obtenidos de punto de inflamación 75
Anexo 10: Resultados penetración....76
Anexo 11: Resultados índice de penetración 77
Anexo 12: Resultados reología muestra 1....77
Anexo 13: Resultados reología muestra 2....78
Anexo 14: Reología cemento asfáltico + 2.0% de aceite....79
Anexo 15: Reología cemento asfáltico + 2.5% de aceite....80
Anexo 16: Reología cemento asfáltico + 3.0% de aceite....80
Anexo 17: Reología cemento asfáltico + 3.5% de aceite....81
Anexo 18: Reología cemento asfáltico + 4.0% de aceite....81
Anexo 19: Limites granulométricos....81
Anexo 20: Ajuste granulométrico 82
Anexo 21: Cumplimiento limites granulométricos 82
Anexo 22: Resultados índice de alargamiento 82
Anexo 23: Resultados índice de aplanamiento 83
Anexo 24: Resultados de laboratorio gravedad agregado grueso 83
Anexo 25: Resultados máquina de los ángeles 83
Anexo 26: Datos del agregado fino para ensayo de gravedad especifica 83
Anexo 27: Coeficiente porcentaje optimo....84
Anexo 28: Dosificación para cada porcentaje de cemento asfáltico....84
Anexo 29: Datos gravedad específica bulk, densidad y absorción 85
Anexo 30: Datos parciales de estabilidad y flujo....86

Anexo 31: Datos para selección de cemento asfáltico optimo.....87
Anexo 32: Grafica contenido de cemento asfáltico Vs vacíos.....87
Anexo 33: Grafica contenido de cemento asfáltico Vs vacíos en el agregado mineral 88
Anexo 34: Grafica contenido de cemento asfáltico Vs vacíos llenos de cemento asfáltico 88
Anexo 35: Grafica contenido de cemento asfáltico Vs estabilidad 89
Anexo 36: Grafica contenido de cemento asfáltico Vs flujo 90
Anexo 37: Grafica contenido de cemento asfáltico Vs Estabilidad / flujo 90

Resumen del proyecto

1.1. Resumen

El propósito principal de la investigación consistió en evaluar el efecto del aceite crudo de palma proveniente de Tumaco en una mezcla asfáltica con agregados y cemento asfáltico de la región de Nariño, con el fin de transformar las propiedades del cemento asfáltico y generar un menor consumo energético en su elaboración. A diferencia de otros estudios que han explorado el uso de aceites vegetales en mezclas asfálticas, esta investigación se centra específicamente en el comportamiento del aceite crudo de palma de Tumaco, cuyas características particulares pueden generar interacciones diferentes con el cemento asfáltico en comparación con otros aceites de otras regiones.

Usualmente, en el departamento de Nariño se usan las mezclas asfálticas calientes con un alto consumo energético como método de pavimentación de vías, las cuales requieren 697.7 MJ de consumo de energía debido al abundante calor necesario para preparar los materiales, esta mezcla modificada a su vez reducirá el impacto de la huella de carbono de la producción de la mezcla. Para llevar a cabo esta investigación se inició con la caracterización física y reológica del cemento asfáltico mediante diferentes laboratorios de la normativa INVIAS, por otra parte, considerando que cada tipo de aceite vegetal interactúa de manera única con el cemento asfáltico, se realizaron pruebas con diferentes porcentajes de aceite crudo de palma de Tumaco para determinar, según los resultados de los ensayos, el óptimo porcentaje de aceite para la mezcla. Por último, se realizaron briquetas de mezcla asfáltica mediante el método Marshall con el fin de evaluar las propiedades mecánicas de estas, así como el efecto del aceite crudo de palma de Tumaco en la nueva mezcla asfáltica, analizando si cumple con todas las especificaciones descritas en la normativa INVIAS.

Abstract

The main purpose of the research was to evaluate the effect of crude palm oil from Tumaco on an asphalt mixture with aggregates and asphalt cement from the Nariño region, with the aim of transforming the properties of asphalt cement and generating lower energy consumption in its production. Unlike other studies that have explored the use of vegetable oils in asphalt mixtures,

this research focuses specifically on the behavior of crude palm oil from Tumaco, whose particular characteristics may generate different interactions with asphalt cement compared to other oils from other regions.

Usually, in the department of Nariño, hot asphalt mixtures with high energy consumption are used as a method of paving roads, which require 697.7 MJ of energy consumption due to the abundant heat needed to prepare the materials, this modified mixture in turn will reduce the carbon footprint impact of the mixture production. To carry out this research, we started with the physical and rheological characterization of the asphalt cement by means of different laboratories of the INVIAS standards. On the other hand, considering that each type of vegetable oil interacts in a unique way with the asphalt cement, tests were carried out with different percentages of crude palm oil from Tumaco to determine, according to the results of the tests, the optimum percentage of oil for the mixture. Finally, asphalt mix briquettes were made using the Marshall method in order to evaluate their mechanical properties, as well as the effect of the Tumaco crude palm oil on the new asphalt mix, analyzing whether it complies with all the specifications described in the INVIAS regulations.

1.2. Introducción

La infraestructura vial es un apoyo de gran importancia para el crecimiento y desarrollo de un país, proporcionando una base esencial para el funcionamiento de todas las economías nacionales y genera una amplia gama de beneficios económicos y sociales (Carretera, 2014). En Colombia, según el Grupo de Logística del Ministerio de Transporte y con información del Registro Nacional de Despachos de Carga (RNDC), durante el primer trimestre de 2024 se movilizaron por las vías del territorio nacional un total de 34.995.401 toneladas de carga, transportadas por 2.304 empresas utilizando 127.543 vehículos, lo que generó 2.902.460 manifiestos de carga y representó un importante movimiento logístico a nivel nacional, incluyendo más de 1.452 millones de galones en carga líquida, mostrando un incremento del 15.3% respecto al mismo período del año anterior. Pese a la alta demanda e importancia de las carreteras, el estado de la infraestructura en el país afecta directamente el desarrollo económico y, particularmente, limitando el crecimiento de algunas regiones con respecto a otras.

Según el INVIAS para el primer semestre del 2024, Colombia contaba con una red vial que incluía 4184.43 km de vías pavimentadas en buen estado y 6299.13 km de carreteras en mal estado y sin pavimentar. A pesar de que departamentos como Nariño cuentan con 496.61 km de vías pavimentadas en buen estado, la situación general del país es preocupante, pues más del 60% de la red vial nacional se encuentra en condiciones deficientes o sin pavimentar, lo que afecta la movilidad, el desarrollo económico y la calidad de vida de los habitantes. Por lo tanto, es importante encontrar alternativas que mejoren las propiedades de las mezclas asfálticas, a través de estudios y proyectos que generen los mismos o mayores beneficios, a menores costos e impactos ambientales.

.

Para abordar esta problemática, en la actualidad existen diferentes estudios sobre la modificación de componentes de la mezcla asfáltica o la incorporación de aditivos al ligante asfáltico para mejorar sus propiedades. Entre estos aditivos se encuentra el aceite de la palma de aceite africana, una alternativa que puede actuar como reductor de viscosidad, mejorador de la resistencia mecánica y productor de mezclas asfálticas a menores temperaturas (Lopera Palacio, 2011). Así lo muestra el estudio titulado "Diseño de mezclas asfálticas tibias utilizando aceite crudo de palma como reductor de viscosidad".

Nariño es un departamento de gran diversidad de flora, aunque algunas especies, como la palma de aceite, no son nativas de la región. No obstante, en la costa pacífica de Nariño, la palma de aceite se ha establecido como un cultivo importante, alcanzando en 2021 una extensión de 22,239 hectáreas, con una producción promedio de 3 toneladas de aceite crudo por hectárea (Fedepalma, 2021). Esta disponibilidad local del recurso, sumada a la necesidad de mejorar la infraestructura vial del país y del departamento, motiva que esta investigación se centre en la implementación de productos propios de la región, considerando que los aceites crudos de palma de diferentes regiones tienen incidencias distintas en las propiedades de las mezclas asfálticas, debido a variaciones en sus características según las condiciones geográficas y climáticas de cada zona. Por ello, esta investigación utiliza productos de la región, explorando el potencial del aceite crudo de palma de Tumaco como agente modificador de las propiedades del cemento asfáltico y mezclas asfálticas producidas con agregados y cemento asfaltico del departamento. Posteriormente, se evalúan y comparan sus características de desempeño con el cemento asfáltico convencional.

1.3. Descripción del problema

La pavimentación de vías mediante mezclas asfálticas calientes se encuentra en una encrucijada entre los avances tecnológicos, los desafíos ambientales y la creciente demanda de infraestructura de transporte de calidad. Según el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), solo el 39.91% de la Red Vial de Colombia se encuentra en un estado favorable. En el departamento de Nariño, INVIAS (2023) reporta 708.57 km de vías pavimentadas, de las cuales el 69% está en buena o muy buena condición. Adicionalmente, existen 224.59 km pavimentados que no se encuentran en estado deficiente. Si bien Nariño se destaca como uno de los departamentos con mayor extensión de vías pavimentadas en el país, es necesario seguir trabajando en el mejoramiento del estado de las vías restantes, además, las estadísticas de Nariño pueden servir para que otros departamentos redoblen esfuerzos en la construcción y mantenimiento de su red vial.

Usualmente en el departamento de Nariño se implementan las Mezclas Asfálticas Calientes como método de pavimentación de vías. Este proceso de producción de mezclas asfálticas, sin embargo, conlleva un consumo de energía significativo, principalmente debido al calentamiento de los materiales, la operación de equipos y el transporte. De hecho, se observa que el consumo de energía depende de varios factores, como la composición de los materiales de la región, la temperatura de mezcla, el tipo de planta de mezcla utilizada y la tecnología empleada (Usquiano Tantalean & Villarreal Guimarey, 2018). La eficiencia energética en cada etapa del proceso y el uso de tecnologías más avanzadas pueden ayudar a minimizar este consumo.

Ante esta problemática, una solución innovadora que se está explorando es el uso del aceite crudo de palma como modificador del cemento asfáltico base. Esta alternativa busca producir mezclas asfálticas con propiedades similares a las convencionales, pero a una menor temperatura de producción. El uso de este recurso local abundante en Colombia, junto con otras estrategias como la implementación de tecnologías más eficientes y el reciclaje de materiales, podría contribuir significativamente a reducir el consumo energético y el impacto ambiental en la producción y aplicación de mezclas asfálticas en el departamento de Nariño y en todo el país.

1.4. Formulación del problema

¿Cuál es el efecto del aceite crudo de palma de Tumaco como aditivo modificador en las propiedades físicas y reológicas de una mezcla asfáltica modificada?

1.5. Justificación

El departamento de Nariño, siendo un productor de aceite de palma, apoya la implementación de aceite crudo de palma en el sector de la construcción vial como un recurso local, el cual contribuiría a reducir los costos de producción y transporte del cemento asfáltico debido a la disminución en las temperaturas de mezclado. El aceite crudo de palma proveniente de la región, es una alternativa en las mezclas asfálticas, que puede reducir el consumo de energía en su producción. En lugar de producir la mezcla a altas temperaturas (generalmente entre 160°C y 190°C), el aceite crudo de palma permitirá producir la mezcla asfáltica a temperaturas más bajas (generalmente entre 120°C y 150°C); (J. F. B., 2018).

La producción de una mezcla asfáltica con adición de aceite crudo de palma requiere menos energía que la producción de mezclas asfálticas convencionales, ya que no se necesita calentar los materiales a altas temperaturas lo que reduce aún más el consumo de energía y la huella de carbono de la producción de la mezcla, se estima que esta sustitución de aceite de palma en cemento asfáltico puede reducir la huella de carbono en un rango que va desde un 20% hasta un 60% en comparación con el uso de cemento asfáltico convencional derivado del petróleo (Lopera Palacio, 2011).

El aceite crudo de palma es un producto vegetal que ha ganado interés en la industria de la construcción y pavimentación como un posible componente en mezclas asfálticas. Sus características químicas y mecánicas pueden influir en su aplicabilidad en este contexto ya que son beneficiosas para la resistencia y durabilidad de las mezclas asfálticas. El aceite crudo de palma en las mezclas asfálticas ofrece grandes soluciones ambientales ya que es una fuente de carbono renovable y limita la liberación de gases de efecto invernadero, además, de la reducción del consumo de combustible y la prolongación de la vida útil de los pavimentos; (J. F. B.,2018). Las mezclas asfálticas con adición de aceite crudo de palma tienen una mejor compactibilidad y una

mayor durabilidad que las mezclas asfálticas convencionales, lo que significa que pueden ser más resistentes a la deformación y las grietas; (J. F. B., 2018).

1.6. Objetivos

1.6.1. *Objetivo general*

Evaluar el efecto del aceite crudo de palma proveniente de Tumaco como aditivo modificador en las propiedades reológicas y mecánicas de una mezcla asfáltica modificada utilizando la normativa INVIAS.

1.6.2. *Objetivos específicos*

- Encontrar las propiedades físicas y reológicas del cemento asfáltico base según la normativa INVIAS.
- Interpretar las propiedades físicas del aceite crudo de palma para uso como modificador del cemento asfáltico. determinar
- Investigar el porcentaje de aceite de palma óptimo para la modificación del cemento asfáltico base mediante pruebas físicas y reológicas.
- Diseñar una mezcla asfáltica convencional y una modificada con aceite crudo de palma con el método Marshall.

1.7. Antecedentes

Para llevar a cabo esta investigación, es necesario realizar una revisión previa para conocer, comprender y analizar el comportamiento de la materia por separado, así como el comportamiento al mezclar el ligante asfáltico con el aceite crudo de palma y otros aditivos. Este análisis estudia la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y el comportamiento mecánico y reológico de las mezclas asfálticas y el cemento asfáltico modificado con aceite de palma. En este trabajo investigativo, se citan investigaciones internacionales y nacionales, las cuales han puesto en práctica trabajos realizados sobre la implementación e investigación de las mezclas asfálticas, el aceite crudo de palma u otros aditivos por sí solos, así como su aplicación en conjunto.

1.7.1. *Internacionales*

1.7.1.1. Asphalt mixtures emission and energy consumption. El estudio realizado en Brasil en la Universidad Federal Santa Catarina, examinó las mezclas de cemento asfáltico y el consumo de energía. Thives y Ghisi (2017), evaluaron los diferentes tipos de mezclas asfálticas en cuanto al consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO2) en la producción de mezclas asfálticas como mezclas frías, mezclas tibias, mezclas de asfalto-caucho, mezclas con pavimento asfáltico recuperado, etc. Ya que la construcción de pavimentos requiere energía y genera emisiones de gases de efecto invernadero que impactan el medio ambiente.

Al analizar el consumo de energía de cada uno de los tipos de cemento asfáltico, se encontró que los compuestos de hormigón de cemento portland son los que tienen las emisiones de dióxido de carbono y un consumo de energía mayor en comparación con las demás mezclas asfálticas, esto debido a los combustibles utilizados para producir estas mezclas de pavimentos. Thives y Ghisi (2017), concluyeron que es importante controlar el parámetro de contenido de humedad de los agregados implementando nuevas tecnologías que permitan reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de mezclas asfálticas.

1.7.1.2. Diseño de mezclas asfálticas tibias utilizando aceite crudo de palma como reductor de viscosidad. Un estudio en la Universidad de San Carlos, Guatemala, evaluó el potencial del aceite crudo de palma africana como reductor de viscosidad en mezclas asfálticas tibias. Siguiendo normas ASTM, se realizaron ensayos de viscosidad a 135° y 165°, gravedad específica, entre otros. García Ávila (2015) agregó diferentes porcentajes de aceite crudo de palma a la mezcla asfáltica, desde 0% hasta 3% en incrementos de 0.5%, para determinar su efectividad en la producción de mezclas asfálticas tibias.

Los resultados muestran que, al aumentar el porcentaje de aceite, propiedades como viscosidad, gravedad específica y punto de ablandamiento disminuyen. García Ávila (2015) explica que la gravedad específica del cemento asfáltico disminuye debido a la densidad del aceite. El aceite de palma, al ser más blando, aumenta el punto de ablandamiento y la penetración del cemento asfáltico a mayor proporción en la mezcla. El autor concluye que agregar un 3% de aceite de palma reduce

significativamente las temperaturas de mezclado y compactación sin afectar el desempeño, lo que lo convierte en un efectivo aditivo reductor de viscosidad, especialmente en climas no cálidos.

1.7.1.3. Propuesta de diseño de mezcla asfáltica en caliente modificado con aceite de palma para la reducción de emisiones de gases contaminantes en la construcción del tramo de la carretera Huánuco – La Unión 2021. Esta investigación se llevó a cabo en Huánuco, Perú, en la Universidad Nacional Hermilio Valdizán. Es una propuesta que analiza los efectos de agregar aceite de palma al diseño de mezcla convencional. Aliaga Cueva y Pulido Cornelio (2022) desarrollaron briquetas utilizando la metodología Marshall para una muestra patrón y otra modificada, con el fin de determinar la cantidad óptima de ligante asfáltico para una mezcla asfáltica. Antes de compactarse, las briquetas se sometieron al equipo Medidor de CO2 – YEM 40L, que registró las emisiones durante la mezcla de los agregados con el cemento asfáltico.

Los resultados de la muestra patrón mostraron que, a mayor porcentaje de cemento asfáltico, menores vacíos y mayor densidad, eligiéndose un 6.4% según la normativa EG-2013. En la muestra modificada con aceite de palma, los vacíos, densidad, estabilidad y flujo aumentaban hasta cierto punto y luego disminuían, eligiéndose un 0.8% de aceite. Mayores porcentajes reducían más las emisiones de CO2, pero el óptimo debía considerar otros parámetros de diseño. Aliaga Cueva y Pulido Cornelio (2022) concluyeron que estas mezclas mejoraban algunos aspectos y reducían la contaminación, pero no cumplían requisitos para tráfico pesado, recomendando su uso en carreteras de tránsito liviano debido a su flexibilidad.

1.7.1.4. 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. La investigación, realizada en Huancayo, Perú, en la Universidad Nacional del Centro del Perú, es una propuesta de Cutti Tello (2019), busca determinar como la adición de aceite vegetal obtenido de productos locales afecta la temperatura de la mezcla y las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas tibias, para ello, se caracterizaron los agregados y se diseñó una mezcla con la metodología Marshall, con un 4.5% de cemento asfáltico. Se modificó el ligante asfáltico con distintos porcentajes de aceites vegetales y se evaluó el comportamiento a diferentes temperaturas.

Cutti Tello (2019) expone que el uso de aceites vegetales, destacando el aceite de palma, mejora la resistencia del cemento asfáltico en un 22.84%. Sin embargo, algunas temperaturas no cumplen los estándares de estabilidad requeridos por la normativa peruana. Además, se evidencia un aumento del 23.01% en la deformación con cemento asfáltico modificado, lo que indica un mayor flujo, aunque fuera del rango recomendado. Con respecto a los vacíos, se observó que disminuyen con el cemento asfáltico modificado, pero algunas temperaturas no cumplen los parámetros mínimos. El autor concluye que la adición de aceites vegetales reduce la viscosidad del cemento asfáltico. A medida que aumenta la proporción de aceite, la viscosidad de compactación disminuye, alcanzando el punto más bajo al 3.00%. Determinó una temperatura mínima de mezclado de 147°C y una temperatura de compactación de 139°C al usar 3% de aceite de palma, según los parámetros viscosos investigados.

1.7.1.5. Evaluation of palm oil fuel ash (POFA) on asphalt mixtures. La investigación llevada a cabo en Malasia por la Universidad Kebangsaan Malaysia, propuesta por Borhan, Ismail y Rahmat (2010), se enfoca en evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas modificadas con ceniza combustible de aceite de palma (POFA). Para ello, se empleó el método Marshall para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico en mezclas asfálticas convencionales y modificadas, variando los porcentajes de POFA (0, 1, 3, 5 y 7%) como aditivo.

Borhan, Ismail y Rahmat (2010) encontraron que la estabilidad Marshall disminuyó con el aumento del porcentaje de POFA, además, la modificación con POFA al 5% mejoró el módulo de elasticidad diametral y la fluencia estática de las mezclas, mostrando un comportamiento superior a las mezclas convencionales, también demostraron una mayor rigidez y resistencia a la formación de roderas, mejora en el comportamiento a fatiga, con una vida útil casi duplicada en comparación con las mezclas convencionales. Por lo tanto, Borhan, Ismail y Rahmat (2010) concluyeron que la sustitución del relleno mineral por POFA hasta en un 5% no afecta las propiedades de rendimiento de las mezclas, por lo que esta modificación es una estrategia viable para mejorar la calidad y durabilidad de las carreteras.

1.7.2. *Nacionales*

1.7.2.1. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. La empresa Fedepalma y Cenipalma con centro de operaciones en Bogotá realizan estudios para evaluar las propiedades físicas y químicas del aceite de palma crudo, facilitar e impulsar el desarrollo de los procesos químicos relacionados con la modificación del aceite de palma. Rincón y Martínez (2009), evaluaron las propiedades del aceite crudo de palma mediante ensayos de la NTC 431, prediciendo el comportamiento de los aceites en diferentes condiciones de proceso.

De los resultados mostrados por Rincón y Martínez (2009), entre los parámetros importantes se encuentran propiedades como la densidad la cual a una temperatura de 20 °C es de 0,89 g/ml, la viscosidad a los 40°C es de 39,35 cP. Refiriéndose a las propiedades energéticas, las que son cruciales para el estudio y transformación de una sustancia porque permiten determinar la cantidad total de calor que debe agregarse o retirarse de la sustancia para llegar a una temperatura o estado específico, para el aceite crudo de palma el calor de fusión es de 84,8-93,4 J/g, el calor de formación tiene un valor entre $1,84*10^9$ - $2,05*10^9$ J/kmol, que es alto, debido a su alto peso molecular y que el calor estándar de formación es de aproximadamente 42,99 kJ/g.

1.7.2.2. Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias a partir de la mezcla de cemento asfáltico y aceite crudo de palma. La investigación llevada a cabo por Lopera Palacio (2011) en Medellín para la Universidad Nacional, tiene como objetivo, el diseñar mezclas asfálticas tibias, con la mezcla del cemento asfáltico y aceite crudo de palma buscando reducir la temperatura de producción de la mezcla y la viscosidad del cemento asfáltico.

En su investigación Lopera Palacio (2011) expone que, se realizaron muestras con 2 tipos de aceites, de 3 muestras recaudadas de diferentes partes del país y que solo 2 cumplieron con estándares como acidez, impurezas, humedad y material volátil, etc., además recomienda que para prolongar la vida útil del aceite se debe de almacenarlo en tanques con filtros húmedos y previstos de calor. Como porcentaje de añadidura del aceite, los porcentajes fueron de 0.3%, 0.5%, 0.7% y 1% para cada tipo de aceite, llegando Lopera Palacio (2011) a la conclusión de escoger el crudo de palma procedente de Dismaprim, y con el 1% de adición con relación al peso del cemento asfáltico dado que posee el mayor potencial reductor de la viscosidad.

1.7.2.3. Caracterización física y reológica del cemento asfáltico modificado con aceite de coco. La investigación de Cely Leal, Flórez Sánchez y Gómez Páez (2018) en la Universidad Católica de Colombia en Bogotá, evaluó las características físicas y reológicas de cemento asfáltico 60/70 modificado con 1%, 2%, 5% y 10% de aceite de coco, tanto convencional como envejecido, analizando sus efectos en las propiedades mecánicas y reológicas.

Los principales resultados mostraron que el aceite de coco (CCO) reduce la temperatura a la que se ablanda el cemento asfáltico convencional y envejecido, logrando que fluya mejor a bajas temperaturas y se ablande por debajo de los 50°C en cemento asfálticos modificados. El índice de penetración tuvo valores negativos (<-1.0), indicando sensibilidad a altas temperaturas que podría afectar la resistencia al ahuellamiento durante su uso. Además, el CCO hace que el cemento asfáltico sea más blando al aumentar su cantidad. En cuanto a las propiedades reológicas, con más aceite de coco hubo mayor deformación, simulando deformaciones permanentes en pavimentos. Cely Leal, Flórez Sánchez y Gómez Páez (2018) sugieren su uso en climas fríos, ya que el MSCR evidenció mejoras en la manejabilidad al hacer el cemento asfáltico más blando, es decir, con un cambio en su viscosidad.

1.7.2.4. Obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño de mezclas densas en caliente, con cemento asfáltico normal y modificado, mediante el método Marshall, empleando agregados pétreos de la cantera río Téllez, vereda san José municipio de Funes, departamento de Nariño y cemento asfáltico de Barrancabermeja. En esta investigación Urbano Orozco (2014), investigó la cantidad óptima de cemento asfáltico para mezclas asfálticas convencionales y modificadas con fibras de polipropileno, utilizando agregados pétreos de la cantera "RÍO TÉLLEZ, VEREDA SAN JOSÉ MUNICIPIO DE FUNES". En su estudio, caracterizó los materiales y descubrió que los agregados pétreos tenían un coeficiente de limpieza superficial del 4.62%, por encima del límite mínimo del 0.5%. Luego, fabricó briquetas mediante el método Marshall para evaluar densidad, vacíos, estabilidad y flujo.

Tras realizar ensayos, Urbano Orozco (2014), encontró que el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla convencional es del 5.5%, mientras que, para una mezcla modificada, el porcentaje óptimo es del 5.12%, esto indica que, la adición de polipropileno reduce el contenido de cemento asfáltico en un 0.38%. La estabilidad aumentó de 1075 kg a 1395 kg, indicando una

mejora de 320 kg al emplear cemento asfáltico modificado. Esto indica que la mezcla modificada tiene un mejor desempeño en resistencia a deformaciones, lo que la hace más flexible para condiciones de tráfico pesado (NT3), lo que evita que la mezcla se vuelva quebradiza en climas fríos y bajo cargas. Urbano Orozco (2014) concluye que las mezclas asfálticas modificadas con polipropileno experimentan una reducción del 0.38% en su contenido de cemento asfáltico, lo que disminuye el flujo y aumenta la estabilidad, permitiendo soportar cargas sin agrietarse y garantizando la resistencia de la muestra.

1.7.2.5. Evaluación física y reológica de mastic asfáltico usando diferentes llenantes minerales no convencionales. El estudio de Diaz Rosero y Vallejo Paladines (2019) en San Juan de Pasto buscó una alternativa ecológica para mejorar las propiedades del cemento asfáltico, sustituyendo el llenante mineral por materiales derivados de residuos de construcción y demolición (RCD). Realizaron caracterización física y reológica del mastic asfáltico con cemento 60/70, incluyendo ensayos de viscosidad, punto de ablandamiento, módulo de corte y ángulo de fase. Además, evaluaron su rendimiento en resistencia a deformaciones permanentes y fatiga mediante ensayos MSCR.

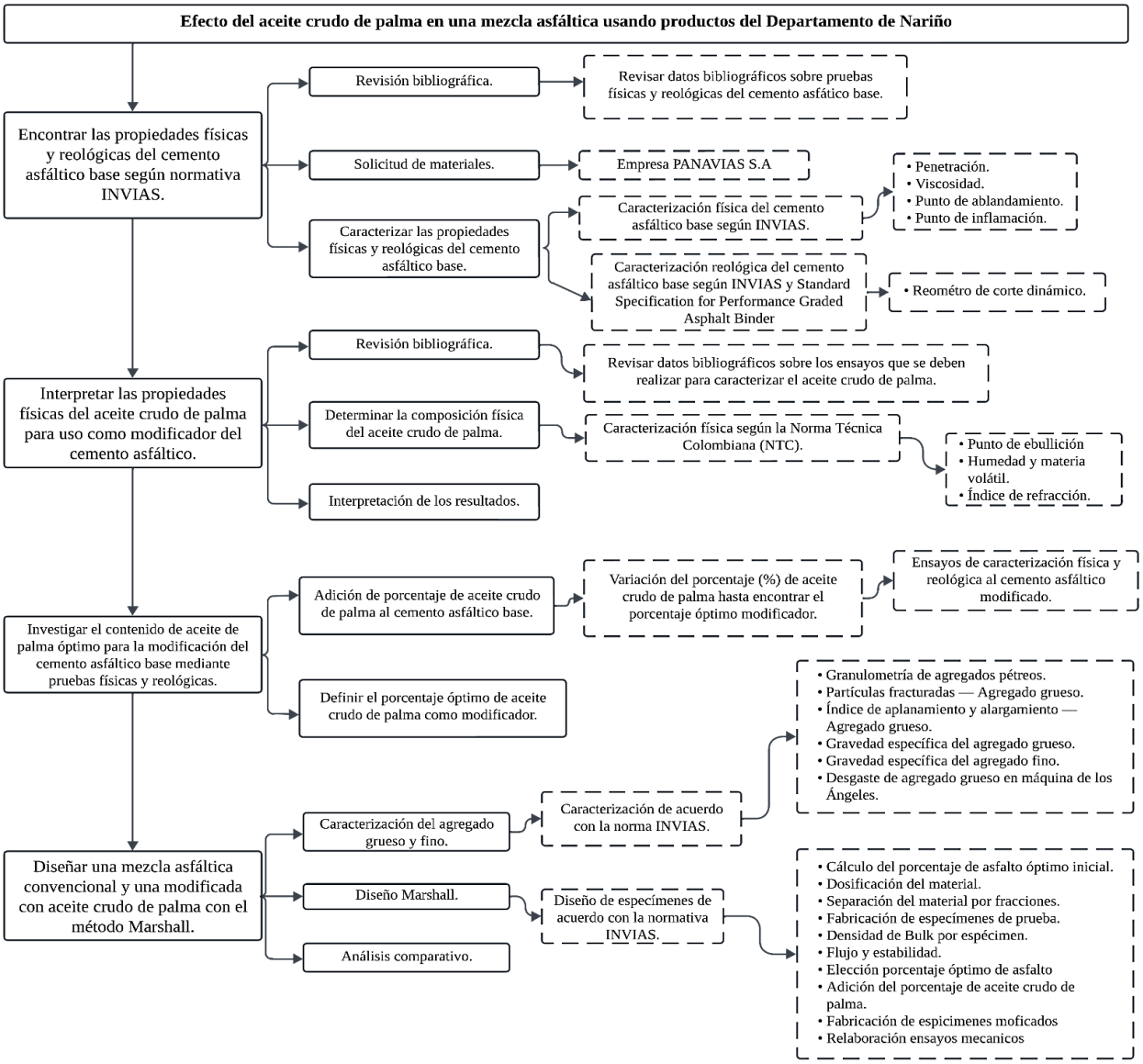
De acuerdo a Diaz Rosero y Vallejo Paladines (2019), la adición de llenantes minerales como polvo de ladrillo al cemento asfáltico original produce un material más consistente y resistente a temperaturas. Los ensayos físicos revelaron 50% menos penetración y 3 a 5°C más en punto de ablandamiento. Los análisis reológicos mostraron que el módulo de corte varió con frecuencia y temperatura, indicando mejor resistencia del cemento asfáltico modificado con polvo de ladrillo. El ensayo LAS evidenció menor deformación a cargas cíclicas, prolongando la vida útil del pavimento. El ensayo MSCR clasificó este cemento asfáltico como apto para alto tráfico. Concluyen que la inclusión de llenantes minerales mejora el desempeño de las mezclas asfálticas.

1.8. Metodología

El presente capítulo se resume en el siguiente cuadro, donde se indica el procedimiento propuesto para cumplir con los objetivos propuestos en el presente trabajo.

Figura 1:

Diagrama de flujo para desarrollo de los objetivos



1.9. Cumplimento del primer objetivo

Para el desarrollo y cumplimiento del objetivo “Encontrar las propiedades físicas y reológicas del cemento asfáltico base según la normativa INVIAS”, se desarrolló el siguiente proceso descrito en la figura 1.

1.9.1. *Revisión bibliográfica de documentos*

Se obtuvo información bibliográfica de diversos medios, facilitando el entendimiento de procedimientos y comportamientos de especímenes. Se accedió a artículos e investigaciones con conceptos y cálculos según normativas colombianas e internacionales, complementado con normas INVIAS, respaldando la realización de ensayos en componentes de la capa de rodadura.

1.9.2. *Solicitud de materiales.*

Para los ensayos de laboratorio, se solicitó cemento asfáltico y agregados a PANAVIAS S.A. mediante un oficio dirigido al ingeniero encargado; se realizó un viaje a la planta La Victoria, ubicada en el kilómetro 4 de la vía Pasto-Nariño.

1.9.3. *Caracterización física y reológica del cemento asfáltico base*

La caracterización física y reológica del cemento asfáltico sirve para evaluar sus propiedades y determinar su idoneidad en pavimentos, garantizando calidad y desempeño mediante ensayos de laboratorio al cemento asfáltico. Los ensayos se encuentran en la normativa INVIAS, asegurando un diseño óptimo y evaluando propiedades físicas que afectan el comportamiento del cemento asfáltico en servicio. Para cumplir esta fase se realizó el siguiente procedimiento:

1.9.3.1. Caracterización física del cemento asfáltico base. Para desarrollar esta actividad se tuvo en cuenta las diferentes normas técnicas con el fin de realizar los ensayos de laboratorio.

1.9.3.1.1. ***Punto de inflamación y combustión.*** El punto de inflamación es una propiedad crucial para evaluar la estabilidad térmica de los cementos asfálticos. Los cementos asfálticos con un punto de inflamación alto son menos propensos a incendiarse que aquellos con un punto bajo. El ensayo de punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (figura 2) está regulado por la norma INV E-709-13, para realizarlo, se coloca una muestra de cemento asfáltico en la copa y se calienta, aumentando la temperatura mientras una llama de ensayo se aplica a la superficie de la muestra, y cuando ésta alcanza el punto de inflamación, sus vapores se encienden. El punto de

inflamación se define como la temperatura a la que aparecen las primeras llamas en su superficie.

Figura 2:

Copa abierta de Cleveland

1.9.3.1.2. ***Índice de penetración.*** El ensayo de índice de penetración determina la consistencia del cemento asfáltico, midiendo la facilidad con que se penetra con una aguja estándar. Regulado por la norma INV E-706-13, se realiza en un penetrómetro (figura 3), con un pistón y una aguja de 1.00-1.02 mm de diámetro. Se coloca la aguja sobre una muestra de 400-500 g de cemento asfáltico a 25 °C, presionando el pistón a 1 mm por minuto. La distancia penetrada se registra en milímetros. Se toman 3 muestras y 3 medidas en cada una. Los cementos asfálticos con índice alto son más blandos y fáciles de penetrar que los de índice bajo. El resultado final es el promedio de las tres penetraciones.

Figura 3:

Equipo ensayo de penetración

1.9.3.1.3. ***Viscosidad.*** El ensayo de determinación de la viscosidad del cemento asfáltico, está regulado por la norma INV E-717-13, este ensayo se utiliza para determinar la viscosidad aparente

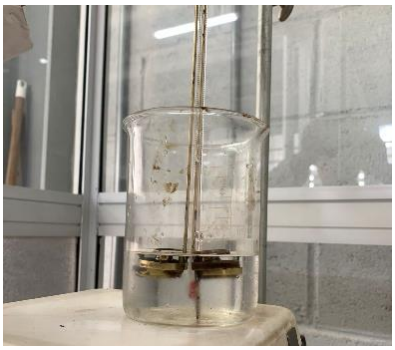
del cemento asfáltico a una temperatura específica. Para ello se utilizó el viscosímetro rotacional (figura 4), cápsulas metálicas para almacenar el cemento asfáltico y un vástago que se introduce en la muestra de cemento asfáltico. El ensayo permite la obtención de un gráfico a partir del cual se pueden obtener las temperaturas de compactación y mezcla, por lo que se recomienda realizar el ensayo a varias temperaturas. Para empezar, se calentó el recipiente a las temperaturas que se utilizarán para el ensayo, luego se llenaron las tres cápsulas hasta el tope y, a continuación, se colocó el vástago el cual gira a velocidad de rotación constante de 20 rpm.

Figura 4:
Viscosímetro rotacional

1.9.3.1.4. ***Punto de ablandamiento.*** El ensayo de punto de ablandamiento, según la norma INV E-712-13, determina la temperatura a la que un cemento asfáltico se ablanda lo suficiente para que una bola de acero caiga 25 mm. Se utilizan dos anillos de latón, dos esferas de acero de 9.5 mm y un termómetro para controlar la temperatura (figura 5), el ensayo se realiza colocando una esfera sobre una muestra de cemento asfáltico calentada gradualmente en un baño de líquido a 5 °C por minuto, la temperatura se registra cuando el cemento asfáltico se ablanda lo suficiente para permitir la caída de la bola, este punto indica la tendencia del cemento asfáltico a fluir a altas temperaturas, crucial para su clasificación y para determinar la temperatura mínima adecuada para su aplicación en carreteras sin deformarse excesivamente.

Figura 5:

Equipo para ensayo de punto de ablandamiento



1.9.3.1.2. Caracterización reológica del cemento asfáltico base. Para este procedimiento se aplicó la siguiente guía, con el fin de realizar el ensayo dado por el Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder y el Art. 410 del INVIAS.

1.9.3.1.5. ***Factor de ahuellamiento.*** Para determinar el factor de ahuellamiento del cemento asfáltico, se debe obtener el módulo de corte complejo y el ángulo de fase. Según INV Art. 410 se debe asumir una clasificación de Performance Grade 64-22 (clasificación norteamericana de cemento asfálticos) para un cemento asfáltico con penetración 60-70 como el de esta investigación, inicialmente se preparó las muestras de cemento asfáltico, para ello se usó tres platos de 25 mm, se calentó el cemento asfáltico y se depositó el cemento asfáltico en los platos de la siguiente manera. (Figura 6)

Figura 6:

Muestras para ensayo

Para inicializar el reómetro, se abrió la llave del compresor, se encendió el monitor del baño maría y se estableció a 64°C, se abrió el software del reómetro en el computador y se buscó el ensayo *ASPHALT LAS*, se configuro el ensayo a 64°C, 1 mm Gap y a 10 rad/s ,de acuerdo con el

Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder para cemento asfálticos con clasificación de *Performance Grade* 64-22. A continuación se ubicó la muestra de cemento asfáltico en el reómetro y se verifico que el reómetro baje hasta 1 mm aproximadamente. (figura 7)

Figura 7:
Reómetro Anton Paar

Se dio inicio al ensayo y se esperó que el software entregue el reporte con los datos evaluados. El módulo de corte complejo y el ángulo de fase se obtuvieron a partir de la respuesta de la muestra, este procedimiento se emplea para medir las propiedades del módulo complejo de corte (G*) y el ángulo de fase (δ) en cementos asfálticos utilizando un reómetro de corte dinámico y una configuración de placas paralelas, Con esos dos datos se calculó el factor de ahuellamiento con la ecuación 1, el cual debe ser superior a 1.0 kPa en condición original.

$$\boldsymbol{Factor\ ahuellamiento\ (kPa)} = \frac{G^*}{sen(\delta)}\ (\mathbf{1})$$

1.10. Cumplimiento del segundo objetivo.

Para el cumplimiento del objetivo “Interpretar las propiedades físicas del aceite crudo de palma para uso como modificador del cemento asfáltico”, se tuvo en cuenta el siguiente proceso:

1.10.1. *Revisión bibliográfica de documentos*

Se obtuvo información bibliográfica mediante la exploración de diferentes medios, facilitando el entendimiento de procedimientos, conceptos y comportamientos de especímenes de prueba. Se accedió a conceptos, procedimientos y cálculos necesarios según la normativa colombiana NTC, para desarrollar los ensayos al aditivo modificador, es decir el aceite de palma.

1.10.2. *Determinación de la composición física del aceite crudo de palma*

La composición física del aceite crudo de palma es crucial para evaluar su calidad y pureza, esta afecta propiedades como humedad y punto de fusión, que influyen en su rendimiento en aplicaciones específicas. La determinación de esta composición se realizó mediante ensayos establecidos en la NTC, permitiendo conocer las propiedades del aceite empleado en la investigación.

1.10.2.1. Determinación del punto de ebullición. UNAM (2020) describe el procedimiento del punto de ebullición de sustancias orgánicas, para ello se utilizó un tubo Thiele, sujeto a un soporte de anillo en la campana extractora. El tubo se llenó con aceite, al menos 1 cm por encima del brazo triangular superior (Figura 8), luego se llenó un vial con la muestra, insertando un tubo capilar con el extremo abierto hacia abajo y el sellado hacia arriba. El tubo capilar se acopló al termómetro con alambre de cobre, ajustando la altura para que la muestra de aceite quedara a mitad del tubo

Figura 8:
Equipo para punto de ebullición

Se debe calentar el aceite suavemente en el brazo lateral del tubo Thiele con el quemador Bunsen usando un movimiento de ida y vuelta, a medida que el aceite se calienta y se vuelve menos denso, se elevará y viajará por el brazo triangular del tubo. Se continuó calentando hasta que una vigorosa corriente de burbujas emerja de la punta del tubo capilar, de tal manera que las gotas individuales apenas puedan distinguirse, luego se retiró el fuego y se dejó que el aceite se enfríe. El punto de ebullición es la temperatura cuando el aceite apenas comienza a entrar en el tubo capilar.

1.10.2.2. Determinación de la humedad y de la materia volátil. El ensayo de determinación del contenido de humedad y materia volátil regido por la NTC 287, consiste en medir la cantidad de agua presente en una muestra y los componentes que pueden evaporarse cuando se calienta. El ensayo se realizó mediante la balanza analizadora de humedad (RADWAG PMR 210), se agregó 1.0 gramo de aceite crudo de palma en una lámina de papel aluminio y se siguió las indicaciones establecidas por la máquina (Figura 9). Una vez finalizado el proceso, la balanza analizadora arrojo directamente el porcentaje del contenido de humedad que presenta la muestra de manera eficiente.

Figura 9:
Humedad y material volátil

1.10.2.3. Índice de refracción. El ensayo estipulado por la NTC 289 consiste en medir el índice de refracción de una grasa o aceite animal o vegetal, este índice es una propiedad física que depende de la composición química y estructura molecular de la muestra, el ensayo se realizó utilizando un refractómetro el cual es un instrumento que mide el ángulo de refracción de la luz al pasar a través de una muestra, para llevar a cabo este ensayo se preparó una muestra del material calentándolo, se calibro el refractómetro de acuerdo con las especificaciones del fabricante, se colocó cuidadosamente en la platina del refractómetro una gota de la muestra, asegurándose de que

esté en contacto completo y uniforme con la platina y por último se leyó el índice de refracción. (Figura 10)

Figura 10:
Índice de refracción

1.10.3. *Interpretación de los resultados*

La interpretación de los resultados de los ensayos físicos hechos al aceite crudo de palma consistió en la evaluación de los datos obtenidos para determinar las propiedades físicas del aceite, estos ensayos se realizaron para evaluar la calidad del aceite y garantizar que cumpla con los requisitos establecidos por las normas y estándares aplicables.

1.11. Cumplimiento del tercer objetivo

Para el desarrollo y cumplimiento del objetivo "Investigar el contenido de aceite de palma óptimo para la modificación del cemento asfáltico base mediante pruebas físicas y reológicas", se desarrolló el siguiente proceso ya descrito en la figura 1

1.11.1. *Adición de porcentaje de aceite crudo de palma al cemento asfáltico base*

Considerando que las propiedades del cemento asfáltico pueden variar según las características específicas de cada aceite crudo de palma y que diferentes investigaciones tienen un porcentaje de añadidura diferente, se realizaron modificaciones al porcentaje óptimo el cual se tomó de las investigaciones previas, siendo este según García Ávila (2015) un 3% como porcentaje óptimo de

aceite de palma, ya que reducía significativamente las temperaturas de mezclado y compactación sin afectar el desempeño. Sin embargo, dado que cada aceite crudo de palma puede interactuar de manera diferente con el cemento asfáltico, se decidió evaluar dos variaciones por encima y dos por debajo de este valor de referencia, con incrementos y decrementos de 0.5% y 1%. De esta manera, los porcentajes utilizados para el estudio fueron 2%, 2.5%, 3%, 3.5% y 4%.

1.11.2. *Mezclado del aceite crudo de palma y el cemento asfáltico*

Para obtener una mezcla homogénea entre el cemento asfáltico y el aceite crudo de palma como aditivo, se utilizó la técnica por vía húmeda, según lo expuesto por Peña Dueñas (2021), en esta técnica, el aditivo se agrega al cemento asfáltico y se mezcla a una temperatura entre 110 y 140°C durante 30 minutos. El proceso se realizó en una máquina fresadora, lo que permitió experimentar con el número de revoluciones. Al mezclar a 490 rpm, se evitó el salpicado y se logró una mezcla homogénea.

1.11.3. *Ensayos físicos y reológicos al cemento asfáltico modificado*

Consistió en realizar los ensayos de viscosidad, punto de ablandamiento, punto de ebullición, módulo de corte complejo y ángulo de fase, los cuales fueron desarrollados en el primer objetivo al cemento asfáltico base, pero ahora se realizaron a los 5 cementos asfálticos modificados. Una vez hechos se determinó cual porcentaje de adición es el que mejora las propiedades del cemento asfáltico base, es decir, reducción de temperatura, viscosidad, etc.

1.12. Cumplimiento del cuarto objetivo

Para el desarrollo y cumplimiento del objetivo “Diseñar una mezcla asfáltica convencional y una modificada con aceite crudo de palma con el método Marshall”, se desarrolló el siguiente proceso ya descrito en la figura 1, con el fin de diseñar briquetas para el estudio de las propiedades mecánicas de las briquetas convencionales y las hechas con cemento asfáltico modificado.

1.12.1. *Caracterización de Agregado Grueso y Fino*

Se llevó a cabo los procedimientos descritos en la norma INVIAS, pues es una parte importante del diseño de mezclas asfálticas, ya que los agregados son los componentes principales de las mezclas asfálticas y sus propiedades físicas y mecánicas determinan las propiedades de la mezcla.

1.12.1.1. Granulometría de agregados pétreos. La granulometría de un agregado es la distribución de tamaños de sus partículas. Una granulometría continua, con diferentes tamaños de partículas, ofrece mayor resistencia a la deformación y al desgaste que una discontinua. Para evaluar los agregados gruesos y finos, se realizó un análisis granulométrico según la norma INV E-213-13. En este estudio, se usaron tamices especificados en el art. 450 de las especificaciones del INVIAS (Anexo 1), correspondientes a una mezcla MDC-19 y, según la AASHTO T27 y T11, a mezclas tipo D, comunes en carreteras de tránsito pesado.

Para determinar la granulometría del material, se secó la muestra a una temperatura de 110 ± 5° C (230 ± 9° F), hasta obtener masa constante, luego, se pasó el material por la torre de tamices, y se determinó la masa de la fracción retenida en cada tamiz, empleando una balanza (Figura 11), la masa total del material después del tamizado debe ser muy cercana a la masa de la muestra original colocada sobre los tamices, según la INV E-213-13, si las cantidades difieren en más de 0.3 % de la masa original de la muestra seca, los resultados no se podrán usar con fines de aceptación.

Figura 11:

Granulometría: A) Inicio del proceso, B) Separación de fracciones

A) B)

1.12.1.2. Partículas fracturadas – agregado grueso. Según la norma INV E-227-13, este ensayo se realiza solo para agregados gruesos, para ello se selecciona la cantidad de muestra según

el tamaño máximo del material dado por la granulometría, como se muestra en el anexo 2. Se lava y seca la muestra para eliminar residuos finos, se dispersa en una superficie limpia para inspeccionar cada partícula, considerando fracturada aquella con al menos un cuarto de su mayor sección transversal fracturada. Se clasifican las partículas en fracturadas y no fracturadas, determinando la masa para calcular el porcentaje de partículas fracturadas mediante la ecuación 2.

$$\boldsymbol{P} = \frac{F}{F+N} * 100 \ (\mathbf{2})$$

En dónde:

- P: Porcentaje de caras fracturadas.
- F: Peso o número de partículas con caras fracturadas.
- N: Peso o número de partículas sin caras fracturadas.

1.12.1.3. Índice de aplanamiento y alargamiento – agregado grueso. La norma INV E-230-13 establece un método de ensayo para determinar los índices de aplanamiento y alargamiento de agregados gruesos, este ensayo se realizó separando la muestra en cuatro grupos, cada uno de los cuales está diferenciado por su tamaño. Los tamaños de los grupos se basan en los tamices indicados en el anexo 3, de igual forma, para determinar la cantidad que se usará para los índices de alargamiento y aplanamiento, se hizo uso del tamaño máximo de la muestra, estos valores se describen en el anexo 4.

Para determinar los índices de alargamiento y aplanamiento, el material retenido en cada tamiz se pasó por dos calibradores, uno de espesores y otro de longitudes (Figura 12 respectivamente). Los calibradores permitieron identificar si una partícula es alargada o aplanada. Después de separar los materiales, se pesaron las partículas que pasaron por el calibrador y las que no alcanzaron a pasar.

Figura 12:

A) Calibrador de espesores B) Calibrador de longitudes

A) B)

Para calcular el índice de alargamiento se aplicó la ecuación 3 y para determinar el índice de aplanamiento la ecuación 4:

$$\boldsymbol{IA} = \frac{M2}{M1} * 100 \ (\mathbf{3}) \qquad \boldsymbol{IL} = \frac{M12}{M11} * 100 \ (\mathbf{4})$$

En dónde:

- **M1**: Masa total de la muestra para índice de alargamiento.
- **M2**: Masa de partículas alargadas.
- **M11**: Masa total de la muestra para índice de aplanamiento.
- **M12**: Masa de partículas aplanadas.

1.12.1.4. Gravedad específica del agregado grueso. Este procedimiento sigue la norma INV E-223-13. La primera etapa implico dividir la muestra y eliminar cualquier partícula que sea más pequeña que 4.75 mm (Pasante del tamiz No. 4) mediante tamizado en seco y lavado para remover los finos adheridos a la superficie, luego, a partir de la muestra dividida y teniendo en cuenta el tamaño máximo de las partículas se consultó la cantidad de material requerida para llevar a cabo el ensayo como se muestra en el anexo 5. La muestra, se secó en horno a una temperatura de 110 ± 5° C hasta masa constante. Luego, esta muestra se sumergió en agua por un período de 24 horas (Figura 13).

Figura 13:

Inmersión agregado grueso

Pasadas las 24 horas, se retiró de la inmersión y se secó superficialmente utilizando un paño absorbente (figura 14), a continuación, se determinó la masa de la muestra en su condición saturada con superficie seca (SSS), luego, se realizó la medición del peso de la muestra en inmersión, sumergiéndola en agua hasta que todo el material esté cubierto, y se tomó el peso cuando este se estabilizó. Finalmente, la muestra se introdujo en un horno durante 24 horas, tras lo cual se sacó y se permitió que se enfríe hasta que sea posible manipularla para tomar su peso posterior.

Figura 14:

Secado superficial de las partículas

Posteriormente se calculó la gravedad específica seca al horno, SSS y aparente usando las ecuaciones 5, 6 y 7 respectivamente. La densidad seca al horno, SSS y aparente se obtuvieron con las ecuaciones 8, 9 y 10. Finalmente, se calculó la absorción utilizando la ecuación 11.

$$\boldsymbol{Gravedad\ específica\ SH} = \frac{A}{B - C}\ (\mathbf{5})$$

$$\boldsymbol{Gravedad\ específica\ SSS} = \frac{B}{B - C}\ (\mathbf{6})$$

$$\boldsymbol{Gravedad\ espe\ aparente} = \frac{A}{A - C}\ (\mathbf{7})$$

$$\boldsymbol{Densidad\ (SH)}, \frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{m3}} = 997.5 \frac{A}{B - C}\ (\mathbf{8})$$

$$\boldsymbol{Densidad\ SSS}, \frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{m3}} = 997.5 \frac{B}{B - C}\ (\mathbf{9})$$

$$\boldsymbol{Den\ aparente}, \frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{m3}} = 997.5 \frac{A}{A - C}\ (\mathbf{10})$$

$$\boldsymbol{Absorción}, \% = \frac{B - A}{A} \times 100\ (\mathbf{11})$$

En dónde:

- **A**: Masa de la muestra seca al horno.
- **B**: Masa saturada y superficialmente seca (SSS)
- **C**: Masa de la muestra en inmersión.

1.12.1.5. Desgaste de agregado grueso en la máquina de los Ángeles. La norma INV E-218-13 establece el método para determinar la resistencia a la degradación de agregados gruesos menores a 37.5 mm (1 ½ “) mediante la máquina de Los Ángeles. Este ensayo mide la resistencia a abrasión, impacto y trituración, una propiedad importante para materiales de construcción, para ello usó una muestra mínima de 5 kilogramos.

Se eligió la granulometría más similar a la del agregado a usar en obra (tipo A). La muestra se separó en fracciones según el anexo 6 (Figura 15), luego se determinó el número de esferas necesarias para la máquina de Los Ángeles de acuerdo a la granulometría, consultando la norma que especifica la cantidad requerida, en este caso, fueron 12 esferas según el anexo 7, esenciales para simular el efecto de abrasión en el proceso.

Figura 15:

Fracciones para máquina de los Ángeles: A) retenido ½", B) retenido 3/8", C) retenido ¼", D) retenido No. 4

Después se cargó la muestra con las esferas en el tambor giratorio a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto durante 500 vueltas, luego, se retiró el material y se tamizo a través del tamiz No. 12 (Figura 16).

Figura 16:

Muestra máquina de los Ángeles: A) Muestra después del ensayo, B) Tamizaje de la muestra

A) B)

El valor del desgaste se calculó utilizando la ecuación 12

$$\%\ \boldsymbol{Pérdidas} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100\ (\mathbf{12})$$

En donde:

- **% pérdidas**: Porcentaje de material perdido
- **P1**: Masa de la muestra antes del ensayo (g).

- **P2**: Masa de la muestra después del ensayo (g).

1.12.1.6. Gravedad específica del agregado fino. Para calcular la densidad del agregado fino, se usó el proceso de la norma INV E-222-13. En primer lugar, se extrajo 1 kilogramo mínimo de muestra, se sumergió la muestra durante un período de 24 horas, luego, se separó el agua cuidadosamente para evitar pérdida de material, para ello, se puede emplear el tamiz en el que previamente se retuvo la muestra durante el proceso de tamizado. Esta muestra ya decantada se extendió sobre una superficie no absorbente, y se secó utilizando una corriente suave de aire caliente, manteniéndola en movimiento para un secado uniforme. Para determinar si estaba lista para el siguiente paso, se realizó la prueba del cono (Figura 17).

Figura 17:

Prueba del cono de arena A) Muestra descartada, B) Muestra aprobada

A) B)

La prueba del cono implico llenar un cono con material, compactarlo con 25 golpes, y retirarlo. Si mantiene su forma, aún tiene mucha humedad, por lo que se debe continuar secándola y repetir la prueba hasta que se produzca un desmorone parcial en el cono, lo que indica que la muestra ha alcanzado un estado de secado superficial y se puede proceder con el ensayo.

Para calcular la densidad se usó el método gravimétrico. Se llenó un picnómetro con agua y 500 gramos de material, eliminando burbujas de aire con una bomba. Se ajustó la temperatura a 23°C, se llenó de agua hasta la marca y se pesó, luego, se sacó la muestra, se secó en horno, y se pesó el picnómetro solo con agua. Tras 24 horas de secada la muestra, se pesó nuevamente para determinar densidad y absorción del agregado fino. Con estos datos se calcularon las gravedades específicas

seca al horno, SSS y aparente con las ecuaciones 13, 14, 15, las densidades secas al horno, SSS y aparente con las ecuaciones 16, 17, 18, y la absorción ecuación 19.

$$\boldsymbol{Grav\ específica\ SH} = \frac{A}{B + S - C}\ (\mathbf{13})$$

$$\boldsymbol{Grav\ específica\ SSS} = \frac{S}{B + S - C}\ (\mathbf{14})$$

$$\boldsymbol{Grav\ espe\ aparente} = \frac{A}{B + A - C}\ (\mathbf{15})$$

$$\boldsymbol{Den\ (SH)}, \frac{kg}{m3} = 997.5 \frac{A}{B + S - C}\ (\mathbf{16})$$

$$\boldsymbol{Den\ SSS}, \frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{m3}} = 997.5 \frac{S}{B + S - C}\ (\mathbf{17})$$

$$\boldsymbol{Den\ aparente}, \frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{m3}} = 997.5 \frac{A}{B + A - C}\ (\mathbf{18})$$

$$\boldsymbol{Absorción}, \% = \frac{S - A}{A} \times 100\ (\mathbf{19})$$

En donde:

- **A**: Masa de la muestra seca al horno.
- **B**: Masa del picnómetro lleno de agua.
- **C**: Masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua.
- **S**: Masa de la muestra saturada superficialmente seca usada para el ensayo.

1.12.1.7. Equivalente de arena. Este ensayo, detallado en la norma INV E 133-13, se lleva a cabo para identificar, bajo condiciones estandarizadas, las proporciones relativas de partículas finas de polvo y material de apariencia arcillosa o finos plásticos presentes en suelos o agregados finos menores a 4.75 mm. Para realizarlo, se tomó una cantidad de suelo o agregado fino y una pequeña porción de solución floculante, se colocaron en una probeta graduada de plástico y se agitaron. Este proceso permite que las partículas de arena se desprendan de cualquier cobertura de material arcilloso o similar. (Figura 18)

Figura 18:

Proceso equivalente de arena

Después, se le agregó una cantidad solución floculante a la muestra, para hacer que el material similar a la arcilla se separara y quedara flotando sobre la arena. Una vez que pasó un tiempo de sedimentación, se introdujo un dispositivo en la probeta de ensayo para tomar mediciones y se determinaron las alturas que alcanzaron el material arcilloso y la arena dentro de esta. El equivalente de arena es la proporción entre la altura de la arena y la altura de la arcilla, expresada en un porcentaje, y se calculó utilizando la ecuación número 20.

$$\boldsymbol{Equivalenete\ de\ arena} = \frac{lectura\ arena}{Lectura\ arcilla}\ (\mathbf{20})$$

1.12.2. *Diseño Marshall*

Para el diseño de mezclas asfálticas con cemento asfáltico convencional y modificado, se usó la metodología Marshall, que busca la relación óptima entre contenido de cemento asfáltico y granulometría, estudiando mecánicamente ambas variantes, este método determina la estabilidad y flujo de la mezcla, para ello se elaboraron briquetas con ambos tipos de cementos asfálticos y se sometieron a carga constante en una prensa, obteniendo su estabilidad y flujo. Los resultados se presentan numérica y gráficamente gracias a la prensa hidráulica Marshall. Para esta fase se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento.

1.12.2.1. Cálculo porcentaje de cemento asfáltico óptimo inicial para briquetas convencionales. Para determinar la cantidad adecuada de cemento asfáltico necesaria para fabricar

las briquetas de prueba, se utilizó los datos de la granulometría de los agregados pétreos. Estos resultados se emplearon en la ecuación 21 para llevar a cabo el cálculo del porcentaje óptimo inicial de cemento asfáltico requerido.

$$\boldsymbol{P} = (0.02 * A) + (0.07 * B) + (0.15 * C) + (0.020 * D) \ (\mathbf{21})$$

Donde:

- **P**: Porcentaje de cemento asfáltico inicial.
- **A**: Porcentaje de agregado retenido en el tamiz número 50.
- **B**: Porcentaje de agregado pasante del tamiz número 50 y retenido en el número 100.
- **C**: Porcentaje de agregado pasante del tamiz número 100 y retenido en el número 200.
- **D**: Porcentaje de agregado pasante del tamiz número 200.

1.12.2.1.1. ***Dosificación del material.*** Para dosificar los materiales para la fabricación de una briqueta, se comienzo variando el porcentaje de cemento asfáltico inicial en 0.5%, dos veces por arriba y por abajo. Para cada porcentaje de cemento asfáltico, se calculó la cantidad necesaria de material. En primer lugar, se determinó qué porcentaje de la muestra le corresponde a cada fracción y al cemento asfáltico, aplicando la ecuación 22.

$$\boldsymbol{Pn} = (100 - PA) * (Pnfa) \ (\mathbf{22})$$

En donde:

- **Pn**: Porcentaje de dosificación para cada fracción usada en la muestra.
- **PA**: Porcentaje de cemento asfáltico.
- **Pnfa**: Porcentaje de cada fracción usado para ajustar la franja granulométrica.

Para fabricar una muestra de prueba de cemento asfáltico, se deben combinar diferentes fracciones de materiales en porcentajes específicos. La norma INV E-748-13 establece que cada muestra debe tener un peso de 1200 gramos. Para calcular la cantidad de material necesaria para cada fracción, se debe multiplicar el porcentaje de dosificación de cada fracción por 1200 g, con la ecuación 23.

$$\boldsymbol{MFn} = 1200 * Pn \ (\mathbf{23})$$

En donde:

- **MFn**: Masa por cada fracción.

1.12.2.1.2. ***Separación de materiales por fracciones.*** El proceso de fabricación de mezclas asfálticas (briquetas) implica la separación de los agregados pétreos según su tamaño de partícula. Estas divisiones se definen en el anexo 8, indicando los tamices utilizar, la separación se realizó mediante recipientes individuales para almacenar cada fracción.

1.12.2.1.3. ***Fabricación de especímenes de mezcla asfáltica convencional***. Siguiendo la norma INV-E-748-13, se prepararon briquetas determinando la masa de materiales en recipientes tarados, se añadieron materiales de grueso a fino según la dosificación especificada. El cemento asfáltico se extrajo en la cantidad requerida, evitando recalentamiento. Se realizaron briquetas con el porcentaje de cemento asfáltico encontrado y con variaciones de ± 0.5% y ± 1%.

De acuerdo a la norma INV-E-748-13, se calentaron los materiales a la temperatura de mezclado determinada por la viscosidad del cemento asfáltico, esta temperatura debe producir una viscosidad de 170 ± 20 cP (0.17 ± 0.02 Pa·s), sin exceder en más de 28°C, luego se vertió gradualmente el cemento asfáltico sobre los agregados en una bandeja, mezclando continuamente hasta que los agregados lo absorbieran, lo cual se notó cuando la mezcla tomó color negro. En este punto se espera que la mezcla tenga una masa total de 1200 gramos, mientras se mezclaba, se calentaron y engrasaron los moldes de compactación para evitar que la muestra se pegara a las paredes y se dañara. Este proceso aseguró una mezcla uniforme y la preparación adecuada para la compactación de los especímenes.

Para la compactación, se ajustó la muestra a una temperatura específica según la viscosidad del cemento asfáltico. Los moldes, calentados entre 90 y 150°C y engrasados, se llenaron con la mezcla, la cual se compactó con 15 golpes en el perímetro y 10 en el centro, seguido de compactación mecánica adicional. Tras 24 horas de reposo, se retiró el molde con un gato hidráulico y una placa ajustada. La norma recomienda hacer al menos 3 briquetas por porcentaje de cemento asfáltico, aunque se aconseja 5 para mayor representatividad.

1.12.2.1.4. ***Densidad Bulk para cada espécimen.*** El ensayo, basado en la norma INV E-733-

13, determina la densidad Bulk, que es la masa del material por unidad de volumen, para ello se asume que las muestras tienen humedad natural. Se uso un recipiente con agua a 25 ± 1 °C y una balanza con un recipiente suspendido sobre el agua, calibrada previamente, luego, se ajustó la temperatura de la muestra, calentándola si es necesario. Si la temperatura del espécimen difiere de la del agua, se calienta en un horno y se sumerge durante 4 ± 1 min. Si no se calienta, se sumerge entre 10 y 15 min, asegurando que no queden burbujas de aire. Finalmente, se registra su peso (C), posteriormente, se retiró la muestra del agua, se secó superficialmente y se pesó (B), luego se obtuvo el peso en seco, donde se secó en horno hasta masa constante, se dejó enfriar y se pesó (A). A partir de estos datos, se calculó la gravedad específica Bulk con la ecuación 24, la densidad con la ecuación 25 y la absorción de agua con la ecuación 26.

$$\boldsymbol{Gmb(adimensional)} = \frac{A}{B} - C \ (\mathbf{24})$$

$$\boldsymbol{Absorción}\ (\%) = \frac{B - A}{B - C} * \ 100 \ (\mathbf{26})$$

$$\boldsymbol{Densidad}\left(\frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{m3}}\right) = \ 997 \ \times \frac{A}{B - C} \ (\mathbf{25})$$

En donde:

- **Gmb**: Gravedad específica bulk.
- **A**: Peso seco en horno.
- **B**: Peso saturado superficialmente seco (SSS).
- **C**: Peso en inmersión.

1.12.2.1.5. ***Flujo y estabilidad.*** El ensayo de estabilidad y flujo se realizó dentro de las 24 horas posteriores a la compactación de las probetas, siguiendo la norma INV-E-748-13. Primero, los especímenes se expusieron a 60°C durante 30 a 40 minutos en un baño de agua, durante este tiempo, se lubricaron las mordazas para garantizar un deslizamiento suave al aplicar la carga, manteniendo su temperatura entre 20 y 40°C. Luego, el espécimen se colocó en la mordaza inferior, se ensambló la mordaza superior y se centró en la prensa Marshall, donde se colocó un medidor de deformación. Se aplicó una carga al espécimen hasta su falla, momento en el cual la prensa proporcionó los valores de estabilidad y flujo. El valor del flujo se expresa en milímetros o en 1/100

pulgada, y la estabilidad Marshall corresponde a la carga en el momento del flujo.

1.12.2.1.6. ***Gravedad específica máxima teórica.*** El procedimiento se rige por la INV-E-735-15, con el fin de determinar la densidad y la gravedad específica máxima (Gmm), propiedades fundamentales que se ven afectados por la composición de la mezcla en términos de dosificación y de materiales asfálticos, para ello se introdujo 2500gr de la mezcla asfáltica suelta y seca, en un contenedor calibrado (Figura 20).

Figura 19:

Equipo para determinar la gravedad especifica máxima teórica

Luego, se añadió agua a temperatura ambiente para sumergir la muestra, y se aplicó vacío gradualmente para reducir la presión en el frasco a 4.0 kPa o menos durante unos 15 minutos. Después, se retiró gradualmente el vacío y se determinó el volumen de la muestra llenándolo con agua hasta el nivel de la muestra y pesándolo en el aire, el valor de la gravedad se halló con la ecuación 27.

$$\boldsymbol{Gmm} = \frac{A}{A + (D - E)} \quad (\mathbf{27})$$

En donde:

- **Gmm**: Gravedad específica máxima de la mezcla
- **A**: Masa de espécimen seco en el horno (g)
- **D**: Masa del contenedor lleno de agua a 25°C hasta marca de calibración (g)
- **E**: Masa del contenedor con espécimen lleno de agua a 25°C hasta marca de calibración (g)

1.12.2.1.7. *Selección del contenido de cemento asfáltico óptimo.* Para determinar el porcentaje de cemento asfáltico final se realizó una serie de cálculos como el porcentaje de vacíos con aire, los vacíos del agregado mineral y vacíos llenos de cemento asfáltico, para esto se usó la ecuación 28, 29 y 30 respectivamente. Además de estos parámetros también se tuvo en cuenta la estabilidad y el flujo.

$$\boldsymbol{Va} = \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right) \times 100 \ (\mathbf{28})$$

$$\boldsymbol{VFA} = \left(\frac{VMA - Va}{VMA}\right) \times 100 \ (\mathbf{30})$$

$$\boldsymbol{VMA} = 100 - \left(\frac{\%Agr \times Gmb}{Gagr}\right) \ (\mathbf{29})$$

En donde:

- $\boldsymbol{Va}$: Porcentaje de vacíos con aire.
- $\boldsymbol{Gmb}$: Gravedad específica bulk promedio.
- $\boldsymbol{Gmm}$: Gravedad específica máxima teórica.
- $\boldsymbol{VMA}$: Porcentaje de vacíos del agregado mineral.
- $\%\boldsymbol{Agr}$: Porcentaje de agregados que se usó en la mezcla.
- $\boldsymbol{Gagr}$: Gravedad específica de la mezcla combinada.
- $\boldsymbol{VFA}$: Porcentaje de vacíos llenos de cemento asfáltico.

Para finalizar se realizan las siguientes gráficas:

- Pb vs Va
- Pb vs VMA
- Pb vs VFA
- Pb vs estabilidad
- Pb vs flujo
- Pb vs estabilidad/flujo

Cada una de estas gráficas arroja una curva, con las cuales se determinó el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para cada gráfica considerando que los valores se encuentren dentro de los límites establecidos por la norma INV E en el artículo 450.

1.12.2.1.8. ***Adición del porcentaje de aceite crudo de palma.*** Consistió en agregar el porcentaje de aceite crudo de palma al cemento asfáltico mediante el proceso de mezclado descrito anteriormente, este porcentaje corresponde al que en el tercer objetivo se determinó que cambió y mejoró algunas de las propiedades del cemento asfáltico.

1.12.2.1.9. ***Fabricación de especímenes de prueba modificada y relaboración de ensayos de gravedad máxima teórica, específica, flujo y estabilidad.*** Se elaboraran briquetas adicionando el cemento asfáltico con el porcentaje (%) de aceite crudo de palma que demuestro mejora en las propiedades del cemento asfáltico base, el cual se determinó anteriormente, para llevar a cabo esto se seguirá el mismo procedimiento mencionado anteriormente, desde la separación de materiales y realizando briquetas con el porcentaje (%) óptimo de cemento asfáltico hallado anteriormente, pero con la adición del aceite crudo de palma, para volver a ejecutar los ensayos mecánicos que se realizaron a las briquetas convencionales.

1.12.2.1.10. ***Análisis comparativo.*** El análisis comparativo entre una mezcla asfáltica convencional y una modificada con aceite de palma evaluará las diferencias en sus propiedades y desempeño. Se realizarán pruebas considerando estabilidad, resistencia a la deformación y durabilidad, además de crear briquetas para propiedades mecánicas. Esto identificará cómo el aceite de palma afecta las características de la mezcla, como su capacidad de soportar cargas y temperaturas de mezclado. Aunque no se medirán, se podrían identificar cambios en emisiones. La comparación de resultados determinará si la modificación con aceite de palma mejora el rendimiento de la mezcla asfáltica.

1.12.3. *Variables*

A partir de cada objetivo específico que se determinó para esta investigación, se definieron variables independientes como el cemento asfáltico base, el aceite crudo de palma y la mezcla convencional y modificada, en cuanto a las variables dependientes se establecieron las propiedades físicas y reológicas del cemento asfáltico, las propiedades físicas del aceite crudo de palma, el contenido de aceite crudo de palma y el método Marshall.

2. Presentación de resultados

2.1. Propiedades del cemento asfáltico base

2.1.1. *Caracterización física del cemento asfáltico base*

2.1.1.1. Punto de inflamación y combustión. Los resultados del ensayo para la determinación de temperaturas de inflamación y combustión se encuentran en el anexo 9. Este resultado indica que el cemento asfáltico 60-70 a una temperatura de 270° no presento burbujas ni liberaba vapores lo suficientemente inflamables para formar una mezcla inflamable con el aire. Esto apunta que el material tiene propiedades de combustión controlada, favoreciendo su seguridad durante su uso y manipulación.

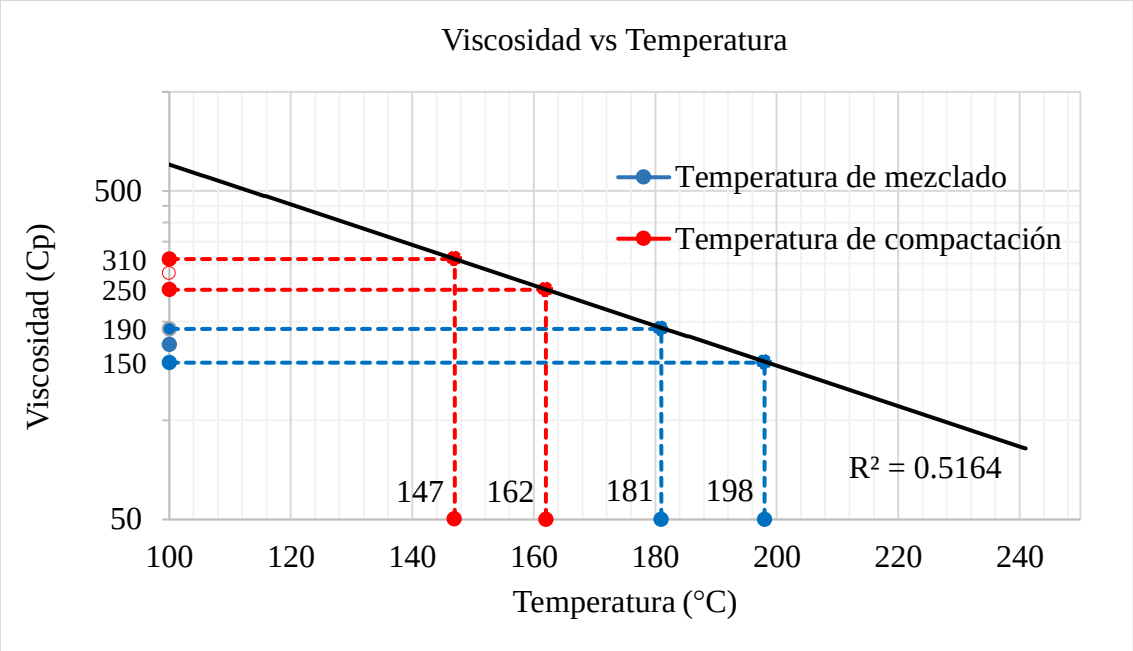
2.1.1.2. Penetración. Los resultados del ensayo se presentan en el anexo 10, donde se realizó el ensayo 3 veces, para lo que se obtiene un valor promedio de 63.7 dm, por lo que la penetración que corresponde a un cemento asfáltico 60 – 70. El resultado de 63.7 dm se encuentra en el rango según las especificaciones INVIAS 2013.

2.1.1.2.1. ***Índice de penetración.*** Teniendo en cuenta los resultados del anexo 11. Se logró determinar que el índice de penetración es -3.97, esto quiere decir que el índice de penetración se encuentra en el grupo de IP < –1: Cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso.

2.1.1.2.2. ***Viscosidad.*** Se desarrolló este ensayo desde una temperatura de 70 °C hasta una temperatura de 240°C, con las cuales se obtuvo la siguiente gráfica que relaciona la viscosidad en función de la temperatura, esta, es útil al momento de realizar el diseño Marshall de las briquetas convencionales.

Figura 20*:*

Curva de viscosidad



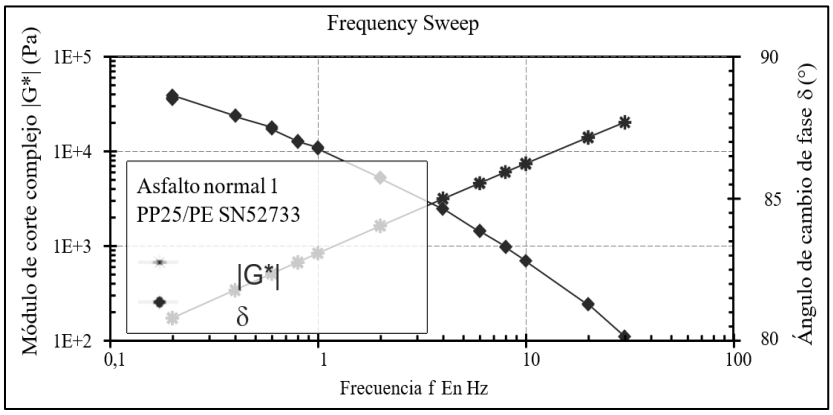
2.1.1.3. Punto de ablandamiento. Se obtuvo un resultado para cada una de las muestras realizadas, obteniendo en promedio una temperatura para que se produzca el ablandamiento del cemento asfáltico de 51.4°C, estando dentro del rango de 48-54 Celsius, establecidos en la INV-E 712.

2.1.2. *Caracterización reológica del cemento asfáltico base*

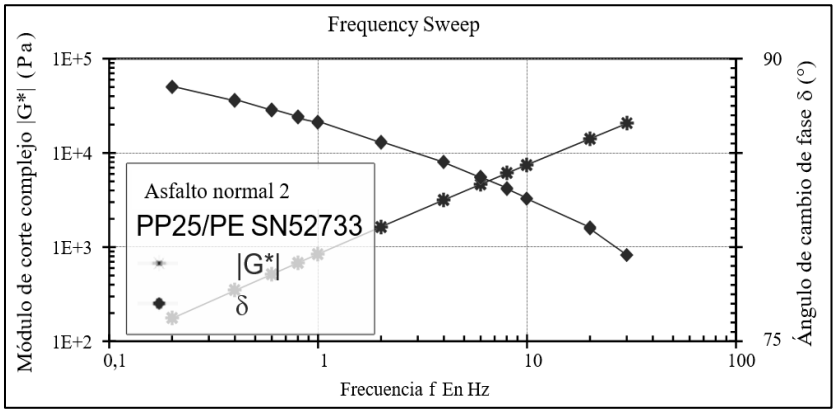
El reómetro Anton Paar arroja los resultados del ángulo fase y módulo de corte complejo a diferentes revoluciones (Anexo 12 y 13) además suministro las siguientes graficas (Figura 21), con los valores suministrados por el equipo y al aplicar la fórmula 1, se obtuvo un factor de ahuellamiento para la muestra 1 de 7.42 kPa y de 7.56 kPa para la muestra 2. Estos resultados son aceptados dado a que se encuentran por encima de 1 kPa.

Figura 21:

Graficas análisis reológico; A) muestra 1, B) muestra 2



(A)



(B)

2.2. Propiedades del aceite crudo de palma

2.2.1. *Determinación de la composición física del aceite crudo de palma*

2.2.1.1. Determinación del punto de ebullición. El punto de ebullición promedio obtenido de 3 muestras de aceite crudo de palma es 320°C, lo que indica que el aceite crudo de palma no tiene problemas para mezclarse con el cemento asfáltico base a temperaturas entre 180°C y 190 °C. El aceite otorga la ventaja de resistir mayores temperaturas de tratamiento y uso antes de llegar a evaporarse. Sin embargo, con los equipos de la actualidad no es posible llegar a evaporar el aceite a temperatura ambiente, pues la presión necesaria para hacerlo llegaría a ser muy baja (-2765 MPa). (Rincon & Martinez, 2009)

2.2.1.2. Determinación de la humedad y de la materia volátil. El contenido de humedad

promedio obtenido de 3 muestras de aceite crudo de palma se determinó en un 0.17%. Este valor está por debajo del límite aceptable del 0.2%, indicando un bajo contenido de agua y una buena estabilidad del aceite.

2.2.1.3. Índice de refracción. Los resultados de laboratorio indican que el índice de refracción del aceite crudo de palma es 0.9, indicando que es un aceite con alta pureza y calidad para ser usado.

2.3. Propiedades del cemento asfáltico modificado con aceite de palma

2.3.1. *Ensayos físicos al cemento asfáltico modificado*

2.3.1.1. Viscosidad. Se realizó el ensayo de viscosidad en el viscosímetro rotacional a cada uno de los cementos asfálticos modificados obteniendo la siguiente gráfica (Figura 22) en donde se puede observar el comportamiento de cada uno de este conforme sea su adición de porcentaje, además se presenta líneas discontinuas las cuales corresponden a las viscosidades de compactación y mezclado. Con ello se pudo observar las temperaturas a las cuales el cemento asfáltico debería ser mezclado y compactado, las cuales se presentan en la tabla 1

Figura 22:

Viscosidades de los cementos asfálticos modificados

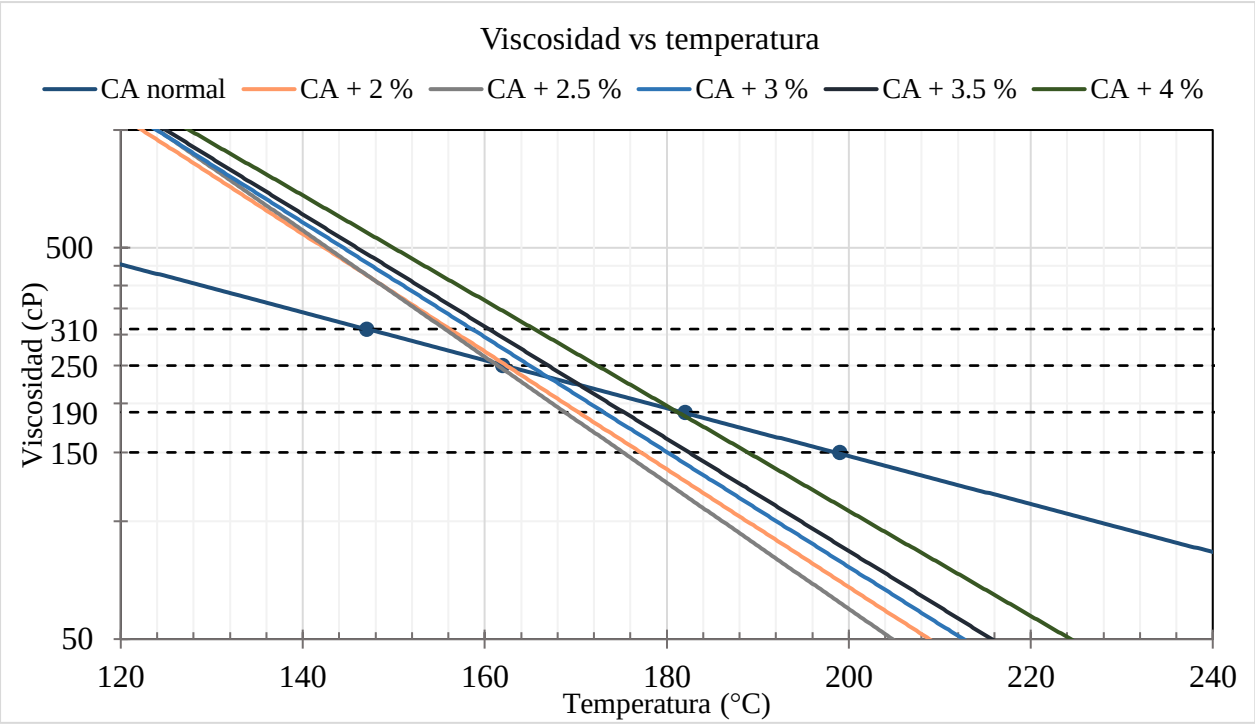


Tabla 1:

Temperaturas de mezclado y compactación

Parámetro	Temperatura compactación (°C)	Temperatura de mezclado (°C)
Cemento Asfáltico	147-162	181-198
CA + 2%	156-162	170-177
CA + 2.5%	155.5-161	168.5-175.5
CA + 3%	158.5-165	173-180
CA + 3.5%	160-166.5	175-183
CA + 4%	166-173	181-189

Los resultados obtenidos en la gráfica de viscosidades, para el rango de temperaturas de 120 °C a 240 °C, muestran que la adición de aceite en el cemento asfáltico modificado incrementa la susceptibilidad térmica en comparación con el cemento asfáltico base. Debido a esta susceptibilidad, el cemento asfáltico modificado podría ser menos resistente en condiciones de climas cálidos o en zonas de tráfico pesado, donde las temperaturas elevadas pueden afectar su desempeño y durabilidad.

2.3.1.2. Punto de ablandamiento. Se obtuvo 2 resultados para cada una de las muestras realizadas, las cuales sus promedios se encuentran en la tabla 2, estos resultados se encuentran por fuera del rango de 48-54 Celsius, establecidos en la INV-E 712, por lo que se infiere que la adición del aceite vuelve al cemento asfáltico más blando.

Tabla 2:

Punto de ablandamiento al cemento asfáltico modificado

Parámetro	CA + 2%	CA + 2.5%	CA + 3%	CA + 3.5%	CA + 4%
Punto de ablandamiento	38.5	37.5	36.5	35.5	34.5

2.3.1.3. Punto de inflamación y combustión. Los resultados del ensayo para la determinación de temperaturas de inflamación y combustión mostraron que el cemento asfáltico 60-70 modificado con cada uno de los porcentajes de aceite a una temperatura de 270° no presento burbujas ni libero vapores lo suficientemente inflamables para formar una mezcla inflamable con el aire. Esto apunta que la adición del aceite a este material no compromete la seguridad del cemento asfáltico en términos de su susceptibilidad al fuego pues tiene propiedades de combustión controlada, favoreciendo su seguridad durante su uso y manipulación. Los resultados son coherentes, ya que cumple con la temperatura mínima de 230°Celsius, estipulada por la INV E-709 para cemento asfálticos 60-70.

2.3.2. *Ensayos reológicos al cemento asfáltico modificado*

2.3.2.1. Módulo de corte complejo y ángulo de cambio de fase. Se realizaron 2 pruebas por cada porcentaje de aceite, los resultados son indicados en: el anexo 14 para la adición de 2.0%, anexo 15 para la adición de 2.5%, anexo 16 para la adición de 3.0%, anexo 17 para la adición de 3.5% y, anexo 18 para la adición de 4.0%, teniendo en cuenta los datos del reómetro Anton Paar y la aplicación de la ecuación 1, los resultados en promedio de cada muestra son los suministrados en la siguiente tabla:

Tabla 3:

Propiedades reológicas de los cementos asfálticos modificados

Parámetro	CA + 2%	CA + 2.5%	CA + 3%	CA + 3.5%	CA + 4%
G* (kPa)	4.77	3.9	4.17	4.12	3.45
δ (°)	82.26	82.43	82.89	82.53	81.83
Factor de ahuellamiento (kPa)	4.81	3.93	4.2	4.16	3.49

2.3.3. *Determinación del porcentaje de aceite crudo de palma óptimo*

Para determinar el porcentaje el cual presenta una mejora o una similitud con el cemento asfáltico base se presenta la siguiente tabla resumen con todos los datos.

Tabla 4:

Resumen de datos cemento asfáltico normal y modificado

Parámetro	CA	CA + 2%	CA + 2.5%	CA + 3%	CA + 3.5%	CA + 4%
Temperatura compactación (°C)	147-162	156-162	155.5-161	158.5-165	160-166.5	166-173
Temperatura de mezclado (°C)	181-198	170-177	168.5-175.5	173-180	175-183	181-189
Punto de ablandamiento (°C)	51.4	38.5	37.5	36.5	35.5	34.5
Punto de ebullición (°C)	>270					
Ángulo de fase (G*) (°)	7.43	4.77	3.9	4.17	4.12	3.45
Módulo de corte complejo (δ) (kPa)	82.69	82.26	82.43	82.89	82.53	81.83
Factor de ahuellamiento (kPa)	7.49	4.81	3.93	4.2	4.16	3.49

Las modificaciones del cemento asfáltico cumplieron con las especificaciones, excepto el punto de ablandamiento. Se determinó que el porcentaje óptimo de adición al cemento asfáltico es 2.0%. Aunque este porcentaje resulta en un punto de ablandamiento 10°C bajo el mínimo especificado, es el más cercano al requerido, con esta adición, se logra reducir las temperaturas de mezclado en 10°C respecto al cemento asfáltico base. Además, presenta un factor de ahuellamiento más cercano al base, manteniendo una resistencia al ahuellamiento aceptable en comparación con las otras opciones.

2.4. Diseño Marshall para briquetas convencionales y modificadas

2.4.1. *Caracterización de agregado grueso y fino*

2.4.1.1. Granulometría de agregados pétreos. Para este proceso se toman pesos iniciales de la muestra retenida en cada tamiz, para agregado grueso y para el agregado fino, después, se obtienen los porcentajes pasan de la granulometría y demás datos que se presentan en la tabla 5.

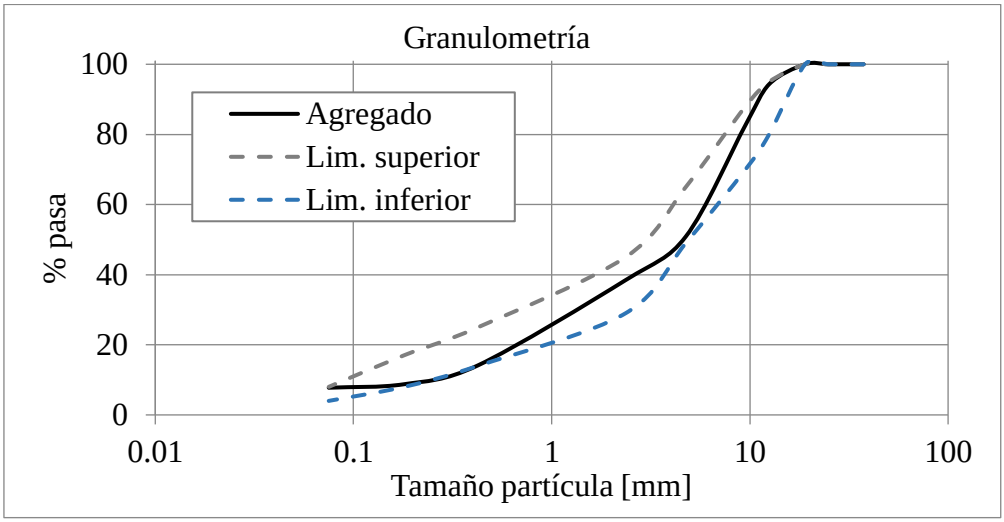
Tabla 5: Datos granulometría

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido	Peso pasa	% retenido	% retenido acumulado	% Pasa
3/4”	19	0	1858	0	0	100
1/2”	12.5	1858	1538	19	19	81
3/8”	9.5	1538	1619	15	34	66
No. 4	4.75	1619	1374	16	50	50
No. 10	2	1374	1905	14	64	36
No. 40	0.425	1905	1135	19	83	17
No. 80	0.18	1135	423	11	94	6
No. 200	0.075	423	128	4	99	1
fondo	0	128	9980	1	100	0
Σ		9980	-	100	-	-

La franja granulométrica inicial no cumple los límites del artículo 450 de INVIAS (anexo 19), por lo cual se ajustó mediante adición y sustracción en el peso de los agregados por tamiz, usando los porcentajes mostrados en el anexo 20. La comprobación se presenta en el anexo 21. La figura 23 muestra la curva granulométrica ajustada resultante.

Figura 23*:*

Curva granulométrica



2.4.1.2. Índice de aplanamiento y alargamiento – agregado grueso. Para el índice de alargamiento y aplanamiento se obtuvieron resultados de 73.9% y 20.65% respectivamente, para lo que se tiene un valor muy alto del índice de alargamiento ya que el artículo 450 establece un máximo de 10% (Anexo 22 y 23).

2.4.1.3. Gravedad específica del agregado grueso. Se realizó inicialmente una toma de peso de la muestra en condiciones de humedad natural, superficialmente seca, sumergida y seca en el horno (Anexo 24); datos necesarios para obtener el resultado deseado, con las ecuaciones 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6:

Resultados gravedad específica agregado grueso

Gravedad específica seca al horno	Gravedad específica SSS	Gravedad específica aparente	Densidad seca al horno (gr/cm3)	Densidad SSS (gr/cm3)	Densidad aparente (gr/cm3)	% Absorción
2.45	2.5	2.57	2.45	1.49	2.56	1.81

2.4.1.4. Desgaste de agregado grueso en la máquina de los Ángeles. Conforme al artículo 450 de las especificaciones del INVIAS, el porcentaje máximo permitido en el ensayo de la máquina de los ángeles para que el material sea considerado apto en la construcción de una capa de rodadura es del 25% de pérdidas. En este caso, se logró un porcentaje promedio óptimo de 4.92% (anexo 25) tras la aplicación de la ecuación 12, lo que indica que el material cumple con el límite establecido por las especificaciones para la construcción de la capa de rodadura.

2.4.1.5. Gravedad específica del agregado fino. Se realizó este ensayo al agregado fino dividido en 3 fracciones, las cuales corresponden a las fracciones 3, 4 y 5 del anexo 8, para ellos se tomó una muestra de 1kg de cada fracción la cual se llevó a inmersión por 24 horas, para luego ser secada hasta que la prueba del cono de arena sea correcta, siendo esta la muestra superficialmente seca, de esta se extraen 500 g, los cuales se llevan a un picnómetro al cual se le tomo su masa cuando este estaba lleno hasta la marca y a una temperatura de 23°C, con la muestra ya en el picnómetro y lleno con agua hasta la marca, se toma su masa, posteriormente esta muestra se retira del picnómetro y se lleva al horno hasta masa constante y se mide su masa. (Anexo 26), con esto datos se efectúan las ecuaciones 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 con lo que se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 7:

Resultados gravedad específica agregado fino

	Gr específica Seca horno	Gr específica SSS	Gr específica aparente	Densidad seca al horno (gr/cm3)	Densidad SSS (gr/cm3)	Densidad aparente (gr/cm3)	% Absorción
Fracc 3	2.55	2.66	2.87	2.54	2.65	2.86	4.38
Fracc 4	2.72	2.75	2.8	2.71	2.74	2.79	1.01
Fracc 5	2.41	2.5	2.65	2.4	2.5	2.64	3.73

2.4.1.6. Equivalente de arena. Conforme al artículo 450 de las especificaciones del INVIAS, el porcentaje mínimo permitido en el ensayo de equivalente de arena es del 50%. En este caso, se logró un porcentaje óptimo de 79% como se muestra en la tabla 8, lo que indica que el material cumple con el porcentaje (%) mínimo.

Tabla 8:

Lectura y resultado de equivalente de arena

Lectura de arena (mm)	Lectura de arcilla (mm)	Equivalente de arena (%)
126	159	79

2.4.2. *Diseño Marshall*

2.4.2.1. Porcentaje de cemento asfáltico óptimo inicial teórica. Utilizando la fórmula 21 mencionada en el cálculo del porcentaje óptimo inicial de cemento asfáltico, y con los datos obtenidos de la granulometría, se logró determinar los valores necesarios para las variables, los cuales están detallados en el anexo 27. Estos valores están influenciados por la distribución de tamaños de partículas en la muestra, considerando el porcentaje retenido en el tamiz No. 50 (A), el porcentaje que pasa el tamiz No. 50 y se retiene en el No. 100 (B), el porcentaje que pasa el No. 100 y se retuvo en el No. 200 (C) y el porcentaje que paso el tamiz No. 20 (D). De lo que se obtiene un porcentaje de cemento asfáltico óptimo inicial del 4%.

2.4.2.1.1. *Dosificación del material.* Para la dosificación se generan 5 mezclas haciendo variar el porcentaje de cemento asfáltico en 4.0%, 4.5%, 5.0%, 3.5% y 3.0% (mezcla 1, 2, 3, 4, 5).

Con estos porcentajes se obtiene el peso de cada fracción del agregado y del cemento asfáltico requerido para hacer la mezcla asfáltica deseada, estos pesos son indicados en el anexo 28 de cada dosificación, además se realizaron briquetas con un contenido de cemento asfáltico de 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0%, debido a que se consideró que el contenido de cemento asfáltico inicial era bajo comparado con otras investigaciones.

2.4.2.1.2. ***Separación del material por fracciones.*** Para determinar la separación de materiales, se sacó el total en gramos que se necesita para cada tamiz, considerando la fabricación de las briquetas y las mezclas sueltas para la determinación de la gravedad específica máxima teórica. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9:

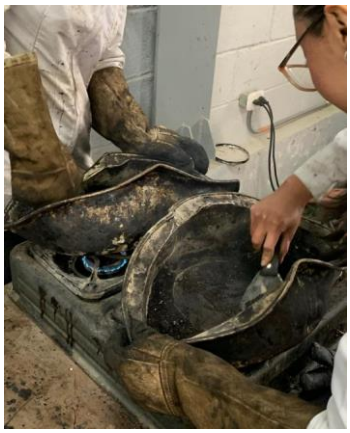
Cantidad en gramos de material necesario

Tamiz	Gramos totales
1/2”	4200
3/8”	8576
No. 4	23415
No. 10	9165
No. 40	17756
No. 80	3934
No. 200	737
Fondo	5747
CA	4350

2.4.2.1.3. ***Fabricación de especímenes convencionales.*** Para ellos se siguió el procedimiento de la norma INV-E-748-13, manteniendo una temperatura de mezclado entre 181 y 198° Celsius y una temperatura de compactación entre 147 y 162° Celsius, estos datos fueron obtenidos de la prueba de viscosidad realizada anteriormente al cemento asfáltico. Para el proceso de compactación se suministraron 75 golpes en cada cara de la briqueta

Figura 24:

Elaboración de briquetas: A) Mezclado, B) Verificación de temperatura, C) Briqueta final

A)  B) C)

2.4.2.1.4. ***Densidad Bulk para cada espécimen.*** Después del proceso de inmersión y secado de cada espécimen, se tomaron los datos correspondientes de A: Masa del espécimen seco en el aire, B: Masa superficialmente seco y, C: Masa del espécimen sumergido en agua para cada briqueta, además para cada espécimen se determina la gravedad Bulk (Adimensional) con la ecuación 24, la densidad (kg/m³) con la ecuación 25 y la absorción con la ecuación 26 (Anexo 29), a continuación, en la tabla 10 se expone los resultados en promedio para cada porcentaje (%) de cemento asfáltico

Tabla 10:

Valores de gravedad Bulk, densidad y absorción de especímenes

% De cemento asfáltico	Gravedad específica Bulk	Densidad (kg/m3)	Absorción (%)
3.00%	2.185	2178.36	2.64
3.50%	2.205	2198.14	2.36
4.00%	2.139	2132.08	2.21
4.50%	2.088	2081.34	2.11
5.00%	2.093	2086.70	1.88
5.50%	2.077	2070.59	1.72
6.00%	1.958	1951.70	1.50
6.50%	1.912	1906.17	1.27

2.4.2.1.5. ***Flujo y estabilidad.*** Se realizó una toma de espesores por cada espécimen de prueba, luego mediante la prensa Marshall se obtiene los resultados de resistencia y deformación para cada briqueta (Anexo 30), a continuación, en la tabla 10 se presenta el valor promedio obtenido en la resistencia (Estabilidad) y en deformación (Flujo) para cada porcentaje (%) de cemento asfáltico, estos datos presentados, cumplen con los límites expuestos en el artículo 450 del INVIAS, que expone que la estabilidad mínima es de 9 kN y que el flujo debe estar entre 2.0-3.5 mm.

Tabla 11:

Resultados parciales estabilidad y flujo

% CA	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)
3.0	11.625	2.228
3.5	12.670	2.245
4.0	13.337	2.599
4.5	15.951	2.808
5.0	16.053	2.842
5.5	15.15	2.86
6.0	10.34	2.99
6.5	9.67	3.13

2.4.2.1.6. ***Gravedad específica máxima teórica.*** Se realizo el mezclado de la muestra para los porcentajes de 4.0%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5% debido a que se cree que entre estos puede estar el porcentaje de cemento asfáltico óptimo, luego mientras se dejaba enfriar la mezcla se tomó el peso del contenedor lleno con agua a 25°Celsius (D), para luego retirar el agua y depositar la muestra en este, llenarlo de agua y quitarle los vacíos para tomarle el peso (E), con esto se calculó la gravedad específica máxima teórica con la ecuación 27, el resultado promedio se presenta en la tabla 12, debido a que se realizó 2 muestras por porcentaje.

Tabla 12:

Datos de gravedad específica máxima teórica

% CA	Gravedad específica máxima teórica
3.00%	2.4221
3.50%	2.3612
4.00%	2.2794
5.00%	2.2070
5.50%	2.1740
6.00%	2.0384
6.50%	1.9843

2.4.2.1.7. ***Selección de contenido de cemento asfáltico optimo.*** El porcentaje óptimo de cemento asfáltico se determinó en 5.00%. Este resultado se obtuvo tras analizar varias mezclas con contenidos de cemento asfáltico que oscilaban entre el 3.00% y el 6.50%. El análisis se realizó mediante pruebas de densidad, estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos, entre otras. Se elaboraron gráficas que relacionan el porcentaje de cemento asfáltico con Va, VMA, VFA, estabilidad, flujo y la relación estabilidad/flujo, los valores y estas se presentan en los anexos 31, 32, 33, 34, 35, 36 y 34, respectivamente. El porcentaje óptimo permite que los valores de vacíos, vacíos rellenos de cemento asfáltico (VFA) y vacíos de agregado mineral (VMA) se mantengan dentro de los rangos establecidos por la normativa INVIAS.

El 5.00% de cemento asfáltico proporciona un equilibrio adecuado entre resistencia a la deformación y flexibilidad. Esto asegura que la mezcla pueda soportar las condiciones de tráfico y clima para las cuales fue diseñada. Por lo tanto, se considera que este porcentaje es el óptimo para garantizar una superficie de rodadura eficiente y de larga duración.

2.4.2.1.8. ***Fabricación de especímenes modificados.*** Para ellos se siguió el procedimiento de la norma INV-E-748-13, manteniendo una temperatura de mezclado entre 170 y 177° Celsius y una temperatura de compactación entre 156 y 162° Celsius, estos datos fueron obtenidos de la prueba de viscosidad realizada anteriormente al cemento asfáltico. Para el proceso de compactación se suministraron 75 golpes en cada cara de la briqueta

2.4.2.1.9. ***Ensayos mecánicos y análisis volumétrico mezcla modificada.*** Se realizo el análisis volumétrico para la mezcla de cemento asfaltico modificado con 2% de aceite crudo de palma usando 5% de cemento asfaltico base seleccionado anteriormente para una mezcla asfáltica

convencional.

Tabla 13:

Resumen de datos análisis mezcla asfáltica modificada

Ensayo	Resultado
Gravedad especifica de Bulk	2.07901
Densidad (Kg/m3)	2078.96
Absorción (%)	1.66
Flujo(mm)	2.907
Estabilidad (KN)	15.174
Gravedad específica máxima teórica	2.2040
PS	0.95
VA	5.67
VMA	21.81
VFA	73.99

2.4.2.1.10. ***Análisis comparativo entre mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada.*** El análisis comparativo entre la mezcla asfáltica convencional y la modificada con 2% de aceite de palma revela cambios sutiles en sus propiedades. La incorporación del aceite de palma resultó en una mezcla ligeramente menos densa, con menor absorción, un leve incremento en el flujo, y una reducción en la estabilidad, manteniendo el cumplimiento de los requisitos INVIAS. Se observa una disminución en la gravedad específica de Bulk y densidad, una reducción en la absorción que potencialmente mejoraría la resistencia a daños por humedad (Moisture Damage to Hot-Mix Asphalt Mixtures, 2012), y un ligero aumento en el flujo, indicado una mayor deformabilidad bajo carga. Adicionalmente, se registró una disminución en la estabilidad, aunque permaneciendo por encima del mínimo requerido, un leve incremento en los vacíos con aire (VA) y vacíos en el agregado mineral (VMA), y una reducción en los vacíos llenos de asfalto (VFA).

Estas modificaciones conllevan implicaciones tanto positivas como negativas. La menor absorción beneficia la durabilidad, aumentando la resistencia al agua y a condiciones climáticas adversas, mientras que la reducción en densidad disminuye el peso de la estructura. Sin embargo, la menor estabilidad y el aumento del flujo compromete la resistencia a deformaciones,

particularmente en condiciones de altas temperaturas o cargas pesadas. El incremento de vacíos influye en la susceptibilidad al agua y en el comportamiento térmico de la mezcla. Según Garnica Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta (2004), altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas de alta permeabilidad, lo que puede facilitar la circulación de aire y agua a través del pavimento, potencialmente ocasionando endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado.

Considerando estas características, la mezcla modificada presenta tanto desafíos como oportunidades para su aplicación en diversos climas. Se estima que su uso podría ser más apropiado en climas fríos, donde la reducción en la absorción puede mitigar los efectos del agua y prevenir el endurecimiento prematuro del asfalto y el consecuente desprendimiento del agregado. En climas cálidos, el aumento del flujo y la disminución de la estabilidad podrían incrementar el riesgo de ahuellamiento. No obstante, dado que los valores se mantienen cercanos a los de la mezcla asfáltica convencional, las afectaciones en cuanto a estabilidad y flujo quizá no sean considerables en un clima cálido.

Tabla 14:

Comparativa de datos mecánicos y volumétricos mezclas asfálticas

Ensayo	CA base	CA + 2% Aceite	Requisito INVIAS
Gravedad especifica de Bulk	2.093	2.086	-
Densidad (Kg/m3)	2086.70	2078.96	-
Absorción (%)	1.88	1.66	-
Flujo(mm)	2.842	2.907	2.0 – 3.0
Estabilidad (KN)	16.053	15.174	> 9.0
Gravedad específica máxima teórica	2.2070	2.2040	-
PS	0.95	0.95	-
VA (%)	5.17	5.35	4.0 – 6.0
VMA (%)	21.28	21.54	> 15%

Ensayo	CA base	CA + 2% Aceite	Requisito INVIAS
VFA (%)	75.73	75.15	65 – 75%

3. Conclusiones

A partir de la interpretación de las propiedades físicas del aceite crudo de palma, indica que es un buen modificador para el cemento asfáltico, ya que una baja cantidad de agua en el aceite evita problemas de disolución durante la mezcla con el cemento asfáltico, lo que garantiza una mejor adhesión entre ambos materiales y el aceite otorga la ventaja de resistir mayores temperaturas de tratamiento y uso antes de llegar a evaporarse.

En cuanto a la viscosidad del cemento asfáltico modificado, los resultados obtenidos en la gráfica de viscosidades, para el rango de temperaturas de 120 °C a 240 °C, indican que la adición de aceite en el asfalto modificado incrementa la susceptibilidad térmica en comparación con el cemento asfáltico base. Esto se evidencia en el aumento de la pendiente de las curvas de viscosidad, resultando en variaciones más pronunciadas de consistencia ante cambios de temperatura.

La adición del 2% de aceite crudo de palma muestra un punto de ablandamiento de 38.5 °C, un valor superior al de los demás porcentajes de adición que disminuyen a medida que se incrementa el contenido de aceite, el factor de ahuellamiento con esta adición es de 4.81 kPa, lo cual es menor que el del cemento asfáltico base (7.49 kPa) pero mayor que el de los demás porcentajes de adición. Con esta adición, se logra reducir las temperaturas de mezclado en 10°C respecto al cemento asfáltico base.

Se determinó que el porcentaje óptimo de aceite crudo de palma es del 2%, basado en el análisis de propiedades físicas y reológicas del cemento asfáltico modificado. Esta proporción mantiene las propiedades del cemento asfáltico base, conservando en su mayoría su clasificación dentro de la categoría 60/70 lo que garantiza que las propiedades esenciales como la consistencia, estabilidad y durabilidad se mantengan en los parámetros requeridos para su uso en pavimentación.

En el rango de viscosidad de mezclado (150-190 cP), todos los asfaltos modificados presentaron temperaturas de mezcla más bajas. El 2% de aceite crudo de palma permitió reducir la temperatura de mezclado en 10 °C, demostrando el potencial para disminuir las temperaturas de producción en planta, lo que conlleva beneficios ambientales al reducir el consumo energético y las emisiones.

Para el rango de viscosidades de compactación (280 ± 30 cP), los cementos asfálticos modificados mostraron temperaturas superiores al cemento asfáltico base. Aunque esto podría parecer problemático, en la práctica no representa un inconveniente, en planta de asfalto, ni en laboratorio, ya que estas temperaturas se alcanzan después de un enfriamiento y, además, siguen siendo inferiores a las temperaturas de mezcla.

En cuanto al factor de ahuellamiento, se encontró que todos los cementos asfálticos base cumplieron con los requisitos establecidos. Este factor está directamente relacionado con la resistencia del material frente a la formación de ahuellamientos, lo que indica que los cementos asfálticos evaluados poseen una adecuada capacidad para resistir la deformación permanente bajo carga.

Los ensayos del diseño Marshall para determinar el contenido óptimo inicial de asfalto mostraron que, al añadir un porcentaje específico de cemento asfáltico (CA) a la mezcla, se cumplían los requisitos del INVIAS (artículo 450):

- Porcentaje de vacíos: 5,17% (límites: 4-6%)
- VMA: 21,28% (mínimo: 16%)
- VFA: 75,73% (límites: 65-75%)
- Estabilidad: 16 kN (mínimo: 9 kN)
- Flujo: 2,84 mm (límites: 2-3 mm)
- Relación estabilidad/flujo: 5,6 (límites: 3-6)
- Relación llenante/ligante efectivo: 1 (límites: 0,8-1,2)

La estabilidad disminuyó de 16,053 KN a 15,174 KN, esta diferencia no es considerable porque el valor se encuentra por encima del del mínimo requerido por las especificaciones (>9.0 KN según el estándar INVÍAS), lo que garantiza que la mezcla conserve un buen desempeño estructural. La funcionalidad del pavimento en condiciones normales no se ve comprometida por esta ligera reducción, sin embargo, es importante tener en cuenta en situaciones de tráfico intenso o bajo cargas pesadas, esta variación podría tener un impacto moderado en la durabilidad y resistencia del

pavimento a deformaciones. Aun así, dentro de los estándares actuales de diseño, la mezcla sigue siendo confiable y segura para la mayoría de las aplicaciones.

Se observa una reducción en la absorción de agua en la mezcla modificada, pasando de 1.88% en la mezcla convencional a 1.66%, reduciendo su capacidad para absorber agua lo que significa una menor susceptibilidad. Esto es favorable para la durabilidad del pavimento, ya que, según Rondón Quintana, Ruge Cárdenas, & Moreno Anselmi (2016) en las estructuras de pavimento, el deterioro por acción del agua se considera uno de los mecanismos críticos de degradación en las mezclas asfálticas. Este proceso compromete tanto la resistencia mecánica como la vida útil del pavimento al afectar la adherencia y cohesión del material. La presencia de humedad puede catalizar además otros tipos de fallas, incluyendo grietas por fatiga, agrietamientos térmicos superficiales (TDC) y deformación permanente en forma de ahuellamientos a reducción en la absorción prolonga la vida útil del pavimento.

4. Recomendaciones

Se sugiere llevar a cabo un diseño Marshall modificado, variando el porcentaje de asfalto mientras se mantiene constante el 2% de aceite crudo de palma. En esta investigación, se empleó un porcentaje de asfalto del 5% para realizar el diseño Marshall. Esto con el fin de comparar, a través de ensayos, las propiedades físicas, reológicas y mecánicas de ambos asfaltos modificados.

Además, se recomienda llevar a cabo ensayos de envejecimiento del asfalto modificado tanto a mediano como a largo plazo. Esto permitirá evaluar cómo la volatilidad del material varía en respuesta a los cambios de temperatura y a los procesos de oxidación. Comparando las propiedades del asfalto antes y después del envejecimiento, lo que facilitará la identificación de posibles mejoras en el diseño.

Considerando las características del aceite crudo de palma proveniente de la zona costera del departamento de Nariño, se sugiere realizar investigaciones en otros departamentos del país para evaluar si los efectos observados en la mezcla asfáltica modificada se mantienen o cambian con respecto a aceites provenientes de diferentes condiciones climáticas y de cultivo.

Referencias bibliográficas

Borhan, M. N., Ismail, A., & Rahmat, R. A. (2010). Evaluation of Palm Oil Fuel Ash (POFA) on Asphalt Mixtures. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5456-5463.

Aliaga Cueva, S. M., & Pulido Cornelio, R. O. (2022). *Propuesta de diseño de mezcla asfáltica en caliente modificado con aceite de palma para la reducción de emisiones de gases contaminantes en la construcción del tramo de la carretera Huánuco – La Unión 2021.*

asfaltos, M. (26 de Septiembre de 2023). *Facebook*. Obtenido de https://www.facebook.com/photo/?fbid=334367268956804&set=pcb.334368838956647&locale=nl_NL

Calvo Carrillo, M. d., Carranco Jáuregui , M. E., & Gil Romo , F. (Septiembre de 2011). *Alan Revista* . Obtenido de https://www.alanrevista.org/ediciones/2011/3/art-1/

Carretera, A. M. (2014). *Importancia de la conservación de carreteras.* Francia.

Cely Leal, N. E., Flórez Sánchez, J., & Gómez Páez, S. L. (2018). *Caracterización física y reológica del asfalto modificado con aceite de coco.*

Construcciones, P. y. (19 de Junio de 2021). *P y H Construyendo soluciones* . Obtenido de https://pyhca.com/mezclas-asfalticas-en-caliente/

Cutti Tello, 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.*

Diaz Rosero, D. N., & Vallejo paladines, C. M. (2019). *Evaluación física y reológica de mastíc asfáltico usando diferentes llenantes minerales no convencionales.*

Fedepalma. (30 de Junio de 2021). *La palma de aceite en el departamento de Nariño.* Obtenido de http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/141261

García Avila, A. J. (2015). *Diseño de mezclas asfálticas tibias utilizando aceite crudo de palma como reductor de viscosidad.* Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A., Alonso Romero, S., & Alarcón Orta, H. A. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas.* Sanfadila.

Icontec. (2017). *NTC 431: Grasas y aceites, aceite crudo de palma africana (elaeis guineensis).*

international, A. (2008). *Standar Specification for Performance Graded Asphalt Binder.*

INVIAS. (2012). *Articulo 450.*

INVIAS. (7 de Julio de 2023). *invias.gov.co*. Obtenido de invias.gov.co: https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial

Lopera Palacio, C. H. (2011). *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (elaeis guineensis).* Medellin: Universidad Nacional de Colombia.

Lopera Palacio, C. H., & Córdoba Maquilón, J. E. (2013). DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA A PARTIR DE LA MEZCLA DE ASFALTO Y ACEITE CRUDO DE PALMA. *Scielo Colombia* .

(2012). *Moisture Damage to Hot-Mix Asphalt Mixtures.* Washington, D.C.: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD.

Palacio, C. H. (2011). *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (elaeis guineensis).* Medellin: Universidad Nacionak.

Peña Dueñas, V. (2021). *Influencia de la cera orgánica (Apis Mellifera) en la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica WMA para climas frígidos.* Lima.

Rincon, S. M., & Martinez, D. M. (2009). Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. *Palmas, Vol 30, No 2*, 11-24.

Rondón Quintana, H. A., Ruge Cárdenas, J. C., & Moreno Anselmi, L. Á. (2016). Efecto del agua sobre el asfalto y su posible influencia en el daño por humedad en una mezcla asfáltica porosa. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 558-569.

Smith, M. Y. (1994). *Historia y determinismo tecnológico.* Madrid:Alianza .

Thives, L. P., & Ghisi, E. (2017). Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 72*, 473-484.

UNAM. (2020). *Determinación del punto de ebullición de sustancias orgánicas.* Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma México .

Urbano Orozco, O. E. (2014). *Obtención del porcentaje óptimo de asfalto para el diseño de mezclas densas en caliente, con cemento asfaltico normal y modificado, mediante el método Marshall, empleando agregados pétreos de la cantera Rio Téllez, vereda San José municipio de Funes, depa.*

Urbanos, C. d. (2023). *Tipos de mezclas asfálticas*.

Usquiano Tantalean, I. A., & Villarreal Guimarey, J. F. (2018). Diseño de una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de palma. *INGnosis, 4(1)*, 41-47.

Vega, W. G. (2021). *Aceite de palma para la conservación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente expuestos a transportes prolongados en climas fríos, Huancayo 2020.* Huancayo.

Vise. (2 de Septiembre de 2019). *Vise México* . Obtenido de https://blog.vise.com.mx/lo-que-debes-saber-de-la-mezcla-asfaltica-en-frio

Anexos

Anexo 1:

Tamices a utilizar

Tamices	Abertura
3⁄4”	19 mm
1⁄2”	12.5 mm
3⁄8”	9.5 mm
No. 4	4.75mm
No. 8	2.38mm
No. 10	2 mm
No. 40	0.425 mm
No. 80	0.180 mm
No. 200	0.075 mm

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras - INVIAS 213- 13.

Anexo 2:

Masa de la muestra partículas fracturadas

Tamaño máximo nominal mm (pulg)	Masa mínima de la muestra g (lb aprox)
9.50 (3⁄8)	200 (0.5)
12.5 (1⁄2)	500 (1.0)
19.0 (3⁄4)	1500 (3.0)
25.0 (1)	3000 (6.5)
37.5 (1 1⁄2)	7500 (16.5)
50.0 (2)	15 000 (33.0)
63.0 (2 1⁄2)	30 000 (66.0)
75.0 (3)	60 000 (132.0)
90.0 (3 1⁄2)	90 000 (198.0)

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras - INVIAS 227- 13.

Anexo 3:

Grupo de tamices partículas alargadas y planas

Grupo	Tamiz (in)
1	3/4
2	1/2
3	3/8
4	1/4

Anexo 4:

Masa mínima a utilizar partículas alargadas y planas

Tamaño máximo Nominal del agregado Mm (pg)	Masa mín. de la muestra Para índice de aplanamiento kg	Masa mín. de la muestra Para índice de alargamiento kg
50 mm (2)	35	----
37.5 mm (1 1⁄2)	15	15
25 mm (1)	5	5
19 mm (3⁄4)	2	2
12.5 mm (1⁄2)	1	1
9.5 mm (3⁄8)	0.5	0.5

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras - INVIAS 230- 13.

Anexo 5:

Masa mínima de la muestra gravedad específica agregado grueso

Tamaño máximo nominal		Masa mínima de la muestra del ensayo	
mm	**In**	**Kg**	**Lb**
12.5	1⁄2	2	4.4

Tamaño máximo nominal		Masa mínima de la muestra del ensayo	
19	3⁄4	3	6.6
25	1	4	8.8
37.5	1 1⁄2	5	11
50	2	8	18
63	2 1⁄2	12	26
75	3	18	40

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras - INVIAS 223- 13.

Anexo 6:

Masa de las fracciones desgaste en máquina de los Ángeles

Tamaños de tamiz		Masas de las diferentes fracciones			
Pasa tamiz	Ret. en tamiz	Granulometría			
(mm) In	(mm) In	A	B	C	D
37.5 (1 ½)	25.0 (1)				
25.0 (1)	19.0 (3/4)				
19.0 (3/4)	12.5 (1/2)	1250 ± 25			
12.5 (1/2)	9.5 (3/8)	1250 ± 25			
9.5 (3/8)	6.3 (1/4)	1250 ± 25	2500 ± 10		
6.3 (1/4)	4.75 (No. 4)	1250 ± 25	2500 ± 10	2500 ± 10	
4.75 (No. 4)	2.36 (No. 8)			2500 ± 10	5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras - INVIAS 218- 13.

Anexo 7:

Número de esferas y masa

Granulometría	Número de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5000 ± 25

Granulometría	Número de esferas	Masa de la carga (g)
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 25

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras - INVIAS 218-13.

Anexo 8:

Fracciones por tamices

Fracción	Tamices
1	3/4”- 3/8”
2	3/8”- No. 4
3	No. 4 – No. 40
4	No. 40- No. 200
5	< No. 200

Anexo 9:

Datos obtenidos de punto de inflamación

Punto de inflamación y combustión		
Nota: La temperatura a 270° no tuvo reacción		
Resultados		
%	**Ti (°C)**	**Tf (°C)**
30	125	116
40	116	119
45	119	124
45	120	120
50	120	123
55	123	117
60	117	121
65	121	120

70	120	125
70	125	127
75	127	131
75	131	133
80	133	137
85	137	140
90	140	145
90	145	149
90	149	153
95	153	163
95	163	166
100	166	174
100	174	188
100	188	195
100	195	200
100	200	217
100	217	220
100	220	225
100	225	231
100	231	235
100	235	242
100	242	250
100	250	253
100	253	264
100	264	267
100	267	270

Anexo 10:

Resultados penetración

Penetración de los materiales bituminosos	
Resultados	
Muestra 1 a 25°C (mm)	
p1	0.064
p2	0.0638
p3	0.0634
Pprom	0.0637

Anexo 11:

Resultados índice de penetración

Índice de penetración	
Datos	
P(mm)	6.37
T_{AB}(°C)	51.4
F	3.98
IP	-3.97

Anexo 12:

Resultados reología muestra 1

Frecuencia [Hz]	**Módulo de corte complejo |G*| [Pa]**	**Ángulo de cambio de fase (δ) [°]**
0.2	176	88.5
0.2	176	88.49
0.2	175	88.54
0.4	347	87.76
0.4	347	87.84
0.6	515	87.26
0.6	515	87.32
0.8	681	86.92

Frecuencia [Hz]	Módulo de corte complejo |G*| [Pa]	Ángulo de cambio de fase (δ) [°]
0.8	682	86.9
0.8	681	86.84
1	846	86.61
1	846	86.68
2	1645	85.54
2	1647	85.6
4	3177	84.5
4	3176	84.49
6	4650	83.69
6	4655	83.66
6	4649	83.71
8	6086	83.14
8	6101	83.09
10	7498	82.6
10	7497	82.56
20	14152	81.04
20	14174	80.96
30	20533	79.58

Anexo 13:

Resultados reología muestra 2

Frecuencia [Hz]	Módulo de corte complejo |G*| [Pa]	Ángulo de cambio de fase (δ) [°]
0.2	172	88.56
0.2	172	88.51
0.2	172	88.64
0.4	339	87.92
0.4	339	87.89

Frecuencia [Hz]	Módulo de corte complejo |G*| [Pa]	Ángulo de cambio de fase (δ) [°]
0.6	505	87.52
0.6	504	87.45
0.8	667	87.02
0.8	667	86.99
0.8	668	87.01
1	829	86.80
1	828	86.76
2	1612	85.73
2	1612	85.70
4	3120	84.63
4	3116	84.65
6	4564	83.83
6	4567	83.85
6	4570	83.85
8	5983	83.31
8	5981	83.28
10	7366	82.81
10	7362	82.79
20	13940	81.24
20	13938	81.28
30	20155	80.13

Anexo 14:

Reología cemento asfáltico + 2.0% de aceite

Cemento asfáltico con 2.0% aceite	
Prueba 1	**Prueba 2**

G*	δ	G*	δ
4.818354	82.19	4.71422	82.3
4.822021	82.17	4.707243	82.38
Promedio			
4.8201875	82.18	4.7107315	82.34
Factor de ahuellamiento			
4.87		4.75	

Anexo 15:

Reología cemento asfáltico + 2.5% de aceite

Cemento asfáltico con 2.5% aceite			
Prueba 1		**Prueba 2**	
G*	**δ**	**G***	**δ**
3.974009	82.3	3.816742	82.46
3.974151	82.4	3.815249	82.57
Promedio			
3.97408	82.35	3.8159955	82.515
Factor de ahuellamiento			
4.01		3.85	

Anexo 16:

Reología cemento asfáltico + 3.0% de aceite

Cemento asfáltico con 3.0% aceite			
Prueba 1		**Prueba 2**	
G*	**δ**	**G***	**δ**
4.21984	82.67	4.116276	83.23
4.219627	82.55	4.122281	83.1
Promedio			
4.2197335	82.61	4.1192785	83.165
Factor de ahuellamiento			

4.26	4.15

Anexo 17:

Reología cemento asfáltico + 3.5% de aceite

Cemento asfáltico con 3.5% aceite			
Prueba 1		**Prueba 2**	
G*	**δ**	**G***	**δ**
4.119032	82.83	4.122106	82.86
4.123599	82.13	4.127152	82.31
Promedio			
4.1213155	82.48	4.124629	82.585
Factor de ahuellamiento			
4.16		4.16	

Anexo 18:

Reología cemento asfáltico + 4.0% de aceite

Cemento asfáltico con 4% aceite			
Prueba 1		**Prueba 2**	
G*	**δ**	**G***	**δ**
3.602914	81.82	3.306745	81.83
3.600976	81.88	3.30377	81.79
Promedio			
3.601945	81.85	3.3052575	81.81
Factor de ahuellamiento			
3.64		3.34	

Anexo 19:

Limites granulométricos

Tipo de mezcla	**Tamiz (mm / U.S. Standard)**									
	37.5	**25**	**19**	**12.5**	**9.5**	**4.75**	**2.00**	**0.425**	**0.180**	**0.075**
	1 ½”	**1”**	**¾”**	**½”**	**3/8”**	**No. 4**	**No. 10**	**No. 40**	**No. 80**	**No. 200**

		% Pasa								
Densa	**MDC-25**	100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19		100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10				100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS 2013.

Anexo 20:

Ajuste granulométrico

TAMIZ	peso retenido	peso pasa	%retenido	%retenido acumulado	% pasa	lim sup	lim inf
3/4”	0	570	0	0	100	100.000	100.000
1/2”	570	1164	6	6	94	95.000	80.000
3/8”	1164	3178	12	17	83	88.000	70.000
No. 4	3178	1244	32	49	51	65.000	49.000
No. 10	1244	2410	12	62	38	45.000	29.000
No. 40	2410	534	24	86	14	25.000	14.000
No. 80	534	100	5	91	9	17.000	8.000
No. 200	100	780	1	92	8	8.000	4.000
fondo	780	9980	8	100	0		
	9980		100				

Anexo 21:

Cumplimiento limites granulométricos

Tamiz		1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	4	10	40	80	200
Mezcla		100.0	100.0	100.0	94.3	82.7	50.9	38.4	14.1	8.8	7.8
MDC-19	Mínimo	100.0	100.0	100.0	80.0	70.0	49.0	29.0	14.0	8.0	4.0
	Máximo	100.0	100.0	100.0	95.0	88.0	65.0	45.0	25.0	17.0	8.0
		Cumple	**Cumple**	**Cumple**	**Cumple**	**Cumple**	**Cumple**	**Cumple**	**Cumple**	**Cumple**	**Cumple**

Anexo 22:

Resultados índices de alargamiento

Masa de partículas alargadas	Masa total de la muestra	Índice de alargamiento %
1478	2000	73.9

Anexo 23:

Resultados índices de aplanamiento

Masa de partículas aplanadas	Masa total de la muestra	Índice de aplanamiento %
413	2000	20.65

Anexo 24:

Resultados de laboratorio gravedad agregado grueso

Muestra húmeda (gr)	Muestra SSS (gr)	Muestra sumergida (gr)	Muestra seca (gr)
3000	3039	1823	2985

Anexo 25:

Resultados máquina de los ángeles

Características	Muestra 1	Muestra 2
Masa muestra seca antes del ensayo	5000	5000
Masa muestra seca después del ensayo	4713	4795
% Perdidas	5.74	4.1
% Promedio	4.92	

.

Anexo 26:

Datos del agregado fino para ensayo de gravedad específica

Características	Fracción 3	Fracción 4	Fracción 5
Masa de la muestra seca al horno (g)	0.479	0.495	0.482
Masa del picnómetro lleno de agua (g)	0.67	0.67	0.67
Masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua (g)	0.982	0.988	0.97
Masa de la muestra saturada superficialmente seca usada para el ensayo (g)	0.5	0.5	0.5

Anexo 27:

Coeficiente porcentaje óptimo

Variable	Valor
A	88 %
B	3 %
C	1 %
D	8 %

Anexo 28:

Dosificación para cada porcentaje de cemento asfáltico

Dosificación para 1200 g de mezcla asfáltica									
Tamiz	**3.00%**	**3.50%**	**4.00%**	**4.50%**	**5.00%**	**5.50%**	**6.00%**	**6.50%**	**7.00%**
1/2”	66	66	66	65	65	65	64	64	64
3/8”	136	135	134	134	133	132	132	131	130
No. 4	371	369	367	365	363	361	359	357	355
No. 10	145	144	144	143	142	141	141	140	139
No. 40	281	280	278	277	275	274	272	271	269

Dosificación para 1200 g de mezcla asfáltica									
Tamiz	**3.00%**	**3.50%**	**4.00%**	**4.50%**	**5.00%**	**5.50%**	**6.00%**	**6.50%**	**7.00%**
No. 80	62	62	62	61	61	61	60	60	60
No. 200	12	12	12	11	11	11	11	11	11
fondo	91	91	90	90	89	89	88	88	87
CA	36	42	48	54	60	66	72	78	84

Anexo 29:

Datos gravedad especifica bulk, densidad y absorción

% DE CA	No. DE BRIQUETA	PESO SUMERGIDO (Kg) (C)	PESO DESPUÉS DE SUMERGIDO (Kg) (B)	PESO SECO (Kg) (A)	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK	DENSIDAD (Kg/m3)	ABSORCIÓN (%)
3.0%	1	0.669	1.194	1.179	2.25	2238.98	2.86
	2	0.644	1.182	1.169	2.17	2166.34	2.42
	3	0.639	1.186	1.172	2.14	2135.44	2.63
	4	0.644	1.183	1.169	2.17	2161.40	2.69
	5	0.656	1.192	1.178	2.20	2191.17	2.61
3.5%	1	0.645	1.182	1.169	2.18	2170.38	2.42
	2	0.669	1.194	1.182	2.25	2243.39	2.28
	3	0.658	1.193	1.18	2.21	2198.99	2.43
	4	0.650	1.187	1.175	2.19	2181.52	2.23
	5	0.657	1.192	1.179	2.20	2195.08	2.43
4.0%	1	0.627	1.181	1.169	2.11	2103.78	2.17
	2	0.624	1.177	1.165	2.11	2099.65	2.24
	3	0.652	1.194	1.182	2.18	2173.53	2.29
	4	0.622	1.178	1.167	2.10	2092.09	2.03
	5	0.658	1.197	1.184	2.20	2190.81	2.34
4.5%	1	0.621	1.178	1.167	2.10	2089.62	1.98
	2	0.618	1.179	1.166	2.08	2072.94	2.32
	3	0.615	1.177	1.165	2.07	2066.73	2.14
	4	0.618	1.178	1.166	2.08	2076.64	2.14
	5	0.625	1.180	1.169	2.11	2100.74	1.98
5.0%	1	0.627	1.184	1.173	2.10	2098.48	1.97
	2	0.620	1.182	1.171	2.08	2077.38	1.96
	3	0.623	1.181	1.172	2.10	2094.77	1.54
	4	0.618	1.177	1.167	2.09	2080.50	1.88
	5	0.620	1.179	1.168	2.09	2082.29	2.06
5.5%	1	0.614	1.175	1.1676	2.08	2076.52	1.32

% DE CA	No. DE BRIQUETA	PESO SUMERGIDO (Kg) (C)	PESO DESPUÉS DE SUMERGIDO (Kg) (B)	PESO SECO (Kg) (A)	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK	DENSIDAD (Kg/m3)	ABSORCIÓN (%)
	2	0.615	1.176	1.165	2.08	2071.87	1.89
	3	0.611	1.172	1.161	2.07	2063.31	1.96
6.0%	1	0.564	1.165	1.157	1.93	1919.35	1.33
	2	0.558	1.164	1.154	1.90	1898.58	1.65
	3	0.602	1.171	1.1624	2.04	2036.75	1.51
6.5%	1	0.558	1.159	1.152	1.92	1911.05	1.16
	2	0.554	1.155	1.147	1.91	1902.76	1.33
	3	0.556	1.158	1.15	1.91	1904.57	1.33

Anexo 30:

Datos de estabilidad y flujo

No	% CA	Espesor promedio	Estabilidad	Flujo
1	**3**	69.71	15.16	2.70
2		70.02	14.63	2.38
3		68.95	20.28	2.68
	PROMEDIO		17.63	2.63
1	**3.5**	70.36	11.99	2.31
2		68.49	13.52	2.19
3		69.7	12.50	2.23
	PROMEDIO		12.67	2.24
1	**4**	68.12	13.00	2.47
2		71.51	13.19	2.50
3		70.82	13.83	2.83
	PROMEDIO		13.34	2.60
1	**4.5**	71.81	15.35	2.81
2		69.46	16.56	2.79
3		67.35	15.94	2.82
	PROMEDIO		15.95	2.81
1	**5**	66.62	16.41	2.78
2		66.97	15.71	2.92

No	% CA	Espesor promedio	Estabilidad	Flujo
3		66.88	16.04	2.83
	PROMEDIO		16.05	2.84
1		66.62	15.45	2.75
2	**5.5**	66.97	14.82	2.98
3		66.88	15.18	2.85
	PROMEDIO		15.15	2.86
1		66.62	9.85	3.19
2	**6**	66.97	10.44	2.82
3		66.88	10.15	2.96
	PROMEDIO		10.15	2.99
1		66.62	9.35	3.37
2	**6.5**	66.97	10.13	2.85
3		66.88	9.52	3.17
	PROMEDIO		9.67	3.13

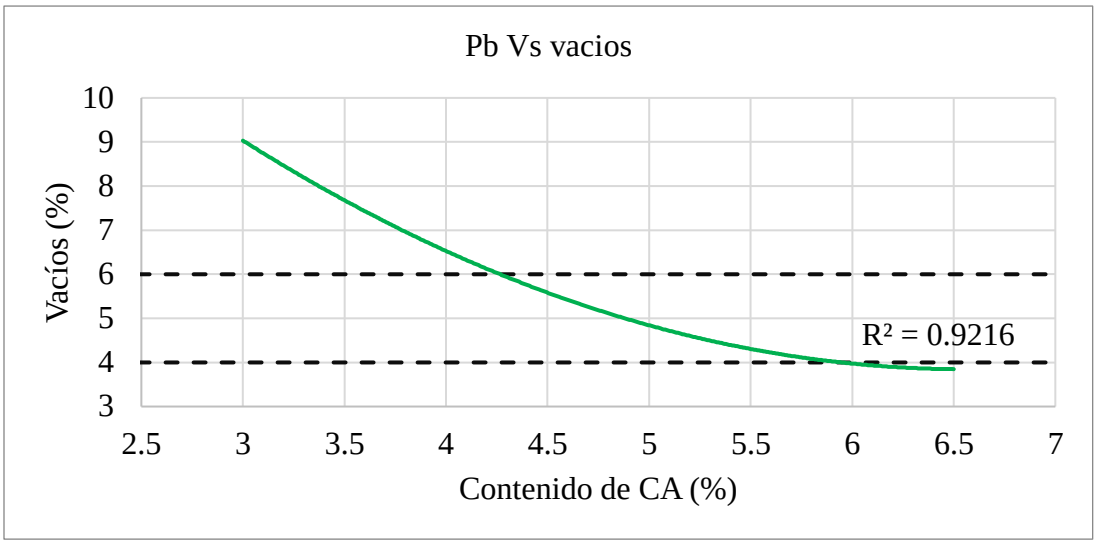
***Anexo 31**:*

Datos para selección de cemento asfáltico optimo

% CA	pb(gr)	ps(gr)	PS	VA	PBE	VMA	VFA
3	36	1164	0.97	9.79	2.94	16.09	39.15
3.5	42	1158	0.965	6.62	4.23	15.77	57.99
4	48	1152	0.96	6.18	5.98	18.72	66.98
4.5	54	1146	0.955	5.94	7.39	21.07	71.80
5	60	1140	0.95	5.17	7.85	21.28	75.73
5.5	66	1134	0.945	4.47	8.76	22.30	79.95
6	72	1128	0.94	3.96	12.08	27.15	85.40
6.5	78	1122	0.935	3.65	13.65	29.23	87.52

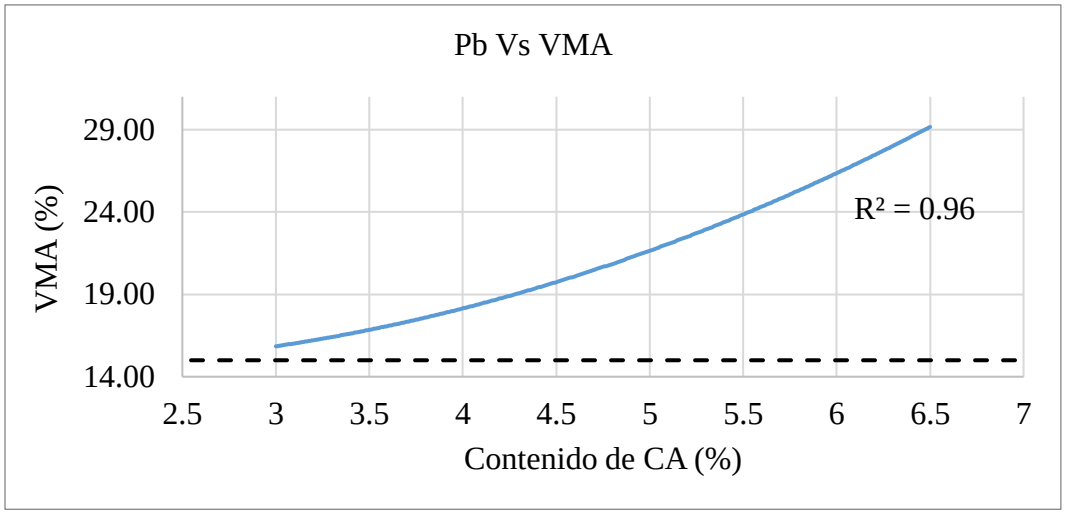
Anexo 32:

Grafica contenido de cemento asfáltico Vs vacíos



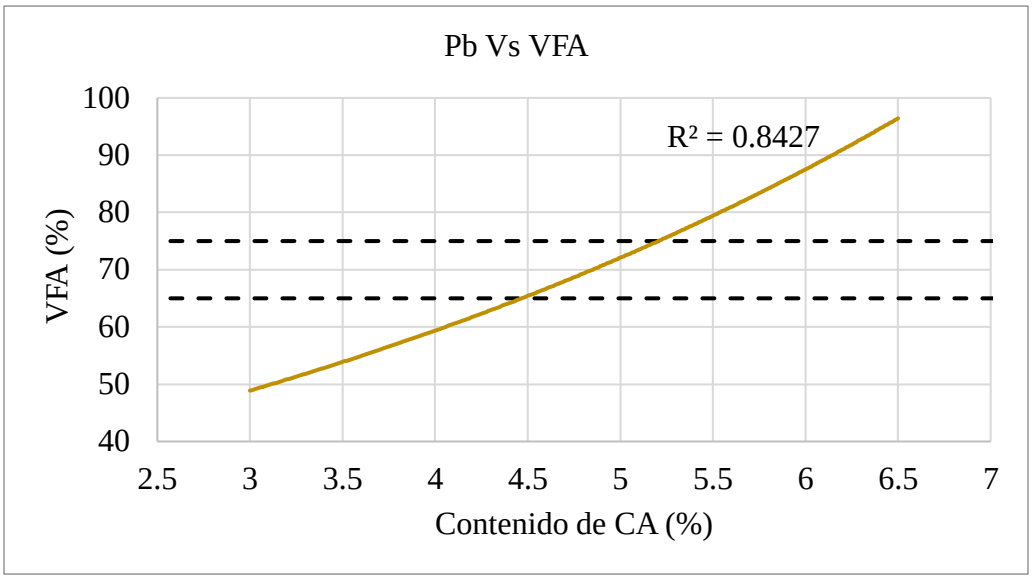
Anexo 33:

Grafica contenido de cemento asfáltico Vs vacíos en el agregado mineral



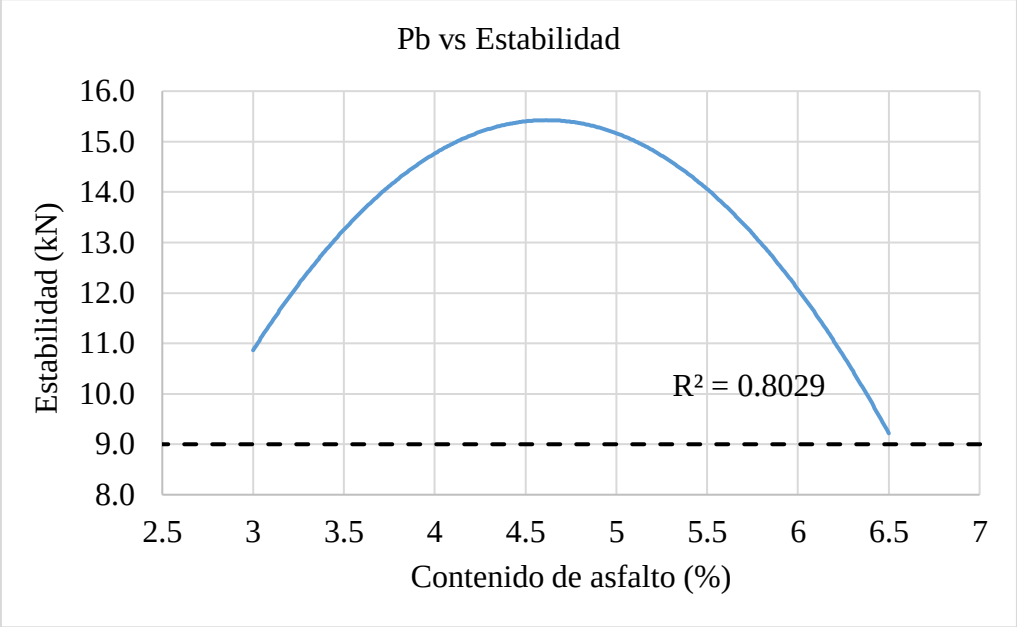
Anexo 34:

Grafica contenido de cemento asfáltico Vs vacíos llenos de cemento asfáltico



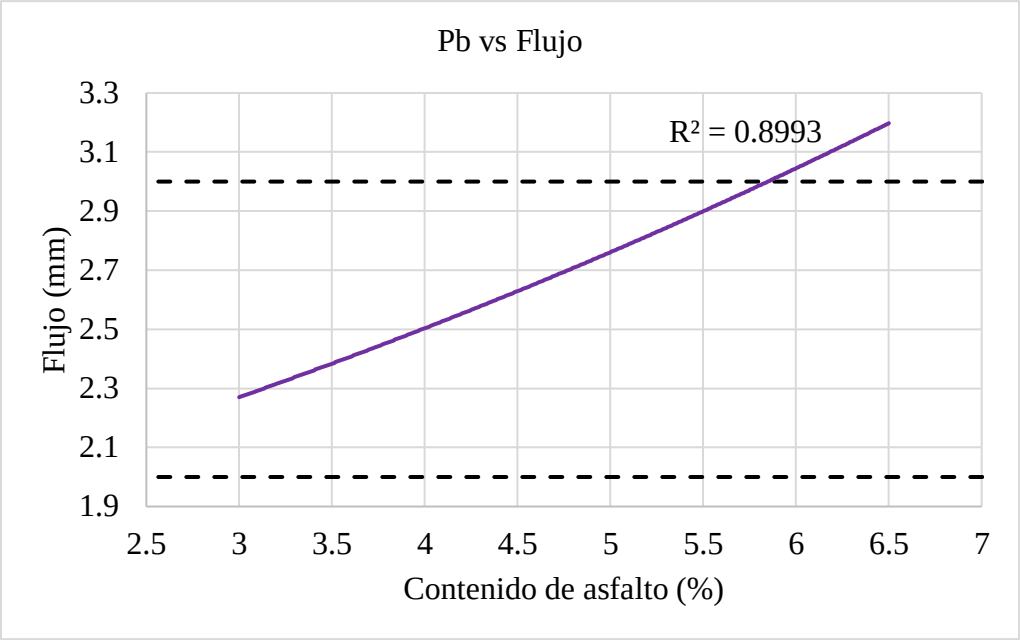
Anexo 35:

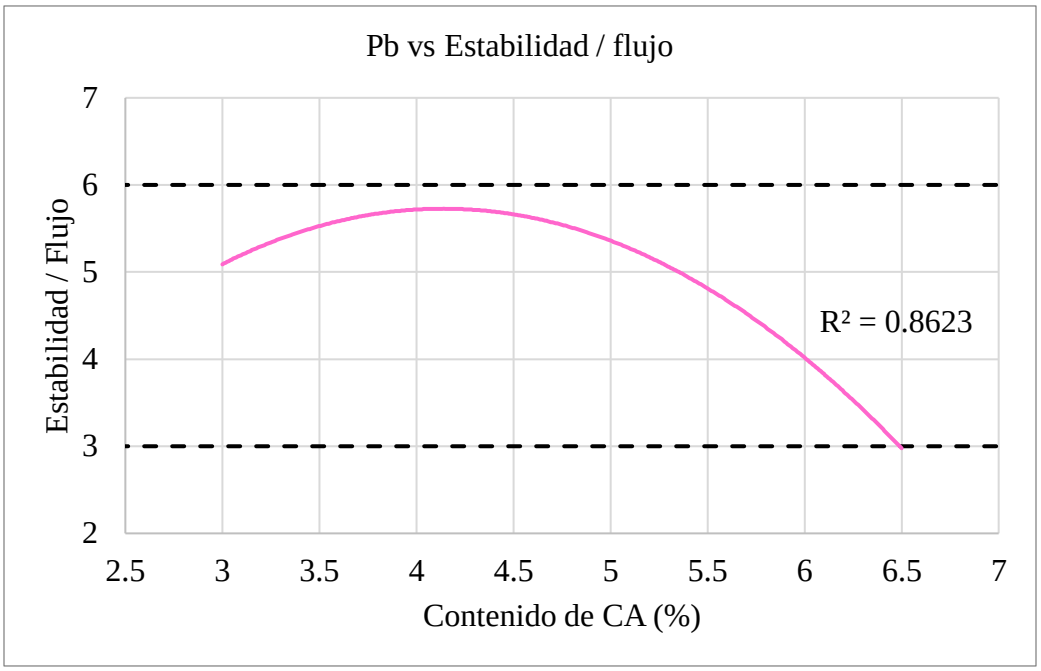
Grafica contenido de cemento asfáltico Vs estabilidad



Anexo 36:

Grafica contenido de cemento asfáltico Vs flujo



Anexo 37:

Grafica contenido de cemento asfáltico Vs estabilidad / flujo