Estudio de Aplicabilidad del Óxido de Zinc como Modificador del Cemento Asfáltico en una Mezcla Densa en Caliente

Lorena López Benavides

Santiago Ruiz Carreño

Ing. Hugo Alexander Rondón Quintana

Trabajo de Grado Presentando para Optar por el Título de Ingeniero Topográfico

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Proyecto Curricular Ingeniería Topográfica

2024

Nota de Aceptación

_____

_____

Firma del presidente del Jurado

_____

_____

_____

Firma del Jurado

_____

_____

_____

Firma del Jurado

_____

_____

_____

Bogotá, D.C., mayo de 2024

Agradecimientos

Agradecimientos a nuestra familia, por su inquebrantable apoyo, comprensión y amor incondicional durante este arduo proceso. Su aliento constante ha sido nuestra mayor fortaleza.

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento al profesor el Ing. Hugo Alexander Rondón Quintana por su orientación experta, paciencia y dedicación a lo largo de esta investigación. Sus valiosos consejos y comentarios han sido fundamentales para el éxito de este proyecto.

Dedicatoria

A nuestros padres, quienes han sido nuestra mayor inspiración y sostén a lo largo de este viaje académico. Su amor incondicional, sacrificio y constante apoyo han sido la fuerza impulsora detrás de cada logro. Este proyecto está dedicado a ustedes, por su infinita confianza y por ser nuestra fuente de motivación inagotable. Gracias por creer en nuestros sueños y por caminar a nuestro lado en cada paso del camino.

Contenido

Pág.

Introducción 15

Planteamiento del problema y justificación 15

Objetivos 17

Síntesis 18

Marco teórico 20

Cemento asfáltico 20

Concreto asfáltico 21

Diseño de mezclas - Método Marshall 26

Fases Metodológicas 40

Fase I. Establecimiento de los parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del cemento asfáltico modificado con el ZnO 41

Fase II. Selección el porcentaje de cemento asfáltico requerido de acuerdo con los estándares para el diseño de Mezcla Densa en Caliente (MDC) según el Método Marshall 41

Fase III. Estimación de la susceptibilidad al daño causado por la humedad mediante Ensayo de Tensión Indirecta y la pérdida de desgaste por abrasión a través del Ensayo Cántabro 42

Resultados y Análisis 44

Desarrollo de Fases Metodológicas..... 44

Fase I. Establecimiento de los parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del cemento asfáltico modificado con el ZnO..... 44

Fase II. Selección el porcentaje de cemento asfáltico requerido de acuerdo con los estándares para el diseño de Mezcla Densa en Caliente (MDC) según el Método Marshall. 51

Fase III. Estimación de la resistencia bajo carga monotónica mediante Ensayo de Tensión Indirecta y la pérdida de desgaste por abrasión a través del Ensayo Cántabro. 71

Conclusiones 77

Referencias..... 79

Anexos 83

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1 *Instrumentos y Procedimientos Metodológicos* 34

Tabla 2. *Operacionalización de variables* 38

Tabla 3. *Valores de Temperatura, Tiempo y Velocidad de Mezclado de Cemento Asfáltico, modificado con ZnO.* 47

Tabla 4. *Procedimiento de Granulometría-Tamaño (grosor en mm) del agregado pétreo-MDC.* 51

Tabla 5. *Aspectos pre-Implementación Método Marshall* 52

Tabla 6. *Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCC con contenido de CA-4.5%* 53

Tabla 7. *Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCM con contenido de CA-4.5%* 53

Tabla 8. *Cálculos de Volumen de la MDCC con contenido de CA-4.5%* 53

Tabla 9. *Cálculos de Volumen de la MDCM con contenido de CA-4.5%* 54

Tabla 10. *Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCC con contenido de CA-5.0%* 54

Tabla 11. *Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCM con contenido de CA-5.0%* 54

Tabla 12. *Cálculos de Volumen de la MDCC con contenido de CA-5.0%* 55

Tabla 13. *Cálculos de Volumen de la MDCM con contenido de CA-5.0%* 55

Tabla 14. *Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCC con contenido de CA-5.5%* 55

Tabla 15. *Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCM con contenido de CA-5.5%* 56

Tabla 16. *Cálculos de Volumen de la MDCC con contenido de CA-5.5%* 56

Tabla 17. *Cálculos de Volumen de la MDCM con contenido de CA-5.5%* 56

Tabla 18. *Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCC con contenido de CA-6.0%* 57

Tabla 19. *Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCM con contenido de CA-6.0%* 57

Tabla 20. *Cálculos de Volumen de la MDCC con contenido de CA-6.0%*..... 57

Tabla 21. *Cálculos de Volumen de la MDCM con contenido de CA-6.0%* 58

Tabla 22. *Análisis estadístico ANOVA de la MDCC y MDCC con contenido de CA-4.5%*..... 58

Tabla 23. *Análisis estadístico ANOVA de la MDCM y MDCC con contenido de CA-5.0%* 59

Tabla 24. *Análisis estadístico ANOVA de la MDCM y MDCC con contenido de CA-5.5%* 60

Tabla 25. *Análisis estadístico ANOVA de la MDCM y MDCC con contenido de CA-6.0%* 61

Tabla 26. *Valores promedio de variables de resistencia correspondientes a las MDCC y MDCM* 62

Tabla 27. *Valores promedio de variables de volumen correspondientes a las MDCC y MDCM.* 66

Tabla 28. *Cálculos ensayo de Tensión Indirecta de la MDCC y MDCM con un contenido de CA 5.5% en seco.* 72

Tabla 29. *Cálculos ensayo de Tensión Indirecta de la MDCC y MDCM con un contenido de CA 5.5% saturada.* 72

Tabla 30. *Análisis estadístico ANOVA del ensayo Tensión Indirecta de la MDCC y MDCM con un contenido de CA 5.5% en seco.*..... 73

Tabla 31. *Análisis estadístico ANOVA del ensayo Tensión Indirecta de la MDCC y MDCM con un contenido de CA 5.5% en saturado.*..... 73

Tabla 32. *Valor TSR de la MDCC y la MDCM con contenido de CA del 5.5%*..... 74

Tabla 33. *Cálculos ensayo Cántabro de la MDCC y MDCM con un contenido de CA 5.5% saturada.* 75

Tabla 34. *Análisis estadístico ANOVA del ensayo Cántabro de la MDCC y MDCM con un contenido de CA 5.5% en seco.*..... 76

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. *Requisitos mínimos del agregado pétreo para mezclas MDC en Colombia.*..... 23

Figura 2. *Requisitos mínimos del agregado pétreo para mezclas MDC en Colombia.*..... 24

Figura 3. *Criterios para diseño de concreto asfáltico (ensayo Marshall).*..... 28

Figura 4. *Briquetas de mezcla asfáltica antes y después del ensayo cántabro.* 29

Figura 5. *Acondicionamiento de las muestras saturadas.* 30

Figura 6. *Briqueta asfáltica sometida al ensayo de tensión indirecta.*..... 31

Figura 7. *Briqueta abierta luego del ensayo de tensión indirecta.*..... 32

Figura 8. *Temperatura de modificación del Cemento Asfaltico* 44

Figura 9. *Tiempo de mezclado del Cemento Asfáltico.*..... 45

Figura 10. *Velocidad de mezclado del Cemento Asfáltico.*..... 46

Figura 11. *Gráfica variable de Estabilidad (E) de la MDCC vs MDCM.*..... 62

Figura 12. *Gráfica variable de Flujo (F) de la MDCC vs MDCM.*..... 63

Figura 13. *Gráfica variable de Estabilidad/Flujo (E/F) de la MDCC vs MDCM.*..... 65

Figura 14. *Gráfica variable de Altura (h) de la MDCC vs MDCM.*..... 66

Figura 15. *Gráfica variable Densidad Específica (Bulk) de la MDCC vs MDCM.* 67

Figura 16. *Gráfica variable Vacíos con Aire (Va) de la MDCC vs MDCM.*..... 68

Figura 17. *Gráfica variable Vacíos de los minerales (VMA) de la MDCC vs MDCM.* 69

Figura 18. *Gráfica variable Vacíos llenos de asfalto (VFA) de la MDC.* 70

Lista de Anexos

Pág.

Anexo 1. *Ensayo Marshall (INV. E 748-13) Mezcla Densa en Caliente Convencional (MDCC)* 83

Anexo 2. *Ensayo Marshall (INV. E 748-13) Mezcla Densa en Caliente Modificada (MDCM)* .. 84

Anexo 3. *Ensayo Cántabro (Tex-245-F, 2021)* 85

Anexo 4. *Ensayo Tensión Indirecta (INV. E-725-1)* 86

Anexo 5. *Resumen de revisión de literatura.* 87

Siglas

AFM Atomic force microscope por sus siglas en inglés (microscopio de fuerza atómica)

APTS Aminopropiltrietoxisilano

BBR Reómetro de flexión de viga

CA Cemento Asfáltico

DSR Dinamic Shear Rheometer por sus siglas en inglés reómetro de corte dinámico.

EPTMS Epoxipropoxi propiltrimetoxisilano

FTIR Infrarrojos por transformada de Fourier

GCR Grano de Caucho Reciclado

ITS Susceptibilidad a la humedad

MDC Mezcla Densa en Caliente

MDCC Mezcla Densa en Caliente Convencional.

MDCM Mezcla Densa en Caliente Modificada

MSCR Multi Stress Creep Recovery por sus siglas en inglés

MTS Gamma-metacriloxipropiltrimetoxisilano

PAV Envejecimiento Acelerado de Vasija a Presión

PG Performance Grade por sus siglas en inglés (Grado de desempeño)

PG Performance Grade por sus siglas en inglés (Grado de desempeño)

RGO Óxido de Grafeno Reducido

RPM Revoluciones por Minuto

RTFOT Rolling Thin Film Oven Test por sus siglas en inglés (ensayo de envejecimiento de película fina rotativa)

SBR Styrene Butadiene Rubber por sus siglas en inglés (Caucho Estireno Butadieno)

SBS Styrene-Butadiene-Styrene por sus siglas en inglés (Estireno Butadieno Estireno)

SCB Semi Circular Bending por sus siglas en inglés

SGC Compactador Giratorio SUPERPAVE

SMA Stone Mastic Asphalt por sus siglas en inglés (Concreto asfáltico mejorado)

STOA Short Term Oven Aging por sus siglas en inglés

TFOT Thin Film Oven Test por sus siglas en inglés (envejecimiento termo-oxidativo)

TMAP Temperatura Media Anual Promedio

TSR Resistencia a la Tensión Indirecta

UV Ultravioleta

ZnO Óxido de Zinc

ZSV Zero shear viscosity por sus siglas en inglés (Viscosidad de corte cero)

ORGANISMOS

AASHTO American Association of State Highway and Transportation por sus siglas en inglés

ASTM American Society for Testing and Materials por sus siglas en inglés

INVIAS Instituto Nacional de Vías

Resumen

El óxido de Zinc (ZnO) posee propiedades químicas importantes como su alta conductividad térmica, alto punto de fusión y bajo coeficiente de dilatación (Rondón-Quintana et al. 2023, 2024; Duan et al., 2022). El éxito en usos industriales y el estudio realizado por los grupos de investigación TOPOVIAL y Centro de Estudios en Pavimentos y Materiales Sostenibles (ambos pertenecientes a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas), indican la posible efectividad de este material como modificador de ligantes asfálticos. Por lo tanto, el desarrollo de este proyecto busca estudiar la aplicabilidad del ZnO como modificador de las propiedades de un Cemento Asfáltico (CA) en una Mezcla Densa en Caliente (MDC) mediante el desarrollo de tres (3) fases metodológicas: i) inicialmente se establecieron los parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del CA modificado con el ZnO a partir de la revisión de la literatura de referencia; ii) luego fueron seleccionados el porcentaje de CA óptimo de acuerdo con los estándares para el diseño de MDC según el Método Marshall (INVIAS, 2022); iii) en la tercera fase se evaluó la resistencia bajo carga monotónica en ensayos Marshall y Tensión Indirecta, la susceptibilidad al daño por humedad y la pérdida de desgaste por abrasión a través del ensayo Cántabro. Por último, se analizaron los resultados obtenidos y se formularon las conclusiones del proyecto. Con base en los resultados obtenidos, el ZnO se presenta como un material prometedor para modificar y mejorar las propiedades de ligantes y mezclas MDC.

Palabras clave: Oxido de zinc, cemento asfáltico, mezcla densa en caliente, resistencia mecánica, resistencia al daño por humedad y desgaste por abrasión.

Abstract

Zinc oxide (ZnO) has important chemical properties such as high thermal conductivity, high melting point and low coefficient of expansion (Rondón-Quintana et al., 2023, 2024; Duan et al., 2022). The success in industrial uses and the study conducted by the research groups TOPOVIAL and Centro de Estudios en Pavimentos y Materiales Sostenibles (both belonging to the Universidad Distrital Francisco José de Caldas), indicate the possible effectiveness of this material as a modifier of asphalt binders. Therefore, the development of this project seeks to study the applicability of ZnO as a modifier of the properties of an Asphalt Cement (AC) in a Dense Hot Mix (HDM) through the development of three (3) methodological phases: (i) initially, the optimum parameters of temperature, speed and mixing time of the ZnO-modified AC were established based on the review of the reference literature; (ii) then the optimum percentage of AC was selected according to the standards for the design of MDC according to the Marshall Method (INVIAS, 2022); (iii) in the third phase, the resistance under monotonic load in Marshall and Indirect Tension tests, the susceptibility to moisture damage and the loss of wear by abrasion through the Cantabrian test were evaluated. Finally, the results obtained were analyzed and the conclusions of the project were formulated. Based on the results obtained, ZnO is presented as a promising material to modify and improve the properties of binders and MDC mixtures.

Keywords: Zinc oxide, asphalt cement, hot dense mix, mechanical strength, resistance to moisture damage and abrasive wear.

Introducción

Planteamiento del problema y justificación

La modificación del cemento asfáltico (CA) adquiere una importancia estratégica en el contexto colombiano donde la red vial desempeña un papel crucial en la conectividad regional y el desarrollo socioeconómico. La variabilidad geográfica y climática del país, desde zonas montañosas hasta regiones cálidas y húmedas, demanda soluciones de pavimentación altamente adaptables y resistentes.

En Colombia al igual que en otros países se utilizan variedad de materiales para modificar el CA en su mayoría utilizando agentes modificadores de polímeros del tipo elastómero como lo son el grano de caucho reciclado de llanta de neumático (GCR), látex natural, estireno-butadieno- estireno (SBS) y el estireno-butadieno-caucho (SBR), los cuales al ser termo-plásticos pueden ser reciclados y agregados a otros materiales a altas temperaturas sin perder significativamente sus propiedades. Otros recientemente investigados son la incorporación de desechos como modificadores, el almidón y las nanopartículas (Rondón-Quintana et al., 2022, 2023a).

Por otro lado, el grupo de investigación TOPOVIAL realizó un estudio sobre el uso del óxido de zinc (ZnO) como modificador de un CA en el diseño de una mezcla densa en caliente (MDC) tipo MDC-19, mediante una monografía de conclusión de trabajo de Maestría en Infraestructura Vial (Antonio y Parra, 2024). Sin embargo, en el proceso de evaluación de resultados se determinó y concluyó la necesidad de continuar con la investigación a través de la modificación de la primera fase metodológica correspondiente al establecimiento de los parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del CA modificado con el ZnO mediante el uso de los parámetros indicados en la literatura de referencia. Lo anterior,

debido a que el tiempo, velocidad y temperatura de mezcla en este estudio de maestría siguieron criterios medioambientales los cuales no permitieron que reaccionara química o físicamente el ZnO con el CA.

De acuerdo con la identificación del problema para el que se pretende dar solución, se establece como pregunta orientadora de la investigación:

¿Cómo es el comportamiento mecánico de una MDC fabricada con CA modificado con ZnO cuando se usa un tiempo, velocidad y temperatura de mezcla adecuado entre el CA y el modificador?

De esta manera la justificación para este proyecto de investigación radica en la necesidad de profundizar y ampliar el conocimiento de la aplicabilidad del ZnO como modificador de un CA, específicamente el CA 60-70, ya que es el más utilizado en el país. Aunque se han realizado investigaciones preliminares por los grupos de investigación TOPOVIAL y Centro de Estudios en Pavimentos y Materiales Sostenibles, aún existen vacíos en la comprensión de cómo este compuesto afecta de manera precisa y sostenible las propiedades del CA 60-70 y por lo tanto de una MDC.

La importancia de este proyecto se destaca en varios aspectos. En primer lugar, las propiedades únicas del ZnO, su éxito en usos industriales y los resultados preliminares de investigaciones previas sugieren su efectividad en la mejora de las propiedades del asfalto (Rondón-Quintana et al., 2023, 2024). Sin embargo, las investigaciones previas no han proporcionado una comprensión completa de cómo optimizar la mezcla y las condiciones de

modificación para lograr los resultados más efectivos y representativos para el caso colombiano. Este proyecto busca llenar este vacío, siguiendo los parámetros establecidos en la literatura de referencia y llevando a cabo una investigación por medio de fases metodológicas. Además, el contexto colombiano, caracterizado por su diversidad geográfica y climática, destaca la importancia de desarrollar mezclas asfálticas altamente adaptables y duraderas. Si el ZnO puede contribuir a lograr esto, su aplicación puede tener un impacto significativo en la calidad y la durabilidad de las carreteras del país.

Por último, es importante resaltar, que actualmente no existen especificaciones técnicas en Colombia respecto al uso del ZnO como modificador del CA.

Objetivos

General

Evaluar la resistencia mecánica bajo carga monotónica de una mezcla densa en caliente (MDC-19) al modificar el cemento asfaltico (CA 60-70) con Oxido de Zinc (ZnO) considerando la metodología dispuesta en el estado del conocimiento sobre el tema.

Específicos

- Realizar una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica para establecer los parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del ZnO en el cemento asfáltico, de acuerdo con métodos y estándares reconocidos.
- Realizar el diseño de la Mezcla asfáltica por el método Marshall, teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la revisión de la literatura de referencia.
- Realizar ensayos de tensión indirecta para estimar la susceptibilidad al daño por humedad y Cántabro para determinar la pérdida por desgaste por abrasión.

- Evaluar los resultados obtenidos de la mezcla asfáltica modificada con ZnO en comparación con la mezcla de referencia sin modificación, identificando las mejoras y efectos logrados por la incorporación del ZnO.
- Generar un documento técnico con el fin de divulgar los resultados obtenidos, contribuyendo al conocimiento, promoviendo el intercambio de información y experiencias en la comunidad académica.

Síntesis

La utilización de aditivos y modificadores en la elaboración de mezclas asfálticas es un área de investigación que tiene como objetivo principal mejorar las propiedades de los ligantes empleados en ese procedimiento. Así en este contexto, el ZnO emerge como un compuesto con propiedades químicas destacadas, que se usa en aplicaciones industriales y que ha sido estudiado por los grupos de investigación TOPOVIAL y Centro de Estudios en Pavimentos y Materiales Sostenibles, ambos pertenecientes a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

El presente proyecto se enmarca en la continuación del estudio llevado a cabo por estos dos grupos, desarrollándose mediante tres fases metodológicas las cuales buscan estudiar la aplicabilidad del ZnO como modificador del CA en una MDC. En la primera fase se establecieron los parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del CA modificado con el ZnO, a partir de la revisión de la literatura de referencia. Luego en una segunda fase se seleccionaron el porcentaje de CA óptimo de acuerdo con los estándares para el diseño de MDCs según el Método Marshall (INVIAS, 2022). Esta fase se llevó a cabo por medio de la fabricación de briquetas divididas en dos (2) grupos: Mezcla Densa en Caliente Convencional (MDCC) y Mezcla Densa en Caliente Modificada (MDCM) para cada uno de los porcentajes de CA empleados. Después se realizó el cálculo de las variables establecidas en el

Método Marshall. Por último, en esta fase se presentan gráficas y análisis de cada una de las variables de forma comparativa y se seleccionó el contenido de CA que cumplió con los criterios establecidos en la especificación INVIAS (2022).

En una tercera fase se midió la susceptibilidad al daño causado por la humedad mediante el ensayo de Tensión Indirecta y la pérdida de desgaste por abrasión a través del ensayo Cántabro de ambas mezclas (MDCC y MDCM) correspondiente al contenido de porcentaje de CA seleccionado en la fase anterior. Para evaluar si las propiedades medidas en las mezclas MDCC y MDCM diferían significativamente desde el punto de vista estadístico, se realizó un análisis de varianza ANOVA. Por último, se formularon conclusiones que permitieron evaluar la aplicación del ZnO como modificador del CA en el contexto de las mezclas asfálticas colombianas.

El presente manuscrito, inicia con un marco referencial que introduce al lector en las definiciones básicas y fundamentales que se requieren para entender el contenido del estudio. Luego se presenta la metodología utilizada para el logro de los objetivos propuestos. En un capítulo posterior se presentan los resultados obtenidos de la fase experimental con su respectivo análisis, para culminar presentando las conclusiones y recomendaciones. Por último, se muestran las referencias bibliográficas consultadas y citadas durante la redacción de la presente monografía.

Marco teórico

Cemento asfáltico

Según Rondón y Reyes (2022), el CA es un componente principal en los pavimentos flexibles. Se origina a partir de la destilación fraccionada del petróleo crudo y constituye la fase viscosa que adhiere los agregados pétreos en las mezclas asfálticas (Rondón-Quintana et al., 2023; Bastidas y Rondón, 2020).

La categorización del CA se basa en tres propiedades claves: penetración, punto de ablandamiento y viscosidad. La penetración se refiere a la profundidad a la cual un cono normalizado penetra verticalmente en la muestra en condiciones específicas de tiempo y temperatura. El punto de ablandamiento, también conocido como punto de reblandecimiento, es la temperatura a la cual una muestra de CA pasa de estado sólido a líquido y deja de mantener su forma. La viscosidad es una propiedad física fundamental de los materiales viscosos (propiedades dependientes de la temperatura y velocidad de carga). En Colombia, la clasificación del CA se realiza por penetración (INVIAS, 2022) y viscosidad (IDU, 2018).

Por otro lado, "*Las mezclas que se fabrican con CA como ligante son denominadas mezclas en caliente ya que se necesita calentarlo a altas temperaturas (entre 135 y 160 °C por lo general) para poder adherirlo al agregado pétreo. En Colombia se exige la producción industrial de tres tipos de CA: CA 80-100 (mínimo PG 58-22), CA 60-70 (mínimo PG 64-22) y CA 40-50 (mínimo PG 64-22). El CA 80-100 como ligante de mezclas en caliente es utilizado por lo general en zonas con temperaturas medias anuales promedio (TMAP) inferiores a los 24 °C, y los CA 60-70 y CA 40-50 para temperaturas superiores a 24 °C*". (Rondón y Reyes, 2022; Bastidas y Rondón, 2020). Por ejemplo, el CA 80-100 presenta una penetración más alta, indicando una menor rigidez en comparación con los otros tres tipos de ligantes, haciéndolo apto

para ser usado en climas templados para disminuir agrietamientos por fatiga. El CA 40-50 por el contrario tiene una penetración más baja (mayor rigidez) y es adecuado para climas más cálidos con el fin de contrarrestar ahuellamientos. De los tres tipos de CA el más utilizado en Colombia es el CA 60-70, ya que es el que más produce y suministra la Empresa Colombiana de Petróleos – ECOPETROL.

Por otro lado, la incorporación de CA modificado es una tecnología que ha transformado la industria de pavimentos al proporcionar soluciones mejoradas en términos de durabilidad y resistencia. Este tipo de ligante se refiere a la combinación de CA con polímeros, materiales de desecho o de reciclaje u otros aditivos los cuales buscan mejorar alguna propiedad (p.e., rigidez y la resistencia bajo carga monotónica, al ahuellamiento, a la fatiga y al envejecimiento, así como disminuir la susceptibilidad térmica y el daño por humedad para optimizar el rendimiento de las mezclas asfálticas resultantes) (Rondón y Reyes, 2022; Bastidas y Rondón, 2020).

Concreto asfáltico

Las mezclas de concreto asfáltico, también denominadas MDCs son uno de los tipos de mezclas asfálticas más utilizadas en la construcción de pavimentos flexibles. Otro tipo de denominación que han adquirido en Colombia en las últimas especificaciones ha sido MSC (mezcla semidensa en caliente), MGC (mezcla gruesa en caliente) y MAM (mezcla de alto módulo). Estas mezclas se caracterizan por tener una alta proporción de agregados de diferentes tamaños (granulometría bien gradada) y un contenido de CA suficiente para garantizar la cohesión y la durabilidad. "*Deben fabricarse, extenderse y compactarse a alta temperatura (entre 140 y 180 °C dependiendo la viscosidad del asfalto). Son mezclas de alta calidad, las cuales pueden ser utilizadas para conformar cualquier subcapa dentro de la capa asfáltica*

(rodadura, base intermedia y/o base asfáltica)" (Bastidas y Rondón, 2020; Rondón y Reyes, 2022).

De acuerdo con INVIAS (2022), las MDC, MSC, MGC y MAM se pueden clasificar según la granulometría máxima del agregado pétreo. Es decir, la sigla de los diferentes tipos de mezcla se acompaña por un número que identifica el tamaño máximo de partículas en mm (MDC-19 por ejemplo significa que el tamaño máximo de partícula es 19 mm). En las Figuras 1 y 2 se muestran tablas que indican los requisitos mínimos de calidad que deben cumplir los agregados pétreos para conformar mezclas de concreto asfáltico.

El diseño de mezclas de concreto asfáltico, cuando el tamaño máximo de partícula del agregado pétreo es inferior a 1", se realiza por medio del ensayo Marshall (AASHTO T 245, INV. E-748-13) (Bastidas y Rondón, 2020; Rondón y Reyes, 2022).

Figura 1.

Requisitos mínimos del agregado pétreo para mezclas de concreto asfáltico en Colombia.

Ensayo	Método	NT1	NT2	NT3
Agregado grueso				
Resistencia al desgaste en la máquina de Los Ángeles, 500 revoluciones	INV. E-218, 219	Rodadura: 25% máx. Intermedia: 35% máx.	Rodadura: 25% máx. Intermedia: 35% máx. Base: 35% máx.	Rodadura: 25% máx. Intermedia: 35% máx. Base: 35% máx.
Micro Deval	INV. E-238	-	Rodadura: 25% máx. Intermedia: 30% máx. Base: 30% máx.	Rodadura: 20% máx. Intermedia: 25% máx. Base: 25% máx.
10% de finos en seco	INV. E-224	-	-	Rodadura: 110 kN mín. Intermedia: 90 kN mín. Base: 75 kN mín.
10% de finos relación húmedo/seco	INV. E-224	-	-	Rodadura: 75% mín. Intermedia: 75% mín. Base: 75% mín.
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio	INV. E-220	18% máx.	18% máx.	18% máx.
Caras fracturadas: 1 cara	INV. E-227	Rodadura: 75% mín. Intermedia: 60% mín.	Rodadura: 75% mín. Intermedia: 75% mín. Base: 60% mín.	Rodadura: 85% mín. Intermedia: 75% mín. Base: 60% mín.
Caras fracturadas: 2 caras	INV. E-227	-	Rodadura: 60% mín.	Rodadura: 70% mín.
Coeficiente de pulimento	INV. E-232	Rodadura: 0.45 mín.	Rodadura: 0.45 mín.	Rodadura: 0.45 mín.
Partículas planas y alargadas	INV. E-240	10% máx.	10% máx.	10% máx.
Contenido de impurezas	INV. E-237	0.5% máx.	0.5% máx.	0.5% máx.
Agregado medio y fino				
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio	INV. E-220	18% máx.	18% máx.	18% máx.
Angularidad	INV. E-239	Rodadura: 40% mín. Intermedia: 35% mín.	Rodadura: 45% mín. Intermedia: 40% mín. Base: 35% mín.	Rodadura: 45% mín. Intermedia: 40% mín. Base: 35% mín.
Índice de plasticidad	INV. E-125, 126	No plástico	No plástico	No plástico

Nota: Tomado de Rondón y Reyes (2022). Pavimentos materiales y construcción.

Figura 2.

Requisitos mínimos del agregado pétreo fino para mezclas de concreto asfáltico en Colombia.

Ensayo	Método	NT1	NT2	NT3
Agregado medio y fino				
Equivalente de arena	INV. E-133	50% mín.	50% mín.	50% mín.
Azul de metileno*	INV. E-235	10% máx.	10% máx.	10% máx.
Cubrimiento de los agregados gruesos con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo	INV. E-757	Reportar	Reportar	Reportar
Método Riedel Weber para agregados finos	INV. E-774	Índice mínimo = 4	Índice mínimo = 4	Índice mínimo = 4

Nota: Tomado de Rondón y Reyes (2015). Pavimentos materiales y construcción, p.59.

Óxido de zinc - ZnO

Según Verdeja et al. (1992), el ZnO es un polvo blanco, sedoso que se obtiene por oxidación de vapor de zinc metálico a elevadas temperaturas por medio de dos procesos de obtención: el proceso directo o americano y el proceso indirecto o francés. En el primero se utiliza como materia prima menas oxidadas o concentrados de sulfuros metálicos previamente tostadas, mientras en el proceso indirecto se utiliza zinc metálico.

El ZnO tiene variedad de propiedades térmicas, ópticas, semiconductoras, reacciones en estado sólido, fosforescentes, electroluminiscentes, termoluminiscentes, ferritas, catalítica, fotoconductoras y fotoquímicas, entre otras. Además de tener diversas aplicaciones en la industria como por ejemplo, adhesivos, agricultura, aislamiento eléctrico, asfalto, agente blanqueadores, catalizadores, caucho, cemento asbesto, cementos dentales, cemento portland, cerámica, cromato de zinc, equipo eléctrico, pinturas, plásticos, rayón, recubrimiento de suelos, resinas, resistencia al fuego, revestimientos de frenos, revestimiento de latas de conserva, textiles, tratamientos de aguas residuales, zinc como agente químico, lubricantes, entre otros (Verdeja et al., 1992).

De acuerdo con el objeto de la investigación es importante destacar sus propiedades térmicas debido a "*La elevada conductividad térmica, alto punto de fusión y bajo coeficiente de dilatación, fueron propiedades que permitieron su uso para ciertas aplicaciones industriales. Recientemente, aquellas propiedades relacionadas con la presión de vapor y la temperatura de disociación han llegado a ser más importantes. Tales propiedades facilitaron su utilización en el campo de los semiconductores*" (Verdeja et al., 1992, p. 88).

Las reacciones en estado sólido que "*Debido a la elevada reactividad de los polvos de óxido de zinc, puede pensarse su utilización tanto para reacciones en medio fluido como en estado sólido. Los criterios de ZnO conforme se aumenta su temperatura reaccionan unos con tros para formar partículas de tamaño mayor. Con otros óxidos, forma soluciones sólidas muchas de las cuales tienen importantes aplicaciones*". **(**Verdeja et al., 1992, p. 88).

El ZnO muestra propiedades como agente abrasivo. Especialmente como reactivo aglomerante en láminas y ruedas abrasivas vitrificadas, se incorpora óxido de zinc para formar un silicato complejo, que produce un cemento duro y resistente al agua **(**Verdeja et al., 1992, p. 91).

Muestra características adhesivas, ya que "*El óxido de zinc se emplea en gran variedad de adhesivos para mejorar la resistencia al agua y al envejecimiento. Las cintas quirúrgicas e industriales, de caucho natural o sin-tético, pueden llevar hasta 30% de óxido de zinc, puesto que se ha demostrado. que es el medio más eficaz de conservar sus propiedades adhesivas durante el almacenamiento*" **(**Verdeja et al., 1992, p. 91).

Adicionalmente, el ZnO retarda el fraguado inicial del cemento, sin disminuir los valores de resistencia a la tensión. Esta propiedad se utiliza en ciertos trabajos realizados en los pozos de la industria petrolífera **(**Verdeja et al., 1992, p. 92).

Diseño de mezclas - Método Marshall

El Método Marshall corresponde a las norma y especificación INV E 748-13 del INVIAS. Esta norma describe el procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de briquetas de mezclas asfálticas para pavimentación. Las briquetas, de forma cilíndrica y de 4” de diámetro, son sometidos a carga en dirección perpendicular a su eje cilíndrico empleando el aparato Marshall (INVIAS, 2022) [1]. Empleando este ensayo se realiza el diseño de mezclas de concreto asfáltico en Colombia.

En este ensayo, se analiza la composición volumétrica y la resistencia de la mezcla asfáltica bajo carga monotónica mediante la relación entre la estabilidad (*E*) y el flujo (*F*). El propósito es identificar el porcentaje óptimo de asfalto necesario para lograr teóricamente el mejor rendimiento de la mezcla. La estabilidad (*E*) se define como la carga monotónica máxima que puede soportar una briqueta de 1200 g con dimensiones de 4” de diámetro y 2.5” de altura a altas temperaturas de servicio (60 °C) en el aparato Marshall. Por otro lado, el flujo (*F*) representa el desplazamiento experimentado en el momento de la falla, que ocurre cuando se alcanza el valor de *E* durante el ensayo (Rondón y Reyes, 2022).

En el procedimiento Marshall, se elaboran al menos tres briquetas (compactados a 25, 50 o 75 golpes por cara, dependiendo del nivel de tráfico previsto para la vía), utilizando la granulometría especificada para cada porcentaje de asfalto: 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0%. Esto se realiza con el objetivo de llevar a cabo el diseño de la mezcla. La elección de la temperatura de mezcla y compactación de los bloques se basa en el ensayo de viscosidad realizado en los cementos asfálticos, cumpliendo con el rango establecido para mezclas densas (viscosidad de

[1] Especificación 748 -1, Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el método Marshall.

mezcla de 170 cp y de compactación de 280 cp, según la especificación ASTM D6925). El calentamiento de los agregados pétreos debe ser suficiente para asegurar que no haya presencia de humedad y que no se comprometa la adherencia con el cemento asfáltico, evitando así la oxidación prematura de este último (Rondón y Reyes, 2022).

Para calcular la composición volumétrica de la mezcla, es necesario determinar:

- *h (cm): Altura de la briqueta*
- *CA (%): Porcentaje de cemento asfáltico*
- *Naire(g): Paso briqueta en aire seca (g)*
- *M.aire(g): Paso briqueta en aire seca (g)*
- *M.sum (g): Peso briqueta en agua (g)*
- *PSS (g): Peso briqueta en aire SSS (g)*
- *Gravedad específica Bulk (g/cm3) = M. aire(g) / (PSS (g) -M.sum (g))*
- *Vag (%) = Bulk *(100 – CA) /100/ Gs. Convencional o modificado * 100*
- *Gmm = 100/((100-CA) / Gs. Convencional o modificado) +(CA/Vag))*
- *Va (%) Vacíos con aire = (Gmm-Bulk) /(Gmm*100)*
- *Vb (%) = 100 – Va – Vag*
- *VMA (%) Vacíos en los agregados = 100 – Vag*
- *VFA (%) Vacios llenos de asfalto = Vb / VMA * 100*

A continuación, en la Figura 3 se presentan tablas con los criterios de diseño establecidos por INVIAS (2022) para mezclas de concreto asfáltico según el nivel de tránsito (NT1: bajos; NT2: medios; NT3: altos volúmenes de tránsito).

Figura 3.

Criterios para diseño de concreto asfáltico (ensayo Marshall).

Características		Norma de ensayo INV.	MDC, MSC, MGC			MAM
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748	50	75	75	75
Estabilidad mínima [N]		E-748	5000	7500	9000	15000
Flujo [mm]*		E-748	2-4	2-4	2-3.5	2-3
Estabilidad/Flujo [kN/mm]		E-748	2-4	3-5	3-6	-
Vacíos con aire (Va) [%]	Rodadura	E-736, 799	3-5	3-5	4-6	-
	Intermedia		4-8	4-8	4-7	4-6
	Base		-	5-8	5-8	4-6
Vacíos en los agregados (VAM) [%]	Mezclas 38 mm	E-799	≥ 13	≥ 13	≥ 13	-
	Mezclas 25 mm		≥ 14	≥ 14	≥ 14	≥ 14
	Mezclas 19 mm		≥ 15	≥ 15	≥ 15	-
	Mezclas 10 mm		≥ 16	≥ 16	≥ 16	-
Vacíos llenos de asfalto (VFA) [%] para rodadura e intermedia		E-799	65-80	65-78	65-75	63-75

Características	Norma de ensayo INV.	MDC, MSC, MGC			MAM
		NT1	NT2	NT3	
Relación llenante/asfalto efectivo en peso	E-799	0.8-1.2			1.2-1.4
Concentración de llenante, valor máximo	E-745	Valor crítico			
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo μm	E-741	7.5	7.5	7.5	7.5

Nota: Tomado de Rondón y Reyes (2022). Pavimentos materiales y construcción.

Ensayo Cantabro

el Ensayo Cántabro se realiza siguiendo los procedimientos estandarizados por INV E 760 para mezclas drenantes y Tex-245-F para mezclas densas.

Esta normativa detalla el procedimiento requerido para calcular la pérdida por desgaste en mezclas asfálticas utilizando la máquina de Los Ángeles. Siguiendo INV E 760, este método es aplicable a mezclas asfálticas fabricadas en caliente con granulometría abierta, cuyo tamaño máximo de partícula no excede los 25 mm (INVIAS, 2022)[2].

[2] Especificación 760 – 1, Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por el medio de ensayo cántabro de pérdida por desgaste.

En el ensayo, se crea una probeta tipo Marshall utilizando la mezcla a analizar, compactándola con 50 golpes por cara (Figura 4), y luego se introduce en la máquina de Los Ángeles (sin carga abrasiva) a una temperatura específica (generalmente a la temperatura de laboratorio 20°C). Tras un número predeterminado de vueltas, se retira la probeta, que ha experimentado desgaste en parte de los agregados de su superficie, y se procede a pesarla. (INVIAS, 2022)[3].

El resultado del ensayo proporciona el valor de la pérdida por desgaste, expresado como un porcentaje de la masa inicial como se muestra a continuación:

- *CA (%): Porcentaje de cemento asfáltico*
- *Masa inicial de la briqueta (g)*
- *Masa final de la briqueta (g)*
- *Desgaste Cántabro = (Masa inicial – Masa final) /Masa inicial * 100*

Figura 4.

Briquetas de mezcla asfáltica antes y después del ensayo cántabro.



Nota: Tomado de Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2022). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INV E 760 – 4

[3] Ídem.

Para el caso de la especificación Tex-245-F, se siguen el mismo lineamiento establecidos anteriormente, pero la briqueta corresponde a una muestra de concreto asfáltico del tipo Marshall convencional de 1200 g (AASHTO T 245).

Tensión Indirecta

El ensayo Tensión Indirecta se realiza siguiendo los lineamientos de la especificación INV E 725 el cual establece un procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico, con el fin de medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tensión indirecta. El método es aplicable a las mezclas densas y permite evaluar el efecto de la humedad sobre mezclas elaboradas con o sin aditivos mejoradores de adherencia (INVIAS, 2022)[4].

La susceptibilidad al daño causado por la humedad se evalúa mediante la preparación de un conjunto de muestras compactadas en el laboratorio convencionales o modificadas con aditivos. Estas muestras se compactan de forma que el contenido de aire en los vacíos varíe entre el 6% y el 8%. El conjunto se divide en dos subgrupos con un contenido de aire similar, asegurándose de que cada muestra tenga su equivalente en el otro subgrupo. Uno de los subgrupos se mantiene en condiciones secas, mientras que el otro se satura parcialmente con agua y se coloca en un baño de agua a 60°C durante un día para su acondicionamiento (Figura 5).

Figura 5.

Acondicionamiento de las muestras saturadas.

[4] Especificación 725 – 1, Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfaltico utilizando la prueba de tracción indirecta.

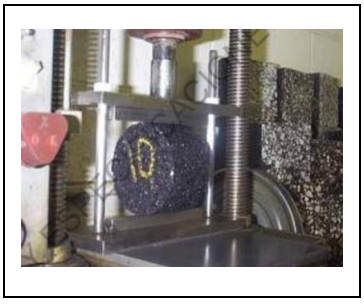


Nota: Tomado de Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2022). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INV E 725 – 1.

La resistencia a la tensión de cada subgrupo se determina mediante la prueba de tracción indirecta. La susceptibilidad al daño por humedad se determina comparando las resistencias a la tensión del subgrupo húmedo con las del subgrupo seco. Se coloca un espécimen en el aparato de carga, con las franjas de carga centradas y paralelas sobre el plano diametral vertical. Se aplica una carga diametral a una rata de deformación 50 mm/min de carga hasta que alcance la carga máxima y se registra dicha carga (Figura 6). La temperatura de la muestra durante la aplicación de la carga es de 25°C.

Figura 6.

Briqueta asfáltica sometida al ensayo de tensión indirecta.



Nota: Tomado de Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2022). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INV E 725 – 1.

Se continúa cargando hasta fracturar el espécimen. Una vez desmontado del aparato de ensayo, se abre el espécimen y se estima visualmente el daño que le causó la humedad (Figura 7).

Figura 7.

Briqueta abierta luego del ensayo de tensión indirecta.



Nota: Tomado de Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2022). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INV E 725 – 1.

Metodología

Tipo de Investigación

Para el desarrollo del tema propuesto se recurre a un estudio con referencia a la aplicabilidad del ZnO como modificador del cemento asfáltico en una MDC, mediante ensayos referidos y seleccionados, a partir de la revisión de literatura que derivó el estado del arte actual.

Enfoque de Investigación

El desarrollo investigativo tiene un enfoque cuantitativo que sigue un proceso secuencial y probatorio que conlleva a un análisis de tipo correlacional para examinar la relación entre las diferentes variables tales como:

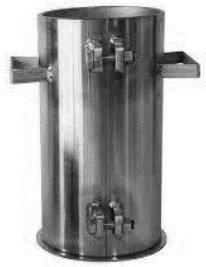
- Parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del ZnO en el cemento asfáltico.
- Porcentaje de cemento asfáltico requerido de acuerdo con los estándares para el diseño de Mezcla Densa en Caliente (MDC) según el Método Marshall.
- Susceptibilidad al daño causado por la humedad mediante ensayo de Tensión Indirecta.
- Pérdida de desgaste por abrasión a través del ensayo Cántabro.

Instrumentos y Procedimientos

En el desarrollo de las actividades para dar respuesta a los objetivos específicos segundo y tercero, se utilizaron los instrumentos, equipos o equivalentes relacionados en la Tabla 1.

Tabla 1

Instrumentos y Procedimientos Metodológicos

Instrumento	Procedimiento
Método Marshall	
	El dispositivo para moldear briquetas es un molde cilíndrico con una base plana y es utilizado para fabricar muestras cilíndricas de Mezcla Densa en Caliente para su posterior evaluación en el laboratorio.
	El extractor de briquetas tiene como función separar las muestras de la Mezcla Asfáltica de los moldes para la fabricación de briquetas de la Mezcla Densa en Caliente.
	Los martillos de compactación Marshall manual o mecánico tienen como función compactar dinámicamente Mezcla Densa en Caliente.
	La prensa de Estabilidad Marshall permite medir la resistencia al flujo y la estabilidad de acuerdo con el Método Marshall.

Nota: información e imágenes tomadas de la Norma y Especificaciones INVÍAS INV E – 748-13 Método Marshall.

Continuación Tabla 1.

	El pedestal de compactación es utilizado como una superficie de soporte para la muestra asfáltica durante el proceso de compactación de la Mezcla Densa en Caliente.
	Los elementos de calefacción secan y refuerzan los enlaces químicos de la Mezcla Densa en Caliente.
	La mezcladora está diseñada para mezclar las muestras de la Mezcla Densa en Caliente para pruebas de Marshall, Tensión Indirecta y Cántabro, entre otras pruebas.
	La mordaza es una herramienta mediante la cual se somete el esfuerzo de flexión a una briqueta de Mezcla Densa en Caliente con forma cilíndrica.

Nota: información e imágenes tomadas de la Norma y Especificaciones INVÍAS INV E – 748-13 Método Marshall.

Continuación Tabla 1.

	El baño de María es un equipo usado para acondicionar las mezclas a temperaturas determinadas en el agua y realizar pruebas como Marshall, Bitumen, entre otras
	El equipo misceláneo consta de instrumentos como bandejas metálicas, recipientes con tapas herramientas para mezclar, termómetros blindados, balanza, tamices, guantes y crayolas entre otros necesarios para llevar a cabo las pruebas realizadas a la Mezcla Asfáltica.
Instrumento	**Procedimiento**
Ensayo de Tensión Indirecta	
	Bomba de vacío o aspiradora de agua

Nota: información e imágenes tomadas de la Norma y Especificaciones INVÍAS INV E – 748-13 Método Marshall.

Continuación Tabla 1.

	Manómetro o indicador de vacío
Instrumento	**Procedimiento**
Ensayo de Cántabro	
	Máquina de los Ángeles
	Cámara de temperatura controlada

Nota: información e imágenes tomadas de la Norma y Especificaciones INVÍAS INV E – 760-1 Ensayo Cántabro.

Población

Se considera y designa población universal a la MDC a intervenir mediante los método y ensayos seleccionados de la revisión de literatura y que posibilitan el alcance del objetivo general en la temática propuesta.

Muestra

Se desprende una vez intervenida la población universal, dos (2) muestras poblacionales que se intervienen simultáneamente: una Mezcla Densa en Caliente Convencional (MDCC) y una Mezcla Densa en Caliente Modificada (MDCM).

Materiales

Los agregados pétreos y el CA 60-70 fueron suministrados por la planta de asfalto CONCRESCOL S.A. Ambos materiales cumplían con los requisitos de calidad exigidos por las especificaciones INVIAS (2022) e IDU (2018). El ZnO pasaba el tamiz No. 200 en un ensayo de granulometría por tamizado. Las propiedades del agregado, el CA y el ZnO se describen en Rondón-Quintana et al. (2024).

Variables de Estudio

Se presentan tres (3) variables cuya operacionalización se apoya en la Tabla 2.

Tabla 2.

Operacionalización de variables

Variable	Tipo	Definición Conceptual
CA (Independiente)	Cuantitativa	Contenido de Cemento Asfaltico expresado en porcentaje.
Contenido de ZnO (Independiente)	Cuantitativa	Contenido de Óxido de Zinc expresado en porcentaje.
T (Independiente)	Cuantitativa	Temperatura expresada en grados centígrados
V (Independiente)	Cuantitativo	Velocidad de mezclado expresada en revoluciones por minuto

Nota: elaboración propia

Continuación Tabla 2.

Variable	Tipo	Definición Conceptual
T (Independiente)	Cuantitativo	Tiempo de mezclado expresado en minutos
E (Independiente)	Cuantitativo	Estabilidad de la Mezcla Densa en Caliente (MDC) expresada en kilo Newton
h (Independiente)	Cuantitativo	Altura de la briqueta expresada en centímetros
F (Independiente)	Cuantitativo	Flujo de la Mezcla Densa en Caliente (MDC) expresada en milímetros
E/F (Dependiente)	Cuantitativo	Relación Estabilidad/Flujo de la Mezcla Densa en Caliente (MDC) expresada en milímetros
M. Aire (Independiente)	Cuantitativo	Peso briqueta en aire expresada en gramos
M. sum (Independiente)	Cuantitativo	Peso briqueta en agua expresada en gramos
PSS (Independiente)	Cuantitativo	Peso de la briqueta en aire
Bulk (Dependiente)	Cuantitativo	Gravedad especifica expresada en gramos sobre centímetros cúbicos
Va (Dependiente)	Cuantitativo	Vacíos con aire expresados en porcentaje
VMA (Dependiente)	Cuantitativo	Vacíos en los agregados expresados en porcentaje

Nota: elaboración propia

Continuación Tabla 2.

Variable	Tipo	Definición Conceptual
VMA (Dependiente)	Cuantitativo	Vacíos en los agregados expresados en porcentaje
VFA (Dependiente)	Cuantitativo	Vacíos llenos de asfalto expresados en porcentaje
Masa inicial (Independiente)	Cuantitativo	Masa inicial de la briqueta expresada en gramos.
Masa final (Independiente)	Cuantitativo	Masa final de la briqueta expresada en gramos.
Carga Máx. (Independiente)	Cuantitativo	Carga máxima soportada por la MDC expresada en kilo Newton
Resistencia (Dependiente)	Cuantitativo	Resistencia de la MDC expresada en kilo Pascales
TSR (Dependiente)	Cuantitativo	Resistencia a la tensión indirecta de la MDC expresada en porcentaje
MDCC (Intervinientes)	Cualitativo	Mezcla Densa en Caliente Convencional
MDCM (Intervinientes)	Cualitativo	Mezcla Densa en Caliente Modificada

Nota: elaboración propia

Fases Metodológicas

Para el desarrollo de los objetivos específicos que conduzcan al alcance del objetivo general, responder a la pregunta orientadora de la investigación, se ha desglosado por cada uno de ellos, una fase metodológica con sus respectivas actividades descritas a continuación:

Fase I. Establecimiento de los parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del cemento asfáltico modificado con el ZnO

La fase desglosó tres (3) actividades como sigue:

a) Establecimiento de Temperatura de mezclado del cemento asfáltico modificado con ZnO.

b) Establecimiento de Tiempo de mezclado del cemento asfáltico modificado con ZnO.

c) Establecimiento de Velocidad de mezclado del cemento asfáltico modificado con ZnO.

Lo anterior se fundamentó en una revisión bibliográfica realizada para dar cumplimiento al primer objetivo específico de este proyecto. Se obtuvo información que soportó el procedimiento para determinar el valor óptimo de las variables de temperatura (°C), tiempo (min) y (°), velocidad (rpm) del CA modificado con el ZnO, derivando una matriz que desglosó en su estructura criterios como Titulo, Objetivo, Metodología, Resultados, Autor, Año de publicación, Referencia, Enlace de consulta online, entre otros. Los resultados se evidencian en el Anexo 5. Así mismo, para la revisión de literatura se determinó como periodo de consulta de producción documental, el lapso comprendido entre los años 2015 a 2023 para levantar el estado del arte actual sobre la temática propuesta.

En esta fase también se modificó el CA 60-70 con el ZnO, teniendo en cuenta la información reportada en la consulta bibliográfica.

Fase II. Selección el porcentaje de cemento asfáltico requerido de acuerdo con los estándares para el diseño de Mezcla Densa en Caliente (MDC) según el Método Marshall

La fase desglosó dos (2) actividades como sigue:

a) **Procedimiento de Granulometría.** Procedimiento cuyo objetivo fue determinar el grosor (mm), el porcentaje que pasa y el que es retiene en el tamizaje del agregado pétreo. Las briquetas se fabricaron siguiendo la granulometría que establece la franja central de la gradación establecida por INVIAS (2022) para MDC-19. Este tipo de mezcla fue escogida debido a que es la más utilizada en Colombia para conformar capas de rodadura en pavimentos flexibles.

b) **Aplicación de Método Marshall.** Siguiendo los lineamientos del método se obtuvo el porcentaje de CA requerido de acuerdo con los estándares para el diseño de una MDC-19. Fueron fabricadas tres briquetas Marshall por cada contenido de asfalto (4.5, 5.0, 5.5 y 6.0%) y falladas en el aparato Marshall. Este ensayo se realizó sobre las muestras MDCC y MDCM. Con los resultados, se obtuvo el contenido óptimo de CA sin modificar y CA modificado con ZnO.

Fase III. Estimación de la susceptibilidad al daño causado por la humedad mediante Ensayo de Tensión Indirecta y la pérdida de desgaste por abrasión a través del Ensayo Cántabro

La fase desglosó dos (2) actividades como sigue:

a) **Aplicación del Ensayo de Tensión Indirecta.** Aplicado para estimar la susceptibilidad al daño causado por humedad de la Mezcla Densa en Caliente Convencional (MDCC) y Mezcla Densa en Caliente Modificada (MDCM). Tres briquetas Marshall por tipo de mezcla fueron fabricadas

(empleando el contenido de CA obtenido de la fase anterior) y ensayadas en condición seca, y otras tres para condición sumergida en agua o condicionada.

b) Aplicación del Ensayo Cántabro. Aplicado para estimar la pérdida de desgaste por abrasión de las muestras MDCC y MDCM. Tres briquetas Marshall fueron fabricadas y ensayadas por tipo de mezcla.

Sobre los resultados obtenidos de los ensayos, y para evaluar si las propiedades medidas en las mezclas MDCC y MDCM diferían significativamente desde el punto de vista estadístico, se realizó un análisis de varianza ANOVA.

Resultados y Análisis

Desarrollo de Fases Metodológicas

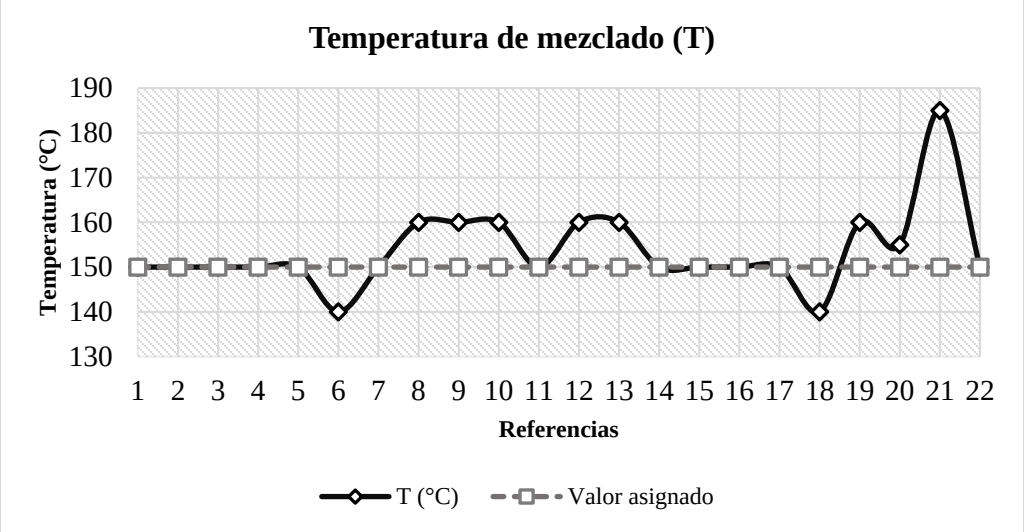
Fase I. Establecimiento de los parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del cemento asfáltico modificado con el ZnO

Desarrolladas las actividades, los resultados se presentan a continuación.

a) Establecimiento de Temperatura de mezclado del cemento asfáltico modificado con ZnO. La Figura 8, muestra los valores de *T=°C,* utilizados con base a la referencia obtenida de la revisión de literatura.

Figura 8.

Temperatura de modificación del Cemento Asfaltico



Nota: elaboración propia-basada en revisión de literatura

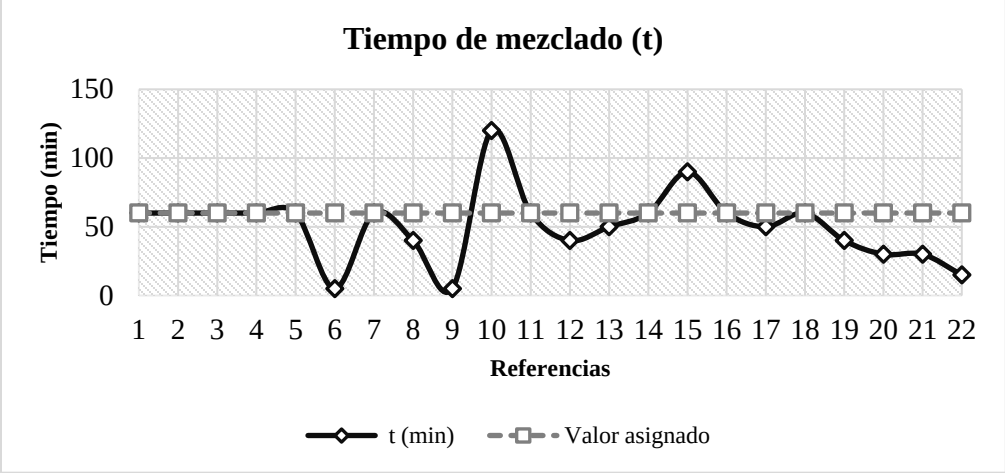
En la Figura 8, se destaca que, el valor más frecuentemente empleado de T=°C en la modificación del CA con ZnO, fue de 150°C ± 5 y según los resultados obtenidos, bajo esta variable, se evidenciaron aumentos significativos en la resistencia al envejecimiento, ahuellamiento, fatiga, humedad, entre otros aspectos.

b) Establecimiento de Tiempo de mezclado del cemento asfáltico modificado con ZnO.

La Figura 9, muestra los valores de *t=min.*, utilizados con base a la referencia obtenida de la revisión de literatura.

Figura 9.

Tiempo de mezclado del Cemento Asfáltico.



Nota: elaboración propia-basada en revisión de literatura

En la Figura 9, se destaca que, el valor más frecuentemente empleado de tiempo de mezcla en la modificación del CA con ZnO, oscila entre 0 y 90 minutos, siendo la media 45 minutos. A pesar de lo anterior, se evidenció mejor reproducibilidad de los ensayos cuando se mezclaban ambos materiales durante 60 minutos. Por lo anterior, el tiempo escogido fue de 60

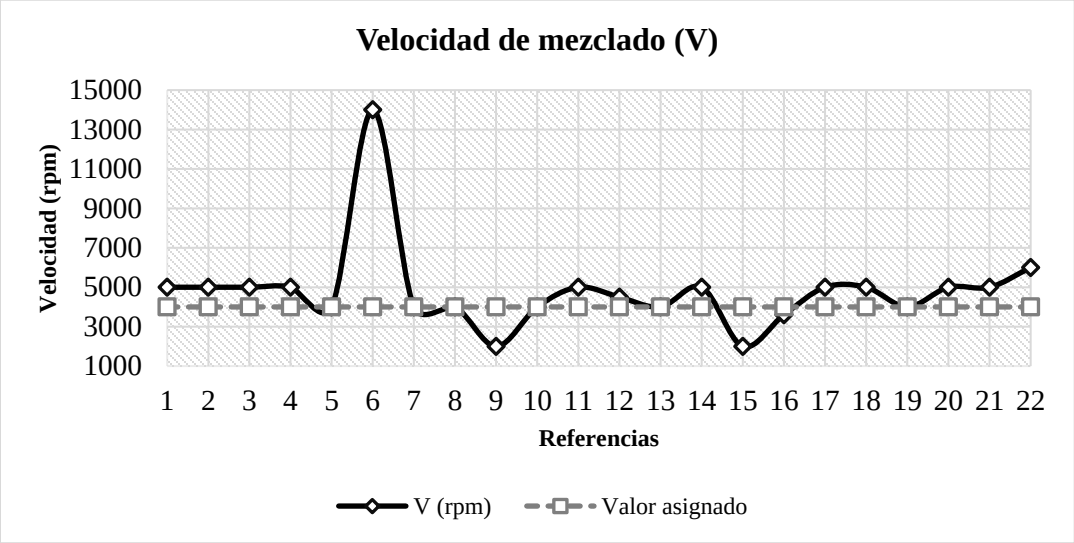
minutos, ya que así, se evidenciaron aumentos significativos en la resistencia al envejecimiento, ahuellamiento, fatiga, humedad, entre otros aspectos.

c) Establecimiento de Velocidad de mezclado del cemento asfáltico modificado con ZnO.

La Figura 10, muestra los valores de *V= rpm* utilizados con base a la referencia obtenida de la revisión de literatura.

Figura 10.

Velocidad de mezclado del Cemento Asfáltico.



Nota: elaboración propia-basada en revisión de literatura

En la Figura 10, se destaca que, el valor más frecuentemente empleado de velocidad de mezcla en la modificación del CA con ZnO, oscila entre 4000 y 5000 rpm, siendo la media 4500 rpm. La velocidad escogida fue de 4000 rpm, ya que así, se evidenciaron aumentos significativos en la resistencia al envejecimiento, ahuellamiento, fatiga, humedad, entre otros aspectos.

Finalmente se elaboró la Tabla 3 con base a la literatura de referencia, la cual reúne los parámetros utilizados en cada una de las pruebas experimentales realizadas por los autores consultados en la revisión de literatura y el análisis de todo el contenido posibilitó determinar los valores de Temperatura, Tiempo y Velocidad de Mezclado del CA con el ZnO para llevar a cabo el diseño de la MDC según los lineamientos del Método Marshall.

Tabla 3.

Valores de Temperatura, Tiempo y Velocidad de Mezclado de Cemento Asfáltico, modificado con ZnO.

Ref.	Asfalto	Contenido ZnO (% Peso)	Temperatura (°C)	Velocidad de Mezclado (rpm)	Herramienta Mezclado	Tiempo (min)	Contenido Óptimo	Incrementó resistencia a:
1	CA 73 mm y CA 92 mm	2	150 ± 5	5000	Mezclador alto corte	60	No registra	Envejecimiento
				2000	Agitador de paleta	90		
2	CA 73 mm	3	150 ± 5	5000	Mezclador alto corte	60	No registra	Envejecimiento
				2000	Agitador de paleta	90		
3	CA 73 mm	2	150 ± 5	5000	Mezclador alto corte	60	No registra	Envejecimiento
				2000	Agitador de paleta	90		
4	CA 75 mm	3	150 ± 5	5000	Mezclador alto corte	60	No registra	Envejecimiento
				2000	Agitador de paleta	90		
5	CA 63 mm	1, 2, 3, 4 ZnO	150 ± 5	4000	Mezclador alto corte	60	1% OEVMT	Envejecimiento
		1 OEVMT		2000	Agitador de paleta	90	3% ZnO	

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al. (2023). The Use of Zinc Oxide in Asphalts: Review, p. 5.

Continuación Tabla 3.

Ref.	Asfalto	Contenido ZnO (% Peso)	Temperatura (°C)	Velocidad de Mezclado (rpm)	Herramienta Mezclado	Tiempo (min)	Contenido Óptimo	Incrementó resistencia a:
6	CA 69 mm	2	130 - 140	14000	No registra	4 a 5	No registra	Humedad
		4						Adherencia
7	AC 71, 86 y 105dmm	1 ZnO	150 ± 5	4000	Mezclador alto corte	60	No registra	Ahuellamiento
		3 OEVMT		2000	Agitador de paleta	90		Agrietamiento por bajas temperaturas
								Envejecimiento
8	CA 64,3 mm	2, 3, 4 ZnO	160	1500	No registra	20	Menor diámetro de partícula - Mejores resultados	Ahuellamiento
		3, 4 SBS	170	4000		40		Fatiga
								Agrietamiento por bajas temperaturas
								Humedad
								Envejecimiento
9	CA 38 mm	0.3, 0.8, 1.8 TiO2	160	2000	No registra	5	No registra	Envejecimiento
		0.2 ZnO						
10	CA 62,2 mm	1, 3 y 5	160	4000	No registra	120	5%	Ahuellamiento
								Humedad
								Envejecimiento
11	CA 69 mm	1, 2, 3, 4 y 5 Tamaño 30 nm	150 ± 5	5000	Mezclador alto corte	60	3%	Ahuellamiento
				2000	Agitador de paleta	90		Fatiga
								Envejecimiento

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts: Review, p. 5.

Continuación Tabla 3.

Ref.	Asfalto	Contenido ZnO (% Peso)	Temperatura (°C)	Velocidad de Mezclado (rpm)	Herramienta Mezclado	Tiempo (min)	Contenido Óptimo	Incrementó resistencia a:
12	CA 68 mm	1, 2 y 3 Tamaño 20 - 30 mm	160 ± 5	2000	No registra	20	3%	Ahuellamiento
			170 ± 5	4500		40		Fatiga
								Agrietamiento por bajas temperaturas
13	CA 64 mm	0.2, 0.4 y 0.6 Tamaño 20 - 60 mm	160 ± 5	4000	No registra	50	0,6%	Ahuellamiento
								Humedad
								Adherencia
14	CA 65 mm	0.5, 1, 2, 3 y 4	150 ± 5	5000	No registra	60	3%	Ahuellamiento
								Envejecimiento
15	CA 71 mm	3, 5 Y 7	150 ± 5	2000	No registra	90	7%	Ahuellamiento
								Fatiga
								Envejecimiento
16	CA 66,5 mm	2, 3, 4, 5 y 6 Vermiculito (EV)	150	3600	Mezclador alto corte	60	5%	Ahuellamiento
								Fatiga
				2000		90		Agrietamiento por bajas temperaturas
								Humedad
17	CA 85 mm	2,4,6 y 8 TiO2/ZnO	150	5000	Mezclador alto corte	50	4%	Ahuellamiento
								Fatiga
								Agrietamiento por medias temperaturas
								Envejecimiento

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts: Review, p. 5.

Continuación Tabla 3.

Ref.	Asfalto	Contenido ZnO (% Peso)	Temperatura (°C)	Velocidad de Mezclado (rpm)	Herramienta Mezclado	Tiempo (min)	Contenido Óptimo	Incrementó resistencia a:
18	CA 68 mm	2,4,6 y 8 Uso queroseno como disolvente	140-150	2000-5000	No registra	60-70	6%	Ahuellamiento
								Adherencia
19	CA 64,3 mm	2,3 y 4 Aglomerado, esfera, varilla y flor	160	2000	No registra	20	No registra	Ahuellamiento
			180	4000		40		Humedad
								Envejecimiento
20	Diferente contenido de cera	4	155	5000	Mezclador alto corte	30	No registra	Ahuellamiento
								Fatiga
								Envejecimiento
21	AC 70 mm con alto contenido de SBS	2	185	5000	No registra	30	No registra	Ahuellamiento
								Fatiga
22	AC 60 mm	3,6,9,12 y 15	150 ± 5	6000	Mezclador alto corte	15	No registra	Ahuellamiento
								Envejecimiento

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts: Review, p. 5.

Fase II. Selección el porcentaje de cemento asfáltico requerido de acuerdo con los estándares para el diseño de Mezcla Densa en Caliente (MDC) según el Método Marshall.

Desarrolladas las actividades, los resultados se presentan a continuación.

a) Procedimiento de Granulometría. Procedimiento mediante el cual se corrobora el tamaño (grosor en mm) de las partículas del agregado pétreo en porcentaje que a través de los tamices pasan o se retiene (Tabla 4).

Tabla 4.

Procedimiento de Granulometría-Tamaño (grosor en mm) del agregado pétreo-MDC.

MEZCLA TIPO MDC-19							
TAMIZ	**Tamiz [mm]**	**% PASA**	**% RETENIDO**	**4,5% CA=54 g**	**5.0% CA=60 g**	**5.5% CA=66 g**	**6.0% CA=72 g**
3/4"	19,00	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	12,50	87,5	12,5	143,3	142,5	141,8	141,0
3/8"	9,50	79,0	8,5	97,4	96,9	96,4	95,9
4	4,75	57,0	22,0	252,1	250,8	249,5	248,2
10	2,00	37,0	20,0	229,2	228,0	226,8	225,6
40	0,43	19,5	17,5	200,6	199,5	198,5	197,4
80	0,18	12,5	7,0	80,2	79,8	79,4	79,0
200	0,075	6,0	6,5	74,5	74,1	73,7	73,3
FONDO		0,0	6,0	68,8	68,4	68,0	67,7
			100,0	**1146**	**1140**	**1134**	**1128**

Nota: elaboración propia, resultado de la aplicación de ensayo de clasificación de suelos

b). Implementación de Método Marshall. Siguiendo los lineamientos del método se obtuvo el porcentaje de CA requerido para el diseño de la MDCC y la MDCM, teniendo en cuenta los siguientes aspectos consignados en la Tabla 5.

Tabla 5.

Aspectos pre-Implementación Método Marshall

Aspectos pre-Implementación Método Marshall	
Relación estabilidad vs., flujo de mezclas	**Propiedades volumétricas de las mezclas**
✓ Estabilidad (E) ✓ Flujo (F) ✓ Estabilidad/Flujo (E/F)	✓ Altura (h) ✓ Densidad específica (Bulk) ✓ Vacíos de aire (Va) ✓ Vacíos de aire en los minerales (VMA) ✓ Llenos de asfalto (VFA)

Nota: elaboración propia basados en implementación de Método Marshall

- Procedimiento-Pasos de implementación Método Marshall

✓ Paso 1. Fueron fabricadas 24 briquetas (12 por tipo de mezcla; MDCC y MDCM) que correspondían a la evaluación de cuatro (4) contenidos de asfalto (4.5%, 5%, 5.5% y 6%) (tres briquetas por cada contenido de asfalto), compactados a 75 golpes por cara, con dimensiones de 4” de diámetro y 2.5” de altura, siguiendo los lineamientos establecidos por la especificación INV. E-748.

✓ Paso 2. Las briquetas fabricadas se dividieron en dos (2) grupos:

- 12 briquetas fabricadas con CA 60-70 para la MDCC.
- 12 briquetas fabricadas con CA 60-70 modificado con ZnO para la MDCM.

✓ Paso 3. Cálculos de las variables correspondientes a los criterios del Método Marshall para cada una de las mezclas: MDCC y MDCM para los cuatro (4) contenidos de cemento asfáltico seleccionados en el estudio (Tablas 6 a 21).

- Cálculos de variables con contenido de CA-4.5% para MDCC (Tablas 6 y 8) y para MDCM (Tablas 7 y 9).

Tabla 6.

Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCC con contenido de CA-4.5%

	E (kN)	h (cm)	Factor Corr.	E (kN) - Corr.	F (1/1000")	F (mm)	E/F (kN/mm)
	13,27	6,50	0,963	12,78	150	3,81	3,35
	12,86	6,51	0,960	12,35	155	3,94	3,14
	13,00	6,49	0,965	12,55	145	3,68	3,41
Promedio	**13,04**	**6,50**	**0,963**	**12,56**	**150,00**	**3,81**	**3,30**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 7.

Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCM con contenido de CA-4.5%

	E (kN)	h (cm)	Factor Corr.	E (kN) - Corr.	F (1/1000")	F (mm)	E/F (kN/mm)
	15,55	6,40	0,988	15,36	150	3,81	4,03
	15,38	6,41	0,985	15,15	145	3,68	4,11
	15,67	6,43	0,980	15,36	145	3,68	4,17
Promedio	**15,53**	**6,41**	**0,984**	**15,29**	**146,67**	**3,73**	**4,11**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 8.

Cálculos de Volumen de la MDCC con contenido de CA-4.5%

	h (cm)	CA (%)	M. aire (g)	M. sum. (g)	PSS (g)	Bulk (g/cm3)	Vag (%)	Gmm	Va (%)	Vb (%)	VMA (%)	VFA (%)
	6,50	4,5	1191,4	675,3	1192,8	2,302	82,65	2,48	7,23	10,12	17,35	58,31
	6,51	4,5	1190,6	676,7	1191,6	2,312	83,01	2,48	6,83	10,16	16,99	59,82
	6,49	4,5	1190,7	677,0	1192,0	2,312	83,00	2,48	6,84	10,16	17,00	59,78
Promedio	**6,50**	**4,5**	**1190,9**	**676,3**	**1192,1**	**2,309**	**82,89**	**2,48**	**6,96**	**10,15**	**17,11**	**59,30**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 9.

Cálculos de Volumen de la MDCM con contenido de CA-4.5%

	h (cm)	CA (%)	M. aire (g)	M. sum. (g)	PSS (g)	Bulk (g/cm3)	Vag (%)	Gmm	Va (%)	Vb (%)	VMA (%)	VFA (%)
	6,40	4,5	1191,3	679,0	1192,9	2,318	83,22	2,49	6,83	9,94	16,78	59,27
	6,41	4,5	1188,7	680,8	1190,7	2,331	83,69	2,49	6,31	10,00	16,31	61,32
	6,43	4,5	1189,6	679,7	1192,4	2,320	83,30	2,49	6,75	9,95	16,70	59,60
Promedio	**6,41**	**4,5**	**1189,9**	**679,8**	**1192,0**	**2,323**	**83,40**	**2,49**	**6,63**	**9,97**	**16,60**	**60,06**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

- Cálculos de variables con contenido de CA-5.0% para MDCC (Tablas 10 y 12) y para MDCM (Tablas 11 y 13).

Tabla 10.

Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCC con contenido de CA-5.0%

	E (kN)	h (cm)	Factor Corr.	E (kN) - Corr.	F (1/1000")	F (mm)	E/F (kN/mm)
	14,78	6,47	0,970	14,34	145	3,68	3,89
	15,22	6,47	0,970	14,76	145	3,68	4,01
	14,67	6,50	0,963	14,13	150	3,81	3,71
Promedio	**14,89**	**6,48**	**0,968**	**14,41**	**146,67**	**3,73**	**3,87**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 11.

Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCM con contenido de CA-5.0%

	E (kN)	h (cm)	Factor Corr.	E (kN) - Corr.	F (1/1000")	F (mm)	E/F (kN/mm)
	17,93	6,40	0,988	17,71	135	3,43	5,17
	18,12	6,40	0,988	17,90	135	3,43	5,22
	17,74	6,42	0,983	17,44	140	3,56	4,90
Promedio	17,93	**6,41**	**0,986**	**17,69**	**136,67**	**3,47**	**5,10**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 12.

Cálculos de Volumen de la MDCC con contenido de CA-5.0%

	h (cm)	CA (%)	M. aire (g)	M. sum. (g)	PSS (g)	Bulk (g/cm3)	Vag (%)	Gmm	Va (%)	Vb (%)	VMA (%)	VFA (%)
	6,47	5,0	1195,2	680,5	1196,3	2,317	82,75	2,46	5,93	11,31	17,25	65,60
	6,47	5,0	1190,6	679,3	1192,1	2,322	82,92	2,46	5,75	11,34	17,08	66,36
	6,50	5,0	1192,6	680,9	1194,2	2,323	82,97	2,46	5,68	11,34	17,03	66,63
Promedio	**6,48**	**5,0**	**1192,8**	**680,2**	**1194,2**	**2,321**	**82,88**	**2,46**	**5,79**	**11,33**	**17,12**	**66,20**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 13.

Cálculos de Volumen de la MDCM con contenido de CA-5.0%

	h (cm)	CA (%)	M. aire (g)	M. sum. (g)	PSS (g)	Bulk (g/cm3)	Vag (%)	Gmm	Va (%)	Vb (%)	VMA (%)	VFA (%)
	6,40	5,0	1197,8	686,2	1199,0	2,336	83,42	2,47	5,45	11,13	16,58	67,14
	6,40	5,0	1194,8	683,7	1196,3	2,331	83,24	2,47	5,65	11,11	16,76	66,29
	6,42	5,0	1195,5	682,8	1197,2	2,324	83,00	2,47	5,92	11,08	17,00	65,15
Promedio	**6,41**	**5,0**	**1196,0**	**684,2**	**1197,5**	**2,330**	**83,22**	**2,47**	**5,67**	**11,11**	**16,78**	**66,20**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

- Cálculos de variables con contenido de CA-5.5% para MDCC (Tablas 14 y 16) y para MDCM (Tablas 15 y 17).

Tabla 14.

Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCC con contenido de CA-5.5%

	E (kN)	h (cm)	Factor Corr.	E (kN) - Corr.	F (1/1000")	F (mm)	E/F (kN/mm)
	15,67	6,50	0,963	15,09	140	3,56	4,24
	16,11	6,47	0,97	15,63	135	3,43	4,56
	15,89	6,41	0,985	15,65	140	3,56	4,40
Promedio	**15,89**	**6,46**	**0,973**	**15,46**	**138,33**	**3,51**	**4,40**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 15.

Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCM con contenido de CA-5.5%

	E (kN)	h (cm)	Factor Corr.	E (kN) - Corr.	F (1/1000")	F (mm)	E/F (kN/mm)
	17,68	6,39	0,990	17,50	135	3,43	5,10
	17,93	6,40	0,988	17,71	135	3,43	5,17
	18,30	6,38	0,993	18,17	130	3,30	5,50
Promedio	**17,97**	**6,39**	**0,990**	**17,80**	**133,33**	**3,39**	**5,26**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 16.

Cálculos de Volumen de la MDCC con contenido de CA-5.5%

	h (cm)	CA (%)	M. aire (g)	M. sum. (g)	PSS (g)	Bulk (g/cm3)	Vag (%)	Gmm	Va (%)	Vb (%)	VMA (%)	VFA (%)
	6,50	5,5	1197,0	685,7	1197,9	2,337	83,02	2,45	4,43	12,55	16,98	73,92
	6,47	5,5	1195,1	685,5	1195,8	2,342	83,20	2,45	4,22	12,58	16,80	74,86
	6,41	5,5	1193,8	686,8	1194,2	2,353	83,58	2,45	3,78	12,64	16,42	76,97
Promedio	**6,46**	**5,5**	**1195,3**	**686,0**	**1196,0**	**2,344**	**83,27**	**2,45**	**4,14**	**12,59**	**16,73**	**75,25**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 17.

Cálculos de Volumen de la MDCM con contenido de CA-5.5%

	h (cm)	CA (%)	M. aire (g)	M. sum. (g)	PSS (g)	Bulk (g/cm3)	Vag (%)	Gmm	Va (%)	Vb (%)	VMA (%)	VFA (%)
	6,39	5,5	1193,5	686,8	1193,8	2,354	83,63	2,45	4,03	12,34	16,37	75,38
	6,40	5,5	1193,5	685,1	1194,1	2,345	83,30	2,45	4,41	12,29	16,70	73,61
	6,38	5,5	1191,5	685,0	1192,2	2,349	83,45	2,45	4,23	12,32	16,55	74,44
Promedio	**6,39**	**5,5**	**1192,8**	**685,6**	**1193,4**	**2,349**	**83,46**	**2,45**	**4,22**	**12,32**	**16,54**	**74,47**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

- Cálculos de variables con contenido de CA-6.0% para MDCC (Tablas 18 y 20) y para MDCM (Tablas 19 y 21).

Tabla 18.

Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCC con contenido de CA-6.0%

	E (kN)	h (cm)	Factor Corr.	E (kN) - Corr.	F (1/1000")	F (mm)	E/F (kN/mm)
	13,90	6,40	0,988	13,73	160	4,06	3,38
	14,44	6,38	0,993	14,34	155	3,94	3,64
	14,32	6,37	0,995	14,25	165	4,19	3,40
Promedio	**14,22**	**6,38**	**0,992**	**14,11**	**160,00**	**4,06**	**3,47**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 19.

Cálculos de Estabilidad / Flujo de la MDCM con contenido de CA-6.0%

	E (kN)	h (cm)	Factor Corr.	E (kN) - Corr.	F (1/1000")	F (mm)	E/F (kN/mm)
	16,77	6,37	0,995	16,69	155	3,94	4,24
	17,05	6,35	1,000	17,05	160	4,06	4,20
	17,46	6,35	1,000	17,46	160	4,06	4,30
Promedio	**17,09**	**6,36**	**0,998**	**17,07**	**158,33**	**4,02**	**4,24**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 20.

Cálculos de Volumen de la MDCC con contenido de CA-6.0%

	h (cm)	CA (%)	M. aire (g)	M. sum. (g)	PSS (g)	Bulk (g/cm3)	Vag (%)	Gmm	Va (%)	Vb (%)	VMA (%)	VFA (%)
	6,40	6,0	1196,8	686,6	1198,0	2,340	82,70	2,43	3,59	13,71	17,30	79,24
	6,38	6,0	1197,6	688,0	1198,2	2,347	82,95	2,43	3,30	13,75	17,05	80,65
	6,37	6,0	1194,4	687,8	1195,2	2,354	83,18	2,43	3,03	13,79	16,82	82,01
Promedio	**6,38**	**6,0**	**1196,3**	**687,5**	**1197,1**	**2,347**	**82,94**	**2,43**	**3,31**	**13,75**	**17,06**	**80,63**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

Tabla 21.

Cálculos de Volumen de la MDCM con contenido de CA-6.0%

	h (cm)	CA (%)	M. aire (g)	M. sum. (g)	PSS (g)	Bulk (g/cm3)	Vag (%)	Gmm	Va (%)	Vb (%)	VMA (%)	VFA (%)
	6,37	6,0	1199,1	688,2	1200,0	2,343	82,79	2,436	3,81	13,40	17,21	77,87
	6,35	6,0	1196,6	690,4	1197,3	2,361	83,42	2,436	3,08	13,50	16,58	81,42
	6,35	6,0	1196,2	687,8	1197,0	2,349	83,01	2,436	3,55	13,44	16,99	79,09
Promedio	**6,36**	**6,0**	**1197,3**	**688,8**	**1198,1**	**2,351**	**83,07**	**2,44**	**3,48**	**13,45**	**16,93**	**79,46**

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

- ✓ **Paso 4.** Se realiza un análisis estadístico del resultado de las diferentes variables establecidas (Tabla 2), para cada uno de los cuatro (4) contenidos de cemento asfáltico, tanto en la MDCC y MDCM, a través de la herramienta ANOVA (Tablas 22 a 25) para evidenciar el nivel de significancia del cambio bajo las premisas, así:
  - ➢ *Si F > F critico entonces el cambio Es significativo estadísticamente.*
  - ➢ *Si F < F critico entonces el cambio No es significativo estadísticamente.*

- ➢ **Análisis estadístico ANOVA de variables con contenido de CA-4.5% para MDCC y MDCM (Ver tabla 22).**

Tabla 22.

Análisis estadístico ANOVA de la MDCC y MDCC con contenido de CA-4.5%

Variable	*F*	*F critico*	Significativo
E(kN)	362,234	7,708	Si
F(mm)	0,999	7,708	No
E/F (kN/mm)	76,998	7,708	Si
Va (%)	2,536	7,708	No
VMA (%)	7,522	7,708	No
VFA (%)	0,892	7,708	No

Nota: elaboración propia según análisis estadístico ANOVA.

Según el análisis de la Tabla 22, con contenido de CA de 4.5% se aprecian diferencias estadísticamente significativas en la resistencia bajo carga monotónica (E) y la deformación (E/F) entre la MDCM y la MDCC. Sin embargo, no se observaron cambios significativos en los valores de Flujo (F), vacíos con aire (Va), vacíos de los agregados (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

- **Análisis estadístico ANOVA de variables con contenido de CA-5.0% para MDCC y MDCM (Ver tabla 23).**

Tabla 23.

Análisis estadístico ANOVA de la MDCM y MDCC con contenido de CA-5.0%

Variable	*F*	*F critico*	Significativo
E(kN)	201,712	7,708	Si
F(mm)	17,99	7,708	Si
E/F (kN/mm)	87,420	7,708	Si
Va (%)	0,518	7,708	No
VMA (%)	5,956	7,708	No
VFA (%)	3,698	7,708	No

Nota: elaboración propia según análisis estadístico ANOVA.

Según el análisis de la Tabla 23, con contenido de CA de 5.0% se aprecian diferencias estadísticamente significativas en la resistencia bajo carga monotónica (E), el Flujo (F) y la deformación (E/F) entre la MDCM y la MDCC. Sin embargo, no se observaron cambios significativos en los valores de vacíos con aire (Va), vacíos de los agregados (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

- **Análisis estadístico ANOVA de variables con contenido de CA-5.5% para MDCC y MDCM (Ver tabla 24).**

Tabla 24.

Análisis estadístico ANOVA de la MDCM y MDCC con contenido de CA-5.5%

Variable	*F*	*F critico*	Significativo
E(kN)	75,583	7,708	Si
F(mm)	4,50	7,708	No
E/F (kN/mm)	31,189	7,708	Si
Va (%)	0,127	7,708	No
VMA (%)	1,021	7,708	No
VFA (%)	0,561	7,708	No

Nota: elaboración propia según análisis estadístico ANOVA

Según el análisis de la Tabla 24, con contenido de 5.5% se aprecian diferencias estadísticamente significativas en la resistencia bajo carga monotónica (E) y la deformación (E/F) entre la MDCM y la MDCC. Sin embargo, no se observaron cambios significativos en los valores de Flujo (F), vacíos con aire (Va), vacíos de los agregados (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

- **Análisis estadístico ANOVA de variables con contenido de CA-6.0% para MDCC y MDCM (Ver tabla 25).**

Tabla 25.

Análisis estadístico ANOVA de la MDCM y MDCC con contenido de CA-6.0%

Variable	*F*	*F critico*	Significativo
E(kN)	102,317	7,708	Si
F(mm)	0,249	7,708	No
E/F (kN/mm)	74,232	7,708	Si
Va (%)	0,423	7,708	No
VMA (%)	0,326	7,708	No
VFA (%)	0,800	7,708	No

Nota: elaboración propia según análisis estadístico ANOVA

Según el análisis de la Tabla 25, con contenido de CA de 6.0% se aprecian diferencias estadísticamente significativas en la resistencia bajo carga monotónica (E) y la deformación (E/F) entre la MDCM y la MDCC. Sin embargo, no se observaron cambios significativos en los valores de Flujo (F), vacíos con aire (Va), vacíos de los agregados (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

✓ **Paso 5.** Presentación gráfica del análisis y cumplimiento de los criterios establecidos en el método Marshall (ver figura 3) para las MDCC y MDCM en cada uno de los porcentajes que fueron evaluados en este proyecto (4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%).

A partir del método Marshall es posible analizar la resistencia de la mezcla por medio de las variables de Estabilidad (E) que representa a la resistencia de la mezcla bajo carga monotónica, el Flujo (F) que indica el desplazamiento o deformación y la relación Estabilidad Flujo (E/F) que refleja la deformación que presenta la mezcla cuando es sometida a altas temperaturas. Para facilitar este análisis, se construyó la Tabla 26, que proporciona los valores promedio resumidos de estas variables.

Tabla 26.

Valores promedio de variables de resistencia correspondientes a las MDCC y MDCM

CA (%)	E (kN)	F (mm)	E/F (kN/mm)
MDCC			
4,5	12,56	3,81	3,30
5,0	14,41	3,73	3,87
5,5	15,46	3,51	4,40
6,0	14,11	4,06	3,47
MDCM			
4,5	15,29	3,73	4,11
5,0	17,69	3,47	5,10
5,5	17,80	3,39	5,26
6,0	17,07	4,02	4,24

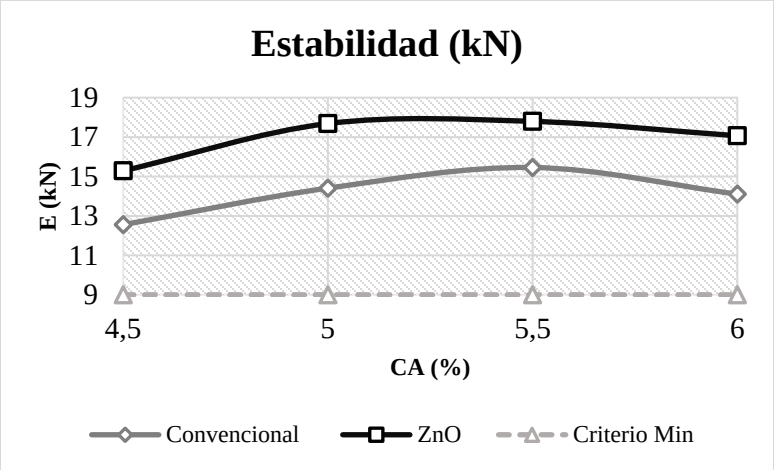
Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

a) Análisis de la resistencia bajo carga monotónica (E) de las MDCM en comparación con las MDCC

La Figura 11, muestra los valores de *E* de las MDCC y MDCM, así como el criterio mínimo para esta variable de acuerdo con el INVIAS (2022).

Figura 11.

Gráfica variable de Estabilidad (E) de la MDCC (Convencional) vs MDCM (ZnO).



Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall.

De acuerdo con la gráfica de estabilidad (E) se puede inferir que:

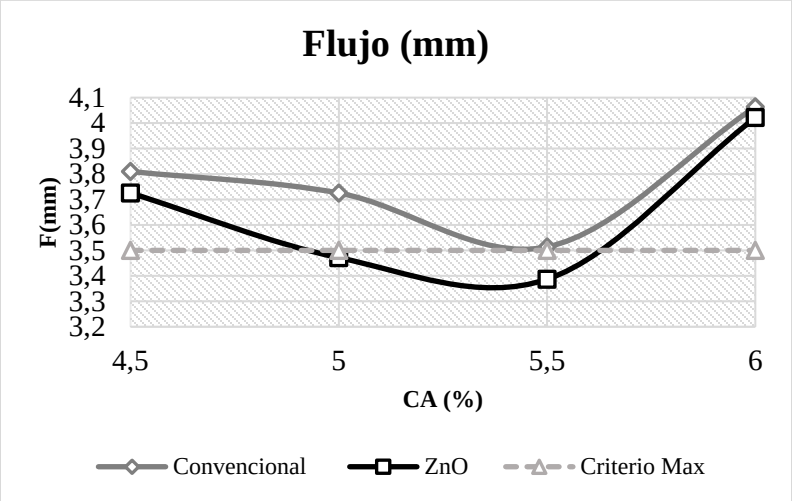
- Se establece que el criterio mínimo de la resistencia bajo carga monotónica (E) para una capa intermedia de nivel de tránsito 3 es de 9 kN, es notable que todas las muestras tanto las MDCC como las MDCM cumplen con estos criterios, ya que los valores registrados superan este umbral.
- En cuanto a la diferencia entre las muestras de las MDCC y las MDCM, se evidencia que la MDCM presentan mayor resistencia bajo carga monotónica (E) con cada uno los porcentajes de CA utilizados en el ensayo Marshall.
- Se observa que los picos más altos de resistencia bajo carga monotónica (E) tanto en la MDCM como en la MDCC se alcanzan con porcentajes de asfalto del 5.0% y 5.5%.

b) Análisis de deformación (*F*) de las MDCM en comparación con las MDCC.

La Figura 12, muestra los valores de *F* de las MDCC y MDCM, así como el criterio máximo para esta variable de acuerdo con el INVIAS (2022).

Figura 12.

Gráfica variable de Flujo (F) de la MDCC (Convencional) vs MDCM (ZnO).



Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

De acuerdo con la gráfica de Flujo (F) se puede inferir que:

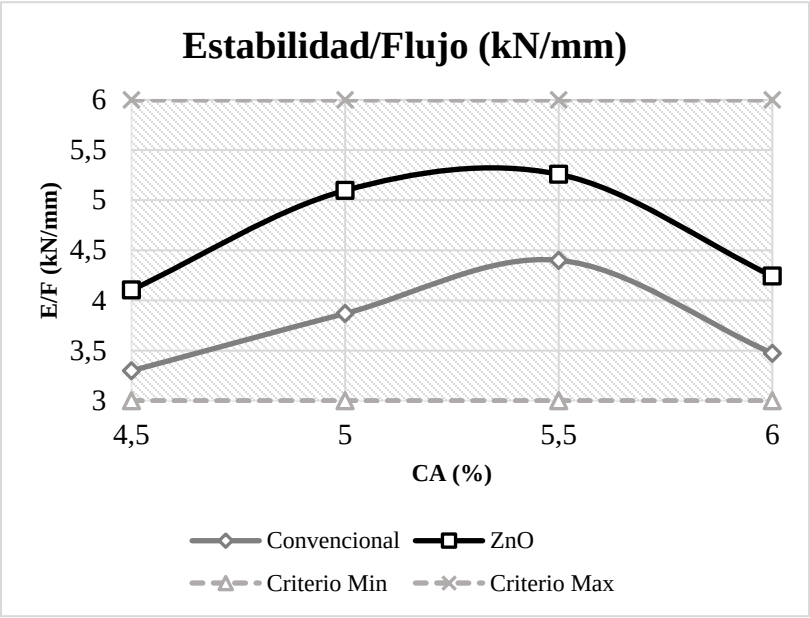
- Se establece que el criterio de deformación para una capa intermedia de nivel de tránsito NT3 es de 2 mm a 3.5 mm. Es notable que las MDCC presentan una deformación mayor que supera el umbral permitido, a excepción de la muestra con porcentaje de asfalto del 5.5% que es la más cercana a este valor.
- En cuanto a la diferencia entre las MDCC y las MDCM, se evidencian que las MDCM presentan una menor deformación (*F*) con cada uno los porcentajes de CA utilizados en el ensayo Marshall.
- En concordancia con el resultado del análisis estadístico ANOVA realizado en el paso 4 de esta fase también se evidencia en la gráfica que la deformación (*F*) tuvo un cambio significativo con respecto a las MDCC con el porcentaje de asfalto de 5.0%.
- La MDCM muestra menor deformación (*F*) con los porcentajes de 5.0% y 5.5% de CA además de ser los únicos que no presentan una deformación mayor a 3,5 mm y presentan los picos más bajos del registro.

c) Análisis de deformación cuándo falla (E/F) de las MDCM en comparación con las MDCC

La Figura 13, muestra los valores de *E/F* de las MDCC y MDCM, así como el criterio mínimo y máximo para esta variable de acuerdo con el INVIAS (2022).

Figura 13.

Gráfica variable de Estabilidad/Flujo (E/F) de la MDCC (Convencional) vs MDCM (ZnO).



Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

De acuerdo con la gráfica de Estabilidad /Flujo (E/F) se puede inferir que:

- Se establece que el criterio máximo de deformación cuando falla (E/F) para una capa intermedia de nivel de tránsito NT3 es de 3 kN/mm a 6 kN/mm. Es notable que todas las muestras tanto las MDCC como las MDCM cumplen con estos criterios, ya que la relación E/F registrada se encuentra dentro de este umbral.
- En cuanto a la diferencia entre las MDCC y las MDCM, se evidencian que las MDCM presentan una menor relación (E/F) con cada uno los porcentajes de CA utilizados en el ensayo Marshall.
- Se observa que los picos más altos y estables de relación E/F tanto en la MDCM como en la MDCC se alcanzan con porcentajes de asfalto del 5.0% y 5.5%.

A partir del método Marshall es posible analizar las propiedades volumétricas de la mezcla por medio de las variables de altura (h), gravedad específica (Bulk), vacíos de aire (Va), vacíos en los agregados minerales (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA). Para facilitar este análisis, se ha construyó la Tabla 27, que proporciona los valores promedio de estas variables.

Tabla 27.

Valores promedio de variables de volumen correspondientes a las MDCC y MDCM.

CA (%)	h (cm)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	Bulk (g/cm3)
MDCC					
4,5	6,50	6,96	17,11	59,30	2,309
5,0	6,48	5,79	17,12	66,20	2,321
5,5	6,46	4,14	16,73	75,25	2,344
6,0	6,38	3,31	17,06	80,63	2,347
MDCM					
4,5	6,41	6,63	16,60	60,06	2,323
5,0	6,41	5,67	16,78	66,20	2,330
5,5	6,39	4,22	16,54	74,47	2,349
6,0	6,36	3,48	16,93	79,46	2,351

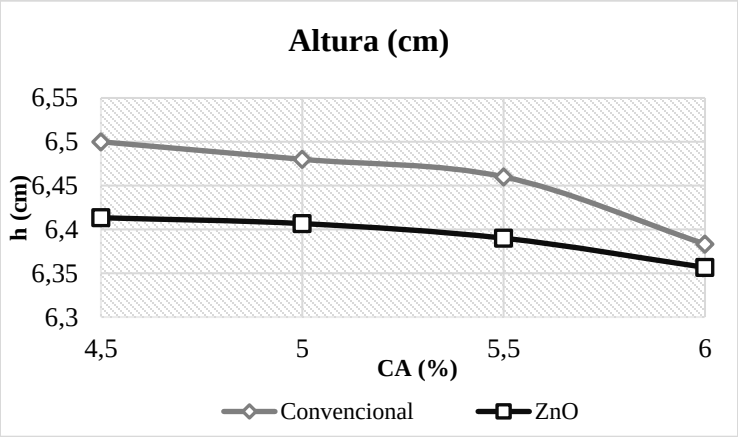
Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

a) Análisis de altura (h) de las MDCM en comparación con las MDCC.

La Figura 14, muestra los valores de *h* de las MDCC y MDCM.

Figura 14.

Gráfica variable de Altura (h) de la MDCC (Convencional) vs MDCM (ZnO).



Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall.

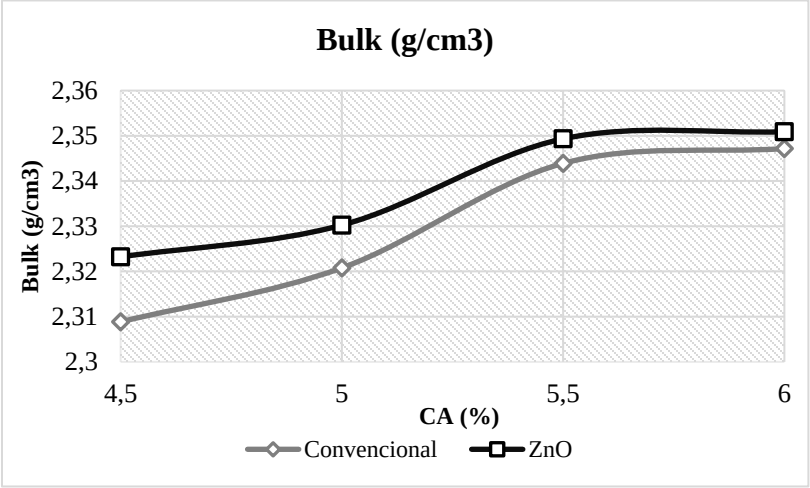
- En cuanto a la diferencia entre las MDCC y las MDCM, se evidencian que las MDCM presentan una menor altura (h) con cada uno los porcentajes de CA utilizados en el ensayo Marshall.
- Se observa que los picos más altos y estables de altura (h) tanto en la MDCM como en la MDCC se alcanzan con porcentajes de asfalto del 4.5% 5.0% y 5.5%.

b) Análisis de gravedad específica (Bulk) de las MDCM en comparación con las MDCC.

La figura 15, muestra los valores de *Bulk* de las MDCC y MDCM.

Figura 15.

Gráfica variable Densidad Específica (Bulk) de la MDCC (Convencional) vs MDCM (ZnO).



Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall.

➢ En cuanto a la diferencia entre las MDCC y las MDCM, se evidencian que las MDCM presentan un valor menor de densidad específica (Bulk) con cada uno los porcentajes de CA utilizados en el ensayo Marshall.

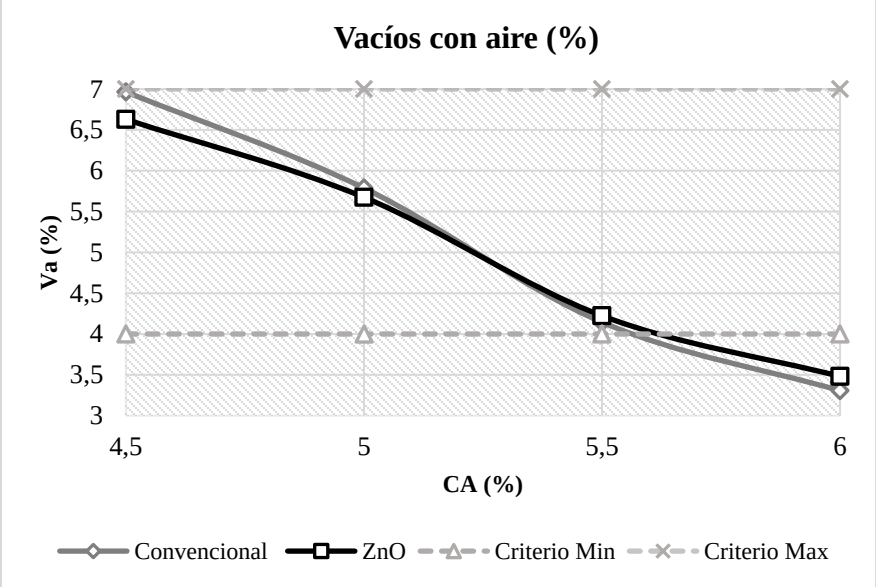
➢ Se observa que los picos más altos y estables de densidad específica (Bulk) tanto en la MDCM como en la MDCC se alcanzan con porcentajes de asfalto del 5.0% y 5.5%.

c) Análisis de los vacíos con aire (Va) de las MDCM en comparación con las MDCC.

La Figura 16, muestra los valores de *Va* de las MDCC y MDCM, así como el criterio mínimo y máximo para esta variable de acuerdo con el INVIAS (2022).

Figura 16.

Gráfica variable Vacíos con Aire (Va) de la MDCC (Convencional) vs MDCM (ZnO).



Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall.

➢ Se establece que el criterio de Va para una capa intermedia de nivel de tránsito NT3 es de 4% a 7%. Es notable que las muestras, tanto las MDCC como las MDCM que cumplen, son las que poseen contenidos de CA del 4.5%, 5.0% y 5.5%.

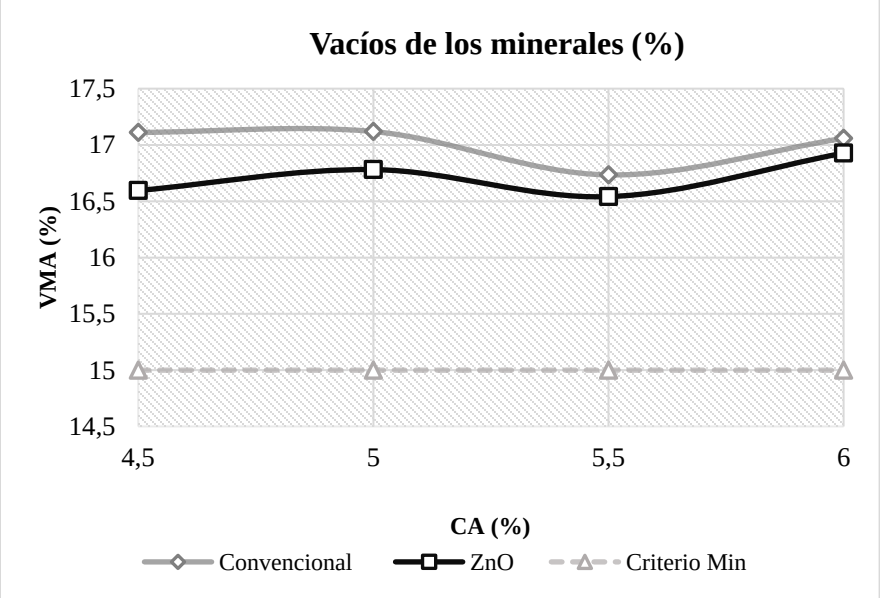
- En concordancia con el resultado del análisis estadístico ANOVA realizado en el paso 4 de esta fase también se evidencia en la gráfica que los Va no tuvieron un cambio significativo con respecto a las MDCC.
- Se observa que los Va disminuyen en cuanto el porcentaje de CA aumenta.

d) Análisis de los vacíos de los minerales (VMA) de las MDCM en comparación con las MDCC.

La Figura 17, muestra los valores de *VMA* de las MDCC y MDCM, así como el criterio mínimo para esta variable de acuerdo con el INVIAS (2022).

Figura 17.

Gráfica variable Vacíos de los minerales (VMA) de la MDCC (Convencional) vs MDCM (ZnO).



Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall.

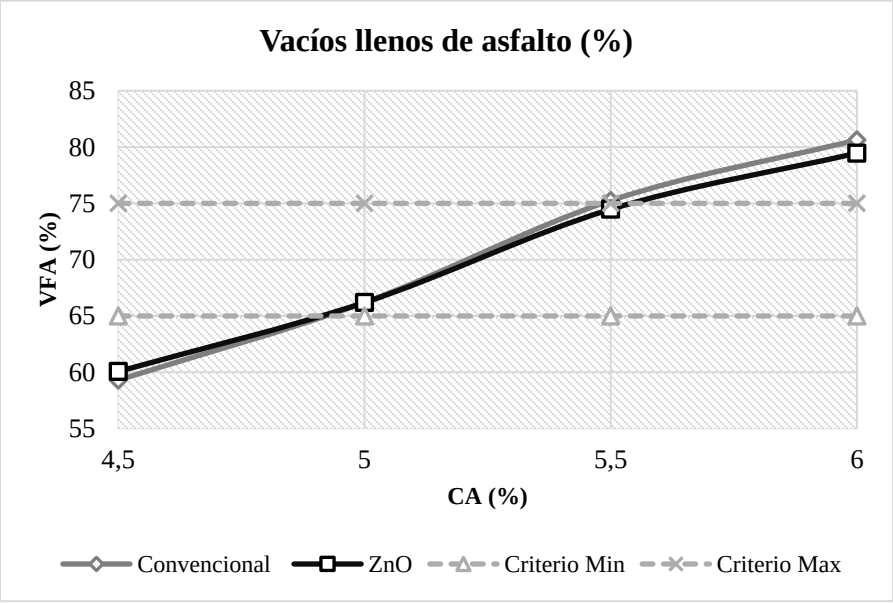
- Se establece que el criterio mínimo de VMA para una capa intermedia de nivel de tránsito 3 es de 15%. Es notable que todas las muestras tanto las MDCC como las MDCM cumplen este criterio.
- En concordancia con el resultado del análisis estadístico ANOVA realizado en el paso 4 de esta fase también se evidencia en la gráfica que los VMA no tuvieron un cambio significativo con respecto a las MDCC.
- Se observa que los VMA presentan una tendencia estable, manteniéndose en valores que oscilan entre el 16 y 17% con todos los contenidos de CA.

e) Análisis de los vacíos llenos de asfalto (VFA) de las MDCM en comparación con las MDCC.

La Figura 18, muestra los valores de *VFA* de las MDCC y MDCM, así como el criterio mínimo y máximo para esta variable de acuerdo con el INVIAS (2022).

Figura 18.

Gráfica variable Vacíos llenos de asfalto (VFA) de la MDCC (Convencional) vs MDCM (ZnO).



Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Método Marshall

- Se establece que el criterio de VFA para una capa intermedia de nivel de tránsito NT3 es de 65% a 75%. Es notable que las muestras tanto las MDCC como las MDCM que cumplen son las que poseen contenidos de CA del 5.0% y 5.5%.
- En concordancia con el resultado del análisis estadístico ANOVA realizado en el paso 4 de esta fase también se evidencia en la gráfica que los VFA no tuvieron un cambio significativo con respecto a las MDCC.
- Se observa que la relación entre los VFA y el porcentaje de contenido de CA es directamente proporcional.

✓ **Paso 6.** Según los análisis mostrados en los pasos anteriores se seleccionó 5.5 % como el porcentaje de cemento asfáltico CA óptimo de acuerdo con los estándares para el diseño de MDCs según el Método Marshall y siguiendo los criterios de diseño del INVIAS (2022).

Fase III. Estimación de la resistencia bajo carga monotónica mediante Ensayo de Tensión Indirecta y la pérdida de desgaste por abrasión a través del Ensayo Cántabro.

Desarrolladas las actividades, los resultados se presentan a continuación.

a) Aplicación del ensayo de Tensión Indirecta.

Siguiendo los lineamientos del ensayo de Tensión Indirecta se obtuvo la resistencia al daño por humedad de la MDCC y la MDCM con un porcentaje de CA del 5.5%.

Se fabricaron 6 briquetas con un contenido de CA de 5.5% y se dividió en 2 subgrupos, el primero de 3 briquetas se mantiene en condiciones secas y el segundo de 3 briquetas que se sumergen en agua. Luego ambos grupos se sometieron al ensayo de Tensión Indirecta.

- Cálculos del ensayo de Tensión indirecta de la MDCM y la MDCC con porcentaje de CA del 5.5%. La Tabla 28, muestra los valores de *Resistencia* de la MDCC y MDCM en seco y la Tabla 29, muestra los valores de *Resistencia* de la MDCC y MDCM saturada.

Tabla 28.

Cálculos ensayo de Tensión Indirecta de la MDCC y MDCM seco.

Muestra	MDCC-5.5%			MDCM- 5.5%		
	1	2	3	1	2	3
Altura Prom. [cm]	6,42	6,44	6,45	6,41	6,40	6,42
Diámetro [cm]	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
Carga máx. [kN]	8,43	8,12	8,77	10,04	9,87	10,25
Resistencia [kPa]	822,8	790,1	852,0	981,4	966,3	1000,4
Resistencia prom. [kPa]		**821,6**			**982,7**	
Desviación [kPa]		31,0			17,1	
Desviación [%]		3,77			1,74	

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Ensayo de Tensión Indirecta.

Tabla 29.

Cálculos ensayo de Tensión Indirecta de la MDCC y MDCM saturada.

Muestra	MDCC-5.5%			MDCM- 5.5%		
	1	2	3	1	2	3
Altura Prom. [cm]	6,42	6,48	6,41	6,42	6,41	6,43
Diámetro [cm]	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
Carga máx. [kN]	7,12	6,99	7,42	8,96	8,56	8,73
Resistencia [kPa]	694,9	675,9	725,3	874,5	836,8	850,7
Resistencia prom. [kPa]		**698,7**			**854,0**	
Desviación [kPa]		24,9			19,1	
Desviación [%]		3,57			2,23	

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Ensayo de Tensión Indirecta.

El ANOVA de los resultados del ensayo de resistencia al daño por humedad de la MDCC y MDCM con un porcentaje de CA del 5.5% se muestra en las Tablas 30 y 31. Se realiza un análisis a las MDCC y la MDCM con porcentaje de CA del 5.5%, a través de la herramienta **ANOVA** para evidenciar el nivel de significancia del cambio bajo las premisas, así:

- *Si F > F critico entonces el cambio Es significativo estadísticamente.*
- *Si F < F critico entonces el cambio No es significativo estadísticamente.*

Tabla 30.

Análisis estadístico ANOVA del ensayo Tensión Indirecta de la MDCC y MDCM con un contenido de CA 5.5% en seco.

Variable	*F*	*F critico*	Significativo
Resistencia [kPa]	62,249	7,708	Si

Nota: elaboración propia según análisis estadístico ANOVA.

Tabla 31.

Análisis estadístico ANOVA del ensayo Tensión Indirecta de la MDCC y MDCM con un contenido de CA 5.5% en saturado.

	F	*F critico*	Significativo
Resistencia [kPa]	73,412	7,708	Si

Nota: elaboración propia según análisis estadístico ANOVA.

Según el análisis de la Tabla 30, se aprecian diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a tensión indirecta entre la MDCM y la MDCC en seco con contenido de CA del 5.5%. Según el análisis de la Tabla 31, se aprecian diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a tensión indirecta entre la MDCM y la MDCC en saturado con contenido de CA del 5.5%.

- Cálculo de TSR de la MDCC y la MDCM con contenido de CA del 5.5%

El cálculo de la variable de resistencia al daño por humedad se realizó de la siguiente manera: *TSR = Resistencia en saturado / Resistencia en seco.*

A continuación, en la Tabla 32 se muestran los valores en porcentaje del TSR para las MDCC y MDCM con contenido de CA del 5.5%.

Tabla 32.

Valor TSR de la MDCC y la MDCM con contenido de CA del 5.5%

	TSR (%)
MDCC	85,0
MDCM	86,9

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Ensayo de Tensión Indirecta.

Según los análisis mostrados se determina que la MDCM muestra una resistencia al daño por humedad mayor que la MDCC, ya que aumento en un 1.9%. Adicionalmente los cambios son significativos estadísticamente según el análisis ANOVA.

b) Aplicación del ensayo Cántabro

Siguiendo los lineamientos del ensayo Cántabro se obtuvo el porcentaje de desgaste por abrasión de la MDCC y la MDCM con un porcentaje de CA del 5.5%.

Se fabricaron 6 briquetas utilizando un contenido de CA del 5.5%, distribuidas equitativamente entre dos tipos de mezclas (MDCC y MDCM), con 3 briquetas para cada tipo. Se registró la masa inicial de cada briqueta antes de someterlas a la máquina de los ángeles, donde se aplicó una velocidad de 500 rpm para evaluar su resistencia al desgaste por abrasión. Al concluir el proceso, se determinó la masa final de cada briqueta y se calculó el desgaste individual de todas ellas, todo lo anterior siguiendo la normativa vigente (INVIAS, 2022).

- Cálculos del ensayo de Cántabro de la MDCM y la MDCC con porcentaje de CA del 5.5%.

La Tabla 33, muestra los valores *Desgaste Cántabro* de la MDCC y MDCM

Tabla 33.

Cálculos ensayo Cántabro de la MDCC y MDCM con un contenido de CA 5.5%.

Mezcla	**MDCC (5.5%)**			**MDCM (5.5%)**		
Masa inicial de la briqueta (g)	1198,2	1196	1195,3	1193,2	1193,7	1196,7
Masa final de la briqueta (g)	1009,6	1007,5	1001,9	1029	1033,8	1023,9
Desgate Cántabro (%)	15,7	15,8	16,2	13,8	13,4	14,4
Promedio (%)		**15,9**			**13,9**	
Desviación (%)		0,25			0,53	

Nota: elaboración propia según implementación de los lineamientos del Ensayo de Tensión Indirecta.

- Análisis estadístico ANOVA de desgaste por abrasión de la MDCC y MDCM con un porcentaje de CA del 5.5% (Ver tabla 34). Se realizó un análisis a las MDCC y la MDCM con porcentaje de CA del 5.5%, a través de la herramienta ANOVA para evidenciar el nivel de significancia del cambio bajo las premisas, así:
  - *Si F > F critico entonces el cambio Es significativo estadísticamente.*
  - *Si F < F critico entonces el cambio No es significativo estadísticamente.*

Tabla 34.

Análisis estadístico ANOVA del ensayo Cántabro de la MDCC y MDCM con un contenido de CA 5.5% en seco.

Variable	*F*	*F critico*	Significativo
Desgaste Cántabro (%)	36,044	7,708	Si

Nota: elaboración propia según análisis estadístico ANOVA.

Según el análisis de la Tabla 34, se aprecian diferencias estadísticamente significativas en el desgaste por abrasión entre la MDCM y la MDCC en seco con contenido de CA del 5.5%. Según los análisis mostrados se determina que la MDCM muestra un desgaste por abrasión menor que la MDCC, ya que disminuyó en un 2%. Adicionalmente, los cambios fueron significativos estadísticamente de acuerdo con el análisis ANOVA.

Conclusiones

Llevado a cabo el estudio sobre la aplicabilidad del ZnO como modificador de un CA 60-70 para fabricar una MDC-19, se han obtenido resultados significativos que ofrecen una perspectiva clara sobre su potencial en el mejoramiento de las propiedades de los ligantes utilizados en pavimentos. A través de tres fases metodológicas, se establecieron los parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del CA modificado con ZnO, se seleccionó el contenido óptimo de CA según el Método Marshall y se evaluó la resistencia bajo carga monotónica en tensión indirecta (seco, sumergido en agua), la resistencia al daño por humedad (TRS) y a la abrasión (Cantabro) de las mezclas modificadas. En este contexto, las conclusiones obtenidas se enuncian a continuación.

- Los parámetros óptimos de temperatura, velocidad y tiempo de mezclado del CA modificado con ZnO fueron establecidos en 150°C ± 5, 4000 rpm, y 60 minutos, respectivamente.
- Se determinó que un contenido de CA del 5.5% es óptimo para el diseño de la mezcla de Control (MDCC) y de la modificada con ZnO (MDCM), ya que mostró diferencias estadísticamente significativas en la resistencia bajo carga monotónica en comparación con los demás porcentajes de asfalto, además de cumplir con los criterios volumétricos establecidos por la especificación INVIAS (2022).
- La MDCM experimenta mayor resistencia bajo carga monotónica (mayor relación E/F y resistencia en tensión indirecta seca y saturada), al daño por humedad (mayor TSR) y un menor desgaste por abrasión (menor pérdida de masa en el ensayo Cantabro) en comparación con la MDCC. Adicionalmente, con base en el análisis ANOVA, esta mayor resistencia es significativa estadísticamente.

- Este proyecto es un valioso aporte al campo de la ingeniería vial y la construcción de infraestructuras. Se ha investigado y evaluado el uso del ZnO como modificador del CA en una MDC-19. Los resultados obtenidos son prometedores, ya que el ZnO ha demostrado mejorar significativamente las propiedades de la MDC-19. Lo anterior resalta la importancia de seguir investigando y realizando experimentos en este campo.
- La evidencia proporcionada por este estudio sugiere que el ZnO puede desempeñar un papel crucial en la mejora de la calidad y durabilidad de las mezclas asfálticas. Esto representa una oportunidad para innovar en la industria y lograr avances en la optimización de las carreteras colombiana.
- También se resalta la necesidad de seguir avanzando en el conocimiento y la aplicación de tecnologías modificadoras en el diseño y construcción de carreteras. Esto permitirá alcanzar estándares más altos de calidad, rendimiento y sostenibilidad en los distintos proyectos de infraestructuras viales.
- Se recomienda en futuros estudios, llevar a cabo fases experimentales adicionales para evaluar otros parámetros de resistencia bajo carga cíclica como el módulo resiliente, la resistencia al ahuellamiento y a la fatiga. Asimismo, evaluar aspectos asociados a durabilidad como la resistencia al envejecimiento. También se recomienda estudiar otros tipos de mezclas asfálticas y granulometrías, así como diferentes tipos de ligantes asfálticos.

Referencias

Al-Mistarehi, B., Al-Omari, A., Taamneh, M., Imam, R., y Khafaja, D. A. (2021). The effects of adding Nano Clay and Nano Zinc Oxide on asphalt cement rheology. J. King Saud Univ. Eng. Sci.

Antonio, W.M. y Parra, A.S. (2024). Estudio de aplicabilidad del óxido de zinc como modificador del cemento asfáltico en una mezcla densa en caliente. Trabajo de conclusión de Maestría en Infraestructura Vial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.

Bastidas, J. G. y Rondón, H. A. Caracterización de mezclas de concreto asfáltico. (2020). Editorial Universidad Piloto de Colombia, Bogotá D.C., Colombia. ISBN: 978- 958-510-618-5.

De Sousa Neto, V.F., de Figueirêdo, L.C., de Barros, A.G., de Figueirêdo, A.E., Filho, P.G. (2022). Rheological evaluation of asphalt binder modified with zinc oxide nanoparticles. Case Stud. Constr. Mater. 17.

Di, H., Zhang, H., Yang, E., Ding, H., Liu, H., Huang, B., Qiu, Y. (2023). Usage of Nano-TiO2 or Nano-ZnO in asphalt to resist aging by NMR spectroscopy and rheology technology. J. Mater. Civ. Eng. Vol. 35.

Du, P. F., Ke, N. X., y Zhang, H. L. (2015). Effect of nano-zonc oxide on the morphology and ultraviolet anging properties of various bitumens. Pet. Sci. Technol. 33, Pág. 1170 - 1117.

Du, P., Long, J., Duan, H., Luo, H., Zhang, H. (2022). Laboratory performance and aging resistance evaluation of zinc oxide/expanded vermiculite composite modified asphalt binder and mixture. Constr. Build. Mater. Vol. 358.

Duan, H., Kuang, H., Zhang, H., Liu, J., Luo, H., y Cao, J. (2022). Investigation on microstructure and anging resistance of vitumen modified by zinc oxide/expanded vermiculite composite synthesized with different methods. Fuel, Vol. 324. Part A.

Fakhri, M., y Shahryari, E. (2021). The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility. Case Stud. Constr. Mater. 15.

Fu, Z., Tang, Y., Ma, F., Wang, Y., Dai, S. J., Hou, Y., Li, J. (2022). Rheological properties of asphalt binder modified by nano-TiO2/ZnO and basalt fiber. Constr. Build. Mater. Vol. 320.

Guo, G., Zhang, H. (2022). The effect of morphology of ZnO particle on properties of asphalt binder and mixture. Int. J. Transp. Sci. Technol. Vol. 11, Pág. 437–454.

Hamedi, G. H., y Nejad, F. M. (2016). The employment of thermodynamic and mechanical methods to evaluate the impact of nanomaterials on moisture damage og HMA. Mater. Struct. 49., Pág. 4483-4495.

Han, D., Hu, G., Zhang, J. (2023). Study on anti-aging performance enhancement of polymer modified asphalt with high linear SBS content. Polymers. Vol 15, Pág. 256.

IDU – Instituto de Desarrollo Urbano. (2018). Especificaciones técnicas generales de materiales. Bogotá D.C., Colombia.

INVIAS – Instituto Nacional de Vías. (2022). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Bogotá D.C., Colombia.

Kamboozia, N., Rad, S.M., Saed, S.A. (2022). Laboratory investigation of the effect of Nano-ZnO on the fracture and rutting resistance of porous asphalt mixture under the aging condition and freeze–thaw cycle. J. Mater. Civ. Eng. Vol. 34.

Liu, H. Y., Zhang, H. L., Hao, P. W., y Zhu, C. Z. (2015). The effect of surface modifiers on ultraviolet aging properties of nano-zinc oxide modified bitumen. Pet. Sci. Technol. 33., Pág 77-78.

Rocha Segundo, I. G., Dias, E., Fernandes, F., de Freitas, E. F., Costa, M. F., y Carneiro, J. O. (2019). Photocatalytic asphalt pavement: The physicochemical and rheological impact of TiO2 nano/microparticles onto the bitumen. Road Mater. Pavement Des. 20., Pág. 1452-1467.

Rondón, H. A., y Reyes, F. A. (2015). Pavimentos materiales, construcción y diseño. Bogotá D.C., Colombia.: Ecoe Ediciones.

Rondón Quintana, H., Ruge Cardenas, J., y Zafra Mejía, C. (2023). The Use Of Zinc Oxide in Asphalts. Sustainability, Pág. 1 - 13.

Rondón-Quintana, H.A., Ruge, J.C., Reyes, F.A., Bastidas, J.G. and Zafra-Mejía, C.A. (2023a). Mechanical resistance of hot-mix asphalt using phosphorite as filler. Journal of Materials in Civil Engineering, 35(9), 04023274.

Rondón-Quintana, H.A., Zafra-Mejía, C.A., Urazán-Bonells, C.F. (2024). Aging resistance evaluation of an asphalt mixture modified with zinc oxide. Infrastructures, 9, 81.

Saltan, M., Terzi, S., y Karahancer, S. (2019). Mechanical behavior of vitumen and hot-mix asphalt modified with zinc oxide nanoparticle. J. Mater. Civ. Eng. 31.

Staub de Melo, J.V., Manfro, A.L., Barra, B.S., Dell'Antonio Cadorin, N., Borba Broering, W. (2023). Evaluation of the rheological behavior and the development of performance equations of asphalt composites produced with titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles. Nanomaterials. Vol. 13, Pág. 288.

Verdeja, L. F., García, M. P., y Huerta, M. A. (1992). El óxido de zinc: Propiedades y aplicaciones. Revista de Minas. N° 7, Pág. 87-96.

Xu, X., Guo, H., Wang, X., Zhang, M., Wang, Z., y Yang, B. (2019). Physical properties and anti-anging characteristics of asphalt modified with nano-zinc oxide powder. Constr. Build. Mater. 224., Pág. 732-742.

Zhang, H. B., Zhang, H. L., Ke, N. X., Huang, J. H., y Zhu, C. Z. (2015). The effect of different nanomaterials on the long-term aging properties of bitumen. Pet. Sci. Technol. 33., Pág. 388-396.

Zhang, H., Gao, Y., Guo, G., Zhao, B., y Yu, J. (2018). Effects of ZnO particle size on properties of asphalt and asphalt mixture. Constr. Build. Mater. 159., Pág. 578-586.

Zhang, H., Zhu, C., y Kuang, D. (2016). Physical, rheological, and aging properties of bitumen containing organic expanded vermiculite and nano-zinc. J. Mater. Civ. Eng. 28.

Zhang, H., Zhu, C., Yu, J., Tan, B., y Shi, C. (2015). Effect of nano-zinc oxide on ultraviolet aging properties of bitumen with 60/80 penetration grade. Mater. Struct., Pág. 3249-3257.

Zhu, C., Zhang, H., Shi, C., y Li, S. (2017). Effect of nano-zinc oxide and organic expanded vermiculite on rheological properties of different bitumens before and after aging. Constr. Build. Mater. 146., Pág. 30-47.

Anexos

Anexo 1.

Ensayo Marshall (INV. E 748-13) Mezcla Densa en Caliente Convencional (MDCC)



Nota: dar doble clic para abrir

Anexo 2.

Ensayo Marshall (INV. E 748-13) Mezcla Densa en Caliente Modificada (MDCM)



Nota: dar doble clic para abrir

Anexo 3.

Ensayo Cántabro (Tex-245-F, 2021)



Nota: dar doble clic para abrir

Anexo 4.

Ensayo Tensión Indirecta (INV. E-725-1)



Nota: dar doble clic para abrir

Anexo 5.

Resumen de revisión de literatura.

Ref.	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Autor/Año
1	Effect of nano-zinc oxide on the morphology and ultraviolet aging properties of various bitumens. (Du, et al., 2015)	Evaluar el efecto del nano-ZnO (15–25 nm) sobre la morfología y las propiedades de envejecimiento UV de dos aglomerantes asfálticos (AC 73 dmm y AC 92 dmm).	Ambos AC se mezclaron con nano-ZnO (2% en peso) a 150±5◦C a 5000 rpm durante 60 min. Luego se continuó mezclando, a 2000 rpm durante 90 min. Este mismo proceso se copió para los AC sin nano-ZnO para comparar. Los ligantes asfálticos fueron envejecidos en TFOT + UV. El residuo de TFOT se envejeció con UV durante un período de 0 a 24 días en un horno con una lámpara UV de 500 W. La intensidad de la radiación UV fue de 8 w/m.2. La penetración (25◦C), punto de reblandecimiento, ductilidad (15◦C), RV (60◦C), y se midieron las propiedades reológicas de los aglutinantes antes y después del envejecimiento utilizando un DSR. También se realizaron pruebas utilizando AFM y FTIR. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 5)	La resistencia al envejecimiento de ambos aglutinantes mejoró, pero el efecto del nano-ZnO dependió del tipo de aglutinante base. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 5)	Du, P.F.; Ke, N.X.; Zhang, H.L. 2015. (Ref.)
2	The effect of surface modifiers on ultraviolet aging properties of nano-zinc oxide modified bitumen. (Liu et al., 2015)	Evaluar el efecto de los modificadores de superficie sobre las propiedades de envejecimiento ultravioleta del betún modificado con nano óxido de zinc	Se modificó un AC 73 dmm con 3% en peso de nano-ZnO (15–25 nm). Se modificó previamente con MTS, 3, APTS y EPTMS. La mezcla se realizó a 150±5◦C, 5000 rpm durante 60 min, Luego se continuó la mezcla a una velocidad de 2000 rpm durante aproximadamente 90 min. Los investigadores realizaron la prueba HTS; envejecidos los aglutinantes en TFOT + UV; y realizó puntos de reblandecimiento, penetración, ductilidad (15◦C), VD (60, 135◦C), y pruebas FTIR. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 5)	La resistencia al envejecimiento por rayos UV mejoró con nano-ZnO y la resistencia cambió según el tipo de modificador utilizado en su superficie. Según los investigadores, la modificación de la superficie del nano-ZnO fue un método eficaz para mejorar la resistencia del aglutinante al envejecimiento por rayos UV. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 5)	Liu, H.Y.; Zhang, H.L.; Hao, P.W.; Zhu, C.Z. 2015. (Ref.)

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts

Continuación Anexo 5.

Ref.	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Autor/Año
3	Effect of nano-zinc oxide on ultraviolet aging properties of bitumen with 60/80 penetration grade. (Zhang et al., 2015)	Evaluar el efecto del nano óxido de zinc sobre las propiedades de envejecimiento ultravioleta del betún con grado de penetración	Se modificó un AC 73 dmm con nano-ZnO (15–25 nm) y nano-ZnO modificado en la superficie La mezcla de AC con 2% en peso de nano-ZnO (sin y con modificación) se realizó a 150±5◦C a 5000 rpm durante 60 min usando un mezclador de alto cizallamiento. Luego se continuó mezclando, usando un agitador de paletas a 2000 rpm durante 90 min. El mismo proceso se realizó en AC no modificado. El AC (sin modificar y modificado) se envejeció a TFOT + UV. Los investigadores realizaron el punto de reblandecimiento, la penetración, la ductilidad (5◦C), RV (60 y 135◦C), pruebas FTIR, AFM y HTS. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 6)	La compatibilidad entre AC y nano-ZnO mejoró junto con la modificación de la superficie de nano-ZnO. La resistencia al envejecimiento por rayos UV mejoró cuando se modificó el AC con nano-ZnO, y fue mayor cuando este último se modificó con c-(2,3-epoxipropoxi) propiltrimetoxisilano. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 6)	Zhang, H.; Zhu, C.; Yu, J.; Tan, B.; Shi, C. 2015. (Ref.)
4	The effect of different nanomaterials on the long-term aging properties of bitumen. (Zhang et al., 2015)	Evaluar el efecto de diferentes nanomateriales sobre las propiedades de envejecimiento a largo plazo del betún.	Se modificó un AC 75 dmm con nano-ZnO (15–25 nm) y OEVMT (tamiz 300). La superficie del nano-ZnO había sido modificada previamente con 3-aminopropiltrietoxisilano. El contenido de ambos nanomateriales fue del 3% en peso. La mezcla se realizó a 150±5◦C y 5000 rpm durante 60 min usando un mezclador de alto cizallamiento. Luego se mezcló usando un agitador de paletas a una velocidad de 2000 rpm durante 90 min. También se realizó el mismo proceso para el aglutinante base. Los ligantes modificados fueron envejecidos en PAV, y el punto de reblandecimiento, penetración, ductilidad (15◦C), VD (60, 135◦C), se realizaron pruebas de espectros de reflectancia difusa XRD, FTIR y ultravioleta visible (UV-Vis). (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 6)	El nano ZnO mejoró la resistencia al envejecimiento por rayos UV. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 6)	Zhang, H.B.; Zhang, H.L.; Ke, N.X.; Huang, J.H.; Zhu, C.Z. 2015. (Ref.)

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts

Continuación Anexo 5.

Ref.	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Autor/Año
5	Physical, rheological, and aging properties of bitumen containing organic expanded vermiculite and nano-zinc oxide. (Zhang et al., 2016)	Evaluar las propiedades físicas, reológicas y de envejecimiento del betún que contiene vermiculita orgánica expandida y nano óxido de zinc.	Se modificó un AC 63 dmm con 1% en peso de OEVMT y 1, 2, 3 y 4% en peso de nanoZnO. La mezcla se realizó a 150◦C a 4000 rpm durante 60 min. Luego, se continuó mezclando a una velocidad de rotación de 2000 rpm a 150◦C durante aproximadamente 90 min. También se realizó el mismo proceso de preparación sobre el aglutinante base. Se realizaron pruebas DSR en las muestras. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 6)	El OEVMT y nano-ZnO mejoraron la resistencia a la oxidación térmica y al envejecimiento. El contenido recomendado de estos materiales fue 1% OEVMT + 3% nano-ZnO. Nano-ZnO tiene una influencia negativa sobre las propiedades físicas del aglutinante cuando su contenido supera el 4% en peso. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 6)	Zhang, H.; Zhu, C.; Kuang, D, 2016. (Ref.)
6	The employment of thermodynamic and mechanical methods to evaluate the impact of nanomaterials on moisture damage of HMA. (Hamedi y Nejad, 2016)	Evaluar el empleo de métodos termodinámicos y mecánicos para evaluar el impacto de los nanomateriales en el daño por humedad del HMA.	Se modificó un AC 69 dmm con nano ZnO (2 y 4% en peso). El aire acondicionado se mezcló con nano ZnO durante 4 a 5 minutos a 130-140◦C y 14.000 rpm. Los investigadores fabricaron mezclas asfálticas diseñadas mediante el procedimiento Marshall y midieron la TSR y la SFE en las muestras. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 6)	El Nano ZnO disminuyó la acidez del ligante asfáltico, mejorando la adherencia con un agregado ácido como el granito. Incrementó el SFE de adherencia entre el agregado y el asfalto. Esto aumentó la resistencia al daño por humedad de la mezcla asfáltica. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 6)	Hamedi, G.H.; Nejad, F.M. 2016. (Ref.)
7	Effect of nano-zinc oxide and organic expanded vermiculite on rheological properties of different bitumens before and after aging. (Zhu et al., 2017)	Evaluar el efecto del nano óxido de zinc y la vermiculita orgánica expandida sobre las propiedades reológicas de diferentes betunes antes y después del envejecimiento.	Los investigadores utilizaron una superficie de nano-ZnO modificada con c-(2,3-epoxipropoxi) propiltrimetoxisilano y OEVMT. Inicialmente, el nano-ZnO modificado (1% en peso) + OEVMT (3% en peso) se mezcló a 150±5◦C y 4000 rpm durante 60 min usando un mezclador de alto cizallamiento. Luego se continuó mezclando a 2000 rpm durante 90 min. Se realizó el mismo proceso para los aglutinantes no modificados. Los aglutinantes se envejecieron en TFOT, PAV, UV y NEA (la muestra TFOT estándar se expuso a luz natural durante 90 días). Las pruebas de reología se realizaron utilizando DSR y BBR. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 6)	Los modificadores mejoraron la resistencia al envejecimiento por ahuellamiento, oxidación térmica y fotooxidación. El efecto potenciador del modificador antienvejecimiento dependía de la naturaleza del aglutinante. El modificador antienvejecimiento mejoró el rendimiento reológico a baja temperatura del conglomerante AC 90 dmm y tuvo poca influencia sobre los demás. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 6)	Zhu, C.; Zhang, H.; Shi, C.; Li, S. 2017. (Ref.)

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts

Continuación Anexo 5.

Ref.	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Autor/Año
8	Effects of ZnO particle size on properties of asphalt and asphalt mixture. (Zhang et al., 2018)	Evaluar los efectos del tamaño de partículas de ZnO sobre las propiedades del asfalto y la mezcla asfáltica.	Se Modificó un AC de 64,3 dmm con tres nanopartículas de ZnO de diferentes tamaños esféricos (2 micrones, 80 nm y 350 nm de diámetro promedio). La superficie de ZnO se modificó utilizando un agente acoplante de silano. Se agregaron partículas de ZnO en proporciones de 2, 3 y 4% en peso. También se añadió SBS en proporciones de 3 y 4% en peso. La mezcla entre AC y ZnO se realizó inicialmente a 160◦C, 1500 rpm y 20 min, y luego se continuó mezclando a 170◦C, 4000 rpm y 40 min. se realizaron pruebas de viscosidad. también evaluó la caracterización reológica mediante pruebas DSR y BBR. Los investigadores fabricaron y diseñaron cuatro mezclas asfálticas (AC sin modificar; AC modificada con 4% en peso de ZnO; AC modificada con 4% en peso de SBS; y AC modificada con ZnO y SBS). En estas mezclas se realizaron pruebas de Marshall, división por congelación y descongelación, formación de surcos y flexión de tres puntos. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 7)	El mejor desempeño de las pruebas evaluadas se reportó a medida que disminuyó el tamaño del ZnO. Los resultados del estudio recomendaron el tamaño de 80 nm para un modificador de CA. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 7)	Zhang, H.; Gao, Y.; Guo, G.; Zhao, B.; Yu, J. 2018. (Ref.)
9	Photocatalytic asphalt pavement: The physicochemical and rheological impact of TiO2 nano/microparticles and ZnO microparticles onto the bitumen. (Rocha-Segundo et al., 2019)	Evaluar el impacto fisicoquímico y reológico del TiO2nano/micropartículas y micropartículas de ZnO sobre el betún.	Se modificó un AC 38 dmm combinándolo con 0,3, 0,8 y 1,0% en peso de TiO 2+ 0,2 % en peso de ZnO (tamaño de partícula 45µmetro). La mezcla se realizó a 160◦C durante 5 min a 200 rpm. FTIR, penetración, punto de reblandecimiento, viscosidad dinámica (150◦C), y se realizaron pruebas de DSR en el aglutinante modificado. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 7)	El aglutinante modificado podría utilizarse para producir pavimentos asfálticos fotocatalíticos sin impactos fisicoquímicos o reológicos sobre el aglutinante. Ambas micropartículas aumentan la resistencia al envejecimiento a corto plazo del aglutinante. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 7)	Rocha Segundo, IG; Días, EAL; Fernández, FDP; de Freitas, EF; Costa, MF; Carneiro, JO. 2019. (Ref.)

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts

Continuación Anexo 5.

Ref.	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Autor/Año
10	Mechanical behavior of bitumen and hot-mix asphalt modified with zinc oxide nanoparticle. (Saltan et al., 2019)	Evaluar Comportamiento mecánico del betún y mezcla asfáltica en caliente modificado con nanopartículas de óxido de zinc.	Se modificó un AC 62,2 dmm (PG 64–22) con ZnO (1, 3 y 5% en peso). Ambos materiales se mezclaron a 4000 rpm y 160◦C durante 2 h. se envejeció en un RTFOT (prueba de horno de película fina con laminación) y PAV. Se midió su viscosidad y se evaluaron sus comportamientos ante la fatiga y la formación de roderas mediante pruebas DSR y BBR. Los investigadores y midieron la susceptibilidad a la humedad (ITS) realizando pruebas modificadas por Lottman. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 7)	El mejor rendimiento de las mezclas se obtuvo con la modificación del 5% en peso de ZnO. Al 1% en peso, la mezcla se comportó de manera similar a la muestra de control. El HMA experimentó una mayor resistencia contra la humedad para todos los porcentajes de modificación. Las modificaciones de ZnO tuvieron un rendimiento de fatiga más bajo, pero los rendimientos de rodadura y envejecimiento más altos. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 7)	J. Mater. Civ. Eng. 2019. (Ref.)
11	Physical properties and anti-aging characteristics of asphalt modified with nano-zinc oxide powder. (Xu et al., 2019)	Evaluar propiedades físicas y características antienvejecimiento del asfalto modificado con polvo de nano óxido de zinc.	Se modificó un AC 69 dmm con polvo de nano-ZnO (tamaño promedio de partícula 30 nm). Los porcentajes adicionales fueron 1, 2, 3, 3, 4 y 5% en peso. La mezcla se realizó a 150±5◦C a una velocidad de rotación de 5000 rpm durante 60 min y se agitó a una velocidad de 2000 rpm durante 90 min. Penetración, punto de reblandecimiento, ductilidad (5◦C), se realizaron pruebas de estabilidad en almacenamiento, DSR.	El nano-ZnO aumentó la rigidez del aglutinante y su resistencia al envejecimiento por rayos UV. También pudo mejorar significativamente sus propiedades reológicas. La dosis razonable de nano-ZnO se cuantificó en 3% en peso. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 7)	Xu, X.; Guo, H.; Wang, X.; Zhang, M.; Wang, Z.; Yang, B, 2019. (Ref.)
12	The effects of adding Nano Clay and Nano Zinc Oxide on asphalt cement rheology. (Al-Mistarehi et al., 2021)	Evaluar los efectos de agregar nanoarcilla y nano óxido de zinc en la reología del cemento asfáltico.	Se modificó un AC 68 dmm con Nano Clay—NC (8, 10 y 12% en peso) y nano-ZnO (20–30 nm; 1, 2 y 3% en peso). Usando nano-ZnO, el tiempo de mezcla con el aglutinante estuvo inicialmente 20 min a una temperatura de 160±5◦C y una velocidad de 2000 rpm. Luego, el tiempo de mezclado aumentó a 40 min a una temperatura de 170ºC. ±5◦C y 4500 rpm. Penetración, punto de reblandecimiento, puntos de inflamación y de incendio, RV (135◦C), DSR y BBR se realizaron en los aglutinantes modificados.	El aglutinante aumentó su rigidez y viscosidad con nano-ZnO, mejorando su resistencia a la rodadura. También mejoró su resistencia a la fatiga y su rendimiento a bajas temperaturas. El contenido óptimo de nano-ZnO fue del 3% en peso. Al considerar el costo de la modificación, la adición de 3% en peso de nano-ZnO fue más barata que la adición de 10% en peso de NC, y se lograron resultados comparables. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 8)	Al-Mistarehi, B.; Al-Omari, A.; Taamneh, M.; Imam, R.; Khafaja, DA. 2021. (Ref.)

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts

Continuación Anexo 5.

Ref.	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Autor/Año
13	The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA). (Fakhri y Shahryari, 2021)	Evaluar los efectos del nano óxido de zinc (ZnO) y el nano óxido de grafeno reducido (RGO) sobre la propiedad de susceptibilidad a la humedad del asfalto de masilla de piedra (SMA).	Se modificó un AC 64 dmm con nano-ZnO (0,2, 0,4 y 0,6% en peso; diámetro de partícula 20–60 nm) y óxido de grafeno nanoreducido (RGO). La mezcla se llevó a cabo a 160±5◦C y 4000 rpm durante 50 min. Se ensayó la ductilidad de los aglutinantes modificados (15◦C), viscosidad Saybolt (135◦C), punto de reblandecimiento, penetración y gravedad específica. Los investigadores fabricaron mezclas de SMA diseñadas utilizando el método Marshall y realizaron inmersión Marshall, ITS, agua hirviendo, fluencia estática, adherencia por extracción y SCB (25◦C).	Ambos nanomateriales aumentaron la rigidez del conglomerante y mejoraron el recubrimiento y la adherencia con los áridos. Además, ambos nanomateriales mejoraron el rendimiento de las mezclas ante el daño por humedad y la formación de surcos, y aumentaron la energía de fractura promoviendo la resistencia contra la propagación de grietas por fatiga en condiciones secas y húmedas. El mejor rendimiento se obtuvo con una adición de 0,6% en peso de nano-ZnO. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 8)	Fakhri, M.; Shahryari, E. 2021. (Ref.)
14	Physical and antiaging properties of rodlike Nano-ZnO–modified asphalt. (He et al., 2021)	Evaluar las propiedades físicas y antienvejecimiento del asfalto modificado con Nano-ZnO en forma de varilla.	Se modificó un AC 65 dmm con nano-ZnO en forma de varilla (0,5, 1, 2, 2, 3 y 4% en peso). La mezcla se realizó a 150±5◦ C durante 1 h a 5000 rpm, y las muestras se envejecieron en TFOT + UV. Los investigadores realizaron pruebas de penetración, así como de punto de reblandecimiento, ductilidad (5◦ C), observaciones DSR, FTIR, absorción de infrarrojos visible-UV y SEM.	El nano-ZnO en forma de varilla aumentó la rigidez del aglutinante y la resistencia al envejecimiento por rayos UV. El mejor rendimiento se obtuvo con una adición del 3% en peso. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 8)	He, Z.; Xie, T.; Li, Q.; Wang, P., E. 2021. (Ref.)
15	Rheological evaluation of asphalt binder modified with zinc oxide nanoparticles. (De Sousa Neto et al., 2022)	Evaluar propiedades reológicas de ligante asfáltico modificado con nanopartículas de óxido de zinc.	Se modificó un AC 53 dmm con nano-ZnO (3, 5, 7% en peso). La mezcla se realizó a 150±5◦ C, 2000 rpm durante 90 min. Los investigadores realizaron pruebas de reología (PG, MSCR, LAS, curva maestra)	Los aglutinantes modificados mostraron un mejor rendimiento a altas temperaturas al aumentar la consistencia; viscosidad; rigidez; y resistencia al envejecimiento, al celo y a la fatiga. Esto fue especialmente cierto con un contenido de nano-ZnO del 7% en peso. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 8)	De Sousa Neto, V.F.; de Figueirêdo, L.C.; de Barros, A.G.; de Figueirêdo, A.E.; Filho, P.G. 2022. (Ref.)

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts

Continuación Anexo 5.

Ref.	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Autor/Año
16	Laboratory performance and aging resistance evaluation of zinc oxide/expanded vermiculite composite modified asphalt binder and mixture. (Du et al., 2022)	Evaluar del rendimiento de laboratorio y de la resistencia al envejecimiento de mezcla y aglutinante asfáltico modificado compuesto de óxido de zinc/vermiculita expandida.	Se modificó un AC 66,5 dmm con ZnO y vermiculita (EV) en proporciones de 2, 3, 4,5, 5 y 6% en peso. El ZnO/EV y el aglutinante se mezclaron a 150◦ C durante 1 h a 3600 rpm, y luego se continuó mezclando, usando un agitador mecánico a 2000 rpm durante 1,5 h. Los asfaltos fueron envejecidos en RTFOT, PAV y UV. Los investigadores fabricaron mezcla asfáltica y la sometieron a STOA. Penetración, punto de reblandecimiento, ductilidad (15◦ C), RV (135◦ C), DSR y BBR se realizaron sobre el ligante asfáltico modificado. Marshall, tracción indirecta a baja temperatura (− 6,− 12,− 18◦ C), división por congelación-descongelación y fatiga por tracción indirecta 25◦ C) se realizaron pruebas a la mezclaa	El ZnO/EV aumentó la rigidez del aglutinante y la resistencia la rodadura a altas temperaturas, pero disminuyó su ductilidad y comprometió su rendimiento abajas temperaturas. Con 5% ZnO/EV, la mezcla asfáltica modificada logró un mejor rendimiento a altas y bajas temperaturas, menor susceptibilidad a la humedad y mayor resistencia a la fatiga que la mezcla asfáltica no modificada. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 8)	Du, P.; Long, J.; Duan, H.; Luo, H.; Zhang, H. 2022. (Ref.)
17	Rheological properties of asphalt binder modified by nano-TiO2/ZnO and basalt fiber. (Fu et al., 2022)	Evaluar las Propiedades reológicas del ligante asfáltico modificado por nano-TiO2/ZnO y fibra de basalto.	Se modificó un AC 85 dmm con nano-TiO2, nano-ZnO (nano-TiO2/ZnO = 2,4, 6 y 8% en peso), y fibra de basalto: BF (6% en peso). El nano-TiO2y nano-ZnO se mezclaron y se agitaron enuna proporción de 1:3 durante 5 min a 160 °C. Luego, ambos materiales se mezclaron con el ligante asfáltico durante 10 min. Posteriormente se aplicó cizalla a 5000 rpm durante aproximadamente 50 min. Finalmente, se añadió BF y se mezcló a 2500 rpm durante 40 min. Los aglutinantes se envejecieron en TFOT, PAV y UV. DSR, ZSV, MSCR, LAS (25◦ C), se realizaron pruebas BBR, FTIR y observaciones en SEM sobre el aglutinante modificado.AC 66,5 dmm con ZnO y vermiculita (EV) en proporciones de 2, 3, 4,5, 5 y 6% en peso. El ZnO/EV y el aglutinante se mezclaron a 150◦ C durante 1 h a 3600 rpm, y luego se continuó mezclando, a 2000 rpm durante 1,5 h. Los asfaltos fueron envejecidos en RTFOT, PAV y UV. DSR y BBR se realizaron sobre el ligante asfáltico modificado. Marshall, tracción indirecta a baja temperatura (− 6,− 12,− 18◦ C)	El Nano-TiO2, nano-ZnO y BF aumentaron la formación de roderas, la fatiga a temperatura intermedia y la resistencia al envejecimiento. BF disminuyó el rendimiento ante la fatiga a baja temperatura, pero la adición de nano-TiO2El /ZnO puede haber contribuido a aumentarlo. El nano-TiO óptimo2La dosis de ZnO fue del 4% en peso. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 8)	Fu, Z.; Tang, Y.; Ma, F.; Wang, Y.; Dai, S.J.; Hou, Y.; Li, J. 2022. (Ref.)

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts

Continuación Anexo 5.

Ref.	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Autor/Año
18	Laboratory investigation of the effect of Nano-ZnO on the fracture and rutting resistance of porous asphalt mixture under the aging condition and freeze–thaw cycle. (Kamboozia et al., 2022)	Investigar en laboratorio del efecto del Nano-ZnO sobre la resistencia a la fractura y a la rodadura de mezclas asfálticas porosas en condiciones de envejecimiento y ciclo de hielo-deshielo.	Se modificó un AC 68 dmm con ZnO (2, 4, 6 y 8% en peso). Ambos materiales se mezclaron a temperaturas entre 140 y 155◦ C, bajo 2000 y 5000 rpm, durante 60 a 70min. Para dispersar el ZnO en el aglutinante, Kamboozia et al. (Verdeja, García y Huerta, 1992) utilizó queroseno como disolvente (no está claro cuál fue el efecto de este disolvente en los resultados). Los aglutinantes fueron probados para determinar sus puntos de reblandecimiento, penetración, ductilidad y RV (120, 135, 150◦ C) para determinar el contenido óptimo de ZnO (6% en peso). Las mezclas porosas se fabricaron utilizando un SGC y luego se diseñaron utilizando las pruebas Cantabro, Marshall e ITS. Prueba adicional de huellas de ruedas (45◦ C) y SCB (− 15, 0, 15◦ C) se realizaron pruebas sobre la mezcla diseñada.	La adición de ZnO aumentó la viscosidad del aglutinante, la adhesión y la cohesión de la mezcla. Además, mejoró la resistencia al surco de la mezcla porosa. Sin embargo, en la prueba SCB se encontró que el desempeño de las mezclas con ZnO no fue el mejor. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 9)	Kamboozia, N.; Rad, S.M.; Saed, S.A. 2022. (Ref.)
19	The effect of morphology of ZnO particle on properties of asphalt binder and mixture. (Guo y Zhang, 2022)	Evaluar el efecto de la morfología de las partículas de ZnO sobre las propiedades del aglutinante y la mezcla asfáltica.	Se modificó un AC 64,3 dmm (PG 64-16) con diferentes morfologías de ZnO: aglomerado, esfera, varilla y flor. AC se modificó con 2, 3 y 4% en peso de ZnO. Inicialmente, la mezcla se realizó a 160◦ C durante 20 min (2000 rpm), y luego la mezcla se realizó a 180◦ C durante 40 min (4000 rpm). Penetración, punto de reblandecimiento, ductilidad (10◦ C), RV (120◦ C), DSR y BBR se realizaron en los aglutinantes modificados. Los investigadores fabricaron mezclas asfálticas diseñadas mediante el método Marshall y midieron en ellas la TSR, la DS, la resistencia a la flexión y la deformación por tracción a la flexión (ensayo de viga de flexión de tres puntos).	El ZnO aumentó la viscosidad, la rigidez, el PG a alta temperatura, la formación de surcos y la resistencia al envejecimiento del ligante asfáltico. La morfología de la partícula de ZnO no tuvo efecto sobre el punto de reblandecimiento, la ductilidad, la penetración, la capacidad antienvejecimiento o la capacidad a baja temperatura del ligante asfáltico. Tampoco tuvo ningún efecto sobre la estabilidad del agua de la mezcla asfáltica. Las partículas de ZnO podrían mejorar la estabilidad del DS y del agua de una mezcla asfáltica. Cuando la morfología del ZnO es similar a una varilla, las propiedades del ligante asfáltico y de la mezcla asfáltica son mejores. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 9)	Guo, G.; Zhang, H. 2022. (Ref.)

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts

Continuación Anexo 5.

Ref.	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Autor/Año
20	Usage of Nano-TiO2 or Nano-ZnO in asphalt to resist aging by NMR spectroscopy and rheology technology. (Di et al., 2023)	Evaluar el uso de Nano-TiO2o Nano-ZnO en asfalto para resistir el envejecimiento mediante espectroscopia de RMN y tecnología de reología.	Se modificó el AC utilizando nano-ZnO (4% en peso) y Nano-TiO2(4 peso%), con dos contenidos de cera diferentes, pero las propiedades físicasde los AC no están claras. Los investigadores muestran que las propiedades reológicas y el contenido de cera de ambos AC son sus propiedades principales. La modificación se realizó a 155◦ C y 5000 rpm durante 30 min usando un mezclador de alto cizallamiento. Se han realizado pruebas de espectroscopia LAS, MSCR y NMR en los aglutinantes modificados.	Ambos aditivos mejoraron la resistencia al envejecimiento, la formación de roderas y la fatiga del ligante, y el nano-ZnO tuvo una mayor influencia en la vida a fatiga del asfalto en comparación con el nano-TiO.2. El mecanismo antioxidante del nano-TiO.2es inhibir la pérdida de carbono aromático, mientras que la oxidación de un aglutinante modificado con nano-ZnO provoca una aromatización suficiente para compensar la influencia de los diferentes grados de envejecimiento. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 9)	Di, H.; Zhang, H.; Yang, E.; Ding, H.; Liu, H.; Huang, B.; Qiu.Y. 2023. (Ref.)
21	Study on anti-aging performance enhancement of polymer modified asphalt with high linear SBS content. (Han et al.,2023)	Evaluar la mejora del rendimiento antienvejecimiento del asfalto modificado con polímeros con alto contenido de SBS lineal.	Se modificó inicialmente un AC 70 dmm (PG 64-16) con un alto contenido de elastómero lineal SBS 791-H (6,5% en peso) mezclándolos a 185◦ C durante 35 min a una velocidad de 5000 rpm. Este aglutinante de SBS se modificó luego con nano-ZnO, nano-TiO2y nano-SiO2 para intentar mejorar su rendimiento anti-envejecimiento. El contenido de todos los agentes antienvejecimiento fue del 2% en peso. Se realizaron pruebas de reología (DSR), FMI y pruebas de espectroscopia infrarroja en los aglutinantes modificados.	Las nanopartículas no mostraron efectos significativos sobre la formación de surcos, la fatiga o la resistencia al envejecimiento del aglutinante modificado con SBS. Esto se debió principalmente a la débil interacción física entre las nanopartículas y el SBS. Además, no se observó ninguna reacción química obvia. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 9)	Han, D.; Hu, G.; Zhang, J. 2023. (Ref.)

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts

Continuación Anexo 5.

Ref.	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Autor/Año
22	Evaluation of the rheological behavior and the development of performance equations of asphalt composites produced with titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles. (Staub de Melo et al., 2023)	Evaluar el comportamiento reológico y desarrollo de ecuaciones de rendimiento de compuestos asfálticos producidos con nanopartículas de dióxido de titanio y óxido de zinc.	Se modificó un AC 60 dmm (PG 58) con ZnO (3, 6, 9, 12 y 15% en peso). La modificación se realizó a una temperatura de 150±5◦ C usando una mezcla de alto cizallamiento a una velocidad de 6000 rpm durante 15 min. Se utilizó un DSR para medir el PG a altas temperaturas, luego utilizó el índice de envejecimiento (AI) y pruebas de cumplimiento de fluencia no recuperables, así como LAS (20◦ C) pruebas.	El ZnO aumentó la rigidez, el PG a alta temperatura, la formación de surcos y la resistencia al envejecimiento del ligante asfáltico. La resistencia a la fatiga aumentó con ZnO en amplitudes de deformación bajas, pero disminuyó en amplitudes de deformación altas. (Rondón-Quintana et al., 2023, p. 9)	Staub de Melo, J.V.; Manfro, A.L.; Barra, B.S.; Dell'Antonio Cadorin, N.; Borba Broering, W. 2023. (Ref.)

Nota: Adaptado de Rondón-Quintana et al., 2023. The Use of Zinc Oxide in Asphalts