

Susana Torres
González

**Reducción de la deformación permanente y agrietamiento
por fatiga en pavimentos asfálticos utilizando un mineral
carbonatado.**

2025



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**Reducción de la deformación permanente y
agrietamiento por fatiga en pavimentos asfálticos
utilizando un mineral carbonatado.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestra en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Susana Torres González

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

Querétaro, Qro., a 27 de noviembre de 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad.

Reducción de la deformación permanente y agrietamiento por fatiga en pavimentos asfálticos utilizando un mineral carbonatado

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestra en Ingeniería de Vías de Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Susana Torres González

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

Dra. Teresa López Lara

Presidente

Firma

Dr. Ricardo Montoya Zamora

Secretario

Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Vocal

Firma

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Suplente

Firma

Dra. Marina Vega González

Suplente

Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Directora de la Facultad

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
27 de noviembre de 2025

RESUMEN

La deformación permanente por rodera y el agrietamiento por fatiga son dos de las fallas más comunes en los pavimentos asfálticos, que afectan su durabilidad y la seguridad del usuario. Ante la escasez de agregados pétreos vírgenes que cumplan con las especificaciones de calidad, se ha incrementado el interés por materiales alternativos que mantengan o mejoren el desempeño de las mezclas asfálticas. En este contexto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de un mineral carbonatado, identificado como calcita, como sustituto parcial del agregado pétreo virgen en mezclas asfálticas tipo Superpave. Se desarrollaron tres diseños: una mezcla base convencional (MB) y dos mezclas modificadas con 10 % (MC10) y 20 % (MC20) de reemplazo. La metodología incluyó la caracterización de materiales, el diseño volumétrico y la evaluación del desempeño mediante los ensayos de Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324) y de agrietamiento IDEAL-CT (ASTM D8225-19).

Los resultados mostraron que la incorporación del mineral aumentó ligeramente el contenido óptimo de asfalto y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA), alcanzando 76.8 % y 76.9 % en MC10 y MC20, respectivamente. Todas las mezclas cumplieron con el límite de deformación de 10 mm a 20 000 pasadas. Aunque la sustitución parcial con calcita no redujo la deformación permanente, mejoró la retención del ligante y representa una alternativa técnica viable y sostenible para disminuir el uso de agregados vírgenes.

Palabras clave: agrietamiento, deformación permanente, mezclas asfálticas, calcita, mineral carbonatado.

SUMMARY

Permanent rutting and fatigue cracking are two of the most common failures in asphalt pavements, affecting their durability and user safety. Given the shortage of virgin aggregates that meet quality specifications, there has been increasing interest in alternative materials that maintain or improve the performance of asphalt mixtures. In this context, the objective of this research was to evaluate the effect of a carbonate mineral, identified as calcite, as a partial substitute for virgin aggregates in Superpave-type asphalt mixtures. Three designs were developed: a conventional base mix (BM) and two modified mixtures with 10% (MC10) and 20% (MC20) replacement. The methodology included material characterization, volumetric design, and performance evaluation using the Hamburg Wheel Loading Test (AASHTO T 324) and IDEAL-CT cracking tests (ASTM D8225-19).

The results showed that the incorporation of the mineral slightly increased the optimal asphalt content and the percentage of asphalt-filled voids (AFV), reaching 76.8% and 76.9% in MC10 and MC20, respectively. All mixtures met the 10 mm deformation limit at 20,000 passes. Although partial replacement with calcite did not reduce permanent deformation, it improved binder retention and represents a viable and sustainable technical alternative to reduce the use of virgin aggregates.

(Key words: asphalt mixtures, calcite, carbonated mineral, cracking, permanent deformation)

DEDICATORIA

A mi madre, mi familia y
mi esposo, por su amor
y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente, gracias a Dios por permitirme tener vida y fortaleza para alcanzar este logro.

A mi amada madre, por ser mi ejemplo de fortaleza, amor incondicional y perseverancia; por enseñarme que con esfuerzo, fe y dedicación todo es posible.

A mi amado esposo, Etzael, mi compañero de vida, gracias por tu apoyo incondicional, tu paciencia y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Gracias por ser mi mayor fuente de motivación.

A mis amados hermanos y hermanas, por su apoyo y amor incondicional.

A mis amigas, amigos y compañeros de maestría: Anahí, Gennys, Orli, Larianny, Lili, Ana, Miguel y Agustín, por coincidir en esta etapa y por los recuerdos en común que siempre atesoraré.

A la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Facultad de Ingeniería, por brindarme las herramientas y el acompañamiento necesario para el desarrollo de este trabajo.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, antes CONAHCYT), por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de posgrado.

A mi directora de tesis, Dra. Teresa López Lara, por su guía, paciencia y valiosas aportaciones durante todo el proceso.

Al coordinador del programa, Dr. Ricardo Montoya, por su acompañamiento y apoyo constante en cada etapa de esta investigación.

A la empresa CEVITER, por facilitar sus instalaciones para el desarrollo de esta investigación, y de manera especial al M.I. Alejandro Castellanos, por su invaluable orientación y apoyo durante todo el proceso.

Al Instituto de Geociencias de la UNAM, campus Juriquilla, por permitirme realizar la caracterización del mineral carbonatado en sus equipos; en especial a la Dra. Marina Vega, por su orientación, asesoría y disposición durante esta parte fundamental del proyecto.

Tabla de Contenido	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 GENERALIDADES	11
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	12
1.3 JUSTIFICACIÓN	13
1.4 HIPÓTESIS	15
1.5 OBJETIVOS	15
1.5.1 <i>Objetivo General</i>	15
1.5.2 <i>Objetivos Particulares</i>	15
2. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES.....	16
2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS	16
2.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.....	18
2.3 DISEÑO DE MEZCLAS ENFOCADO AL DESEMPEÑO	19
2.4 DEFORMACIÓN PERMANENTE EN PAVIMENTOS	20
2.5 AGRIETAMIENTO POR FATIGA EN PAVIMENTOS	21
2.6 SUSTITUCIÓN DE AGREGADO PÉTREO VIRGEN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	22
2.7 USO DEL CARBONATO DE CALCIO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	23
2.8 AGREGADOS PÉTREOS	26
2.9 CEMENTO ASFÁLTICO	27
2.10 DIFRACCIÓN DE RAYOS X	27
2.11 LEY DE BRAGG	28
3. METODOLOGÍA.....	28
3.1 FASE I. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	30
3.1.1 <i>Búsqueda y recolección de materiales</i>	30
3.1.2 <i>Caracterización de los materiales</i>	34
3.2 FASE II. DISEÑOS VOLUMÉTRICOS	47
3.2.1 <i>Selección de la estructura granulométrica de diseño</i>	47
3.2.2 <i>Diseños volumétricos</i>	49

3.3	FASE III. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS	55
3.3.1	<i>Resistencia a la deformación permanente</i>	56
3.3.2	<i>Resistencia al agrietamiento</i>	58
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.1	SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	62
4.1.1	<i>Agregados pétreos</i>	62
4.1.2	<i>Cemento asfáltico</i>	65
4.1.3	<i>Mineral carbonatado</i>	66
4.2	DISEÑOS VOLUMÉTRICOS.....	69
4.2.1	<i>Mezcla base (MB)</i>	70
4.2.2	<i>Mezcla con 10% de sustitución (MC10)</i>	74
4.2.3	<i>Mezcla con 20% de sustitución (MC 20)</i>	79
4.3	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS	85
4.3.1	<i>Resistencia a la deformación permanente</i>	86
4.3.2	<i>Resistencia al agrietamiento</i>	89
4.3.3	<i>Aplicaciones potenciales del material desarrollado</i>	93
4.4	COMPARACIÓN DE INVESTIGACIÓN DE MÉXICO Y DE COLOMBIA.....	95
5.	CONCLUSIONES	98
6.	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....	100
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	100

Índice de Tablas	Pág.
Tabla 1 Ensayos para caracterización del agregado pétreo. Fuente: Elaboración propia con base en normas ASTM, N-CMT y AMAAC.....	36
Tabla 2 Ensayos para caracterización del cemento asfáltico. Fuente: Elaboración propia con base en normas ASTM y SCT.....	42
Tabla 3 Puntos de control Superpave para tamaño nominal de 19.0 mm, (FHWA, 2011).....	48
Tabla 4 Temperaturas de mezclado y compactación.....	51
Tabla 5 Parámetros de compactación utilizados.....	51
Tabla 6 Niveles de esfuerzo de compactación Superpave	52
Tabla 7 Condiciones de ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo	58
Tabla 8 Condiciones de ensayo para la determinación del CTIndex (ASTM D8225-19).....	60
Tabla 9 Composición granulométrica del agregado pétreo.....	62
Tabla 10 Resultados de las propiedades físicas de los agregados pétreos	64
Tabla 11 Resultados de caracterización del cemento asfáltico	66
Tabla 12 Granulometría de mineral carbonatado.....	67
Tabla 13 Composición granulométrica de la mezcla base (MB)	70
Tabla 14 Diseño volumétrico MB	72
Tabla 15 Propiedades volumétricas respecto a contenido de asfalto óptimo de MB	74

Tabla 16 Composición granulométrica de la mezcla MC10	75
Tabla 17 Diseño volumétrico MC 10	76
Tabla 18 Propiedades volumétricas respecto a contenido de asfalto óptimo de MC 10	78
Tabla 19 Composición granulométrica de la mezcla MC20	79
Tabla 20 Diseño volumétrico MC 20	81
Tabla 21 Propiedades volumétricas respecto al contenido de asfalto óptimo de la mezcla MC20	83
Tabla 22 Resultados de resistencia a la deformación permanente.....	86
Tabla 23 Resultados de resistencia al agrietamiento.....	90

Índice de Figuras	Pág.
Figura 1 Estructura típica de un pavimento rígido.....	17
Figura 2 Estructura típica de un pavimento flexible	18
Figura 3 Diagrama de metodología.....	30
Figura 4 Ubicación de muestreo de agregados pétreos	32
Figura 5 Muestreo de los materiales pétreos en banco	32
Figura 6 Muestra de cemento asfáltico PG 76V-22	33
Figura 7 Ubicación del banco de mineral carbonatado.	34
Figura 8 Muestra de calcita tipo G.1-3 (Grava 1-3) suministrada por CALIMEXICANA.....	34

Figura 9 Agregados pétreos (fracción gruesa y fracción fina).....	36
Figura 10 Juego de Tamices para granulometrías.....	37
Figura 11 Calibrador de partículas planas	39
Figura 12 Densidad y Absorción del agregado fino	40
Figura 13 Ensayo de punto de reblandecimiento.....	43
Figura 14 Preparación de muestra para DRX	46
Figura 15 Muestra de mezcla para Gmm.....	50
Figura 16 Espécimen para Gmb	52
Figura 17 Dosificación de Agregados pétreos y Calcita.....	55
Figura 18 Muestra ensayada en equipo de Rueda Cargada de Hamburgo	57
Figura 19 Ensayo de Ideal CT	59
Figura 20 Carga registrada (P) versus desplazamiento de línea de carga (l). Fuente: Adaptado de ASTM D8225-19	61
Figura 21 Granulometría de agregado pétreo	63
Figura 22 Granulometría de mineral carbonatado	68
Figura 23 Difractograma de mineral carbonatado FC25-030 S1	69
Figura 24 Curva de distribución granulométrica de la mezcla base (MB)	71
Figura 25 Propiedades volumétricas de diseño Superpave para la mezcla base (MB)	73
Figura 26 Curva granulométrica comparativa de las mezclas MB y MC10	75

Figura 27 Gráficas de propiedades volumétricas de diseño MC 10	77
Figura 28 Curva granulométrica comparativa de las mezclas MB y MC20	80
Figura 29 Propiedades volumétricas de diseño Superpave para la mezcla MC20	82
Figura 30 Determinación comparativa del Pb-óptimo (curvas Va–Pb).....	84
Figura 31 Variación del contenido óptimo de cemento asfáltico entre mezclas	85
Figura 32 Deformación permanente promedio a las 20,000 pasadas de MB, MC 10 Y MC 20.....	87
Figura 33 Comparación de la deformación permanente promedio a 20 000 pasadas para MB, MC10 y MC20.	88
Figura 34 Curvas carga-desplazamiento del ensayo IDEAL-CT para las mezclas MB, MC10 y MC20.....	91
Figura 35 Valores de resistencia al agrietamiento para MB, MC10 Y MC20	92
Figura 36 Variación del contenido óptimo de cemento asfáltico con la incorporación de calcita (M0, M1 y M2).....	97

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Los pavimentos asfálticos presentan problemas recurrentes de deformación permanente por rodera y agrietamiento por fatiga, ambos provocados por cargas repetidas y condiciones térmicas adversas. Estos deterioros comprometen la durabilidad, funcionalidad y seguridad de las vías, por lo que resulta esencial diseñar mezclas asfálticas resistentes para que cumplan con el periodo de diseño del pavimento.

Las mezclas asfálticas en caliente están compuestas principalmente por agregados pétreos vírgenes y cemento asfáltico. Sin embargo, los agregados vírgenes son recursos no renovables cuya obtención implica explotación de bancos, consumo energético y afectación ambiental. En los últimos años se ha registrado una creciente escasez de materiales pétreos que cumplan con los requisitos de calidad establecidos en la normativa vigente, lo cual ha impulsado la investigación de materiales alternativos que puedan emplearse sin comprometer la resistencia ni la durabilidad del pavimento.

Diversos estudios han demostrado que los materiales con presencia de carbonato de calcio mejoran la adhesión entre el ligante y los agregados, incrementando la cohesión interna y la resistencia frente a la fatiga y la deformación. El desarrollo de mezclas asfálticas modificadas con minerales carbonatados contribuye así al diseño de pavimentos más duraderos, sostenibles y acordes con las estrategias internacionales de reducción de impacto ambiental y eficiencia energética promovidas por organismos como la FHWA, AMAAC e IMT.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La deformación permanente y el agrietamiento por fatiga constituyen las principales formas de falla en los pavimentos flexibles, afectando su capacidad estructural y la seguridad del tránsito. El ahuellamiento, asociado a la repetición de cargas sobre el pavimento, se manifiesta como surcos longitudinales que favorecen el hidroplaneo y reducen la estabilidad vehicular (Leiva *et al.*, 2017). Este tipo de deterioro puede originarse por deficiencias en el diseño de la mezcla, uso de materiales inadecuados o falta de control en la compactación, y puede afectar incluso las capas estructurales inferiores del pavimento. Según Fonseca (2000), la presencia de estas deformaciones suele estar vinculada al empleo de materiales con baja resistencia al corte o a un diseño que no considera adecuadamente las condiciones de carga y temperatura.

A esta problemática se suma la limitada disponibilidad de agregados pétreos de calidad en diversas regiones del país, lo cual genera mayores costos de transporte, incremento en las emisiones contaminantes y dependencia de materiales no renovables (Rondón *et al.*, 2018; Arulrajah *et al.*, 2014). Además, la explotación de bancos naturales provoca impactos ambientales asociados a la erosión, deforestación y degradación del suelo, lo que refuerza la necesidad de emplear materiales alternativos que reduzcan la huella ecológica y favorezcan prácticas constructivas más sostenibles en la ingeniería vial.

En este sentido, la incorporación de un mineral carbonatado como sustituto parcial de los agregados vírgenes representa una alternativa viable para optimizar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas, aprovechando materiales locales y contribuyendo a una infraestructura vial más eficiente y ambientalmente responsable. Su aplicación se alinea con las estrategias de sostenibilidad promovidas por la Federal Highway Administration (FHWA, 2022) y la Asociación

Mexicana del Asfalto (AMAAC, 2023), orientadas al desarrollo de mezclas de alto desempeño con menor impacto ambiental.

El carbonato de calcio, empleado como filler mineral o componente activo dentro de la mezcla, ha demostrado mejorar la adherencia entre el ligante asfáltico y los agregados, lo que se traduce en mayor durabilidad y resistencia frente a cargas repetidas (Chen *et al.*, 2020; Manfro *et al.*, 2022; Yarahmadi *et al.*, 2023). Estas propiedades contribuyen a reducir la necesidad de mantenimiento y a prolongar la vida útil del pavimento, favoreciendo una infraestructura más confiable y con menor demanda de recursos.

Finalmente, esta investigación se encuentra alineada con los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), en los ejes de energía y cambio climático. El estudio promueve la utilización eficiente de los recursos disponibles y la disminución del uso de materiales no renovables, con el propósito de reducir el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a las actividades de construcción y operación de la infraestructura carretera.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El diseño de mezclas asfálticas con alta resistencia a la deformación permanente y al agrietamiento por fatiga es fundamental para prolongar la vida útil de los pavimentos y reducir los costos de conservación. Sin embargo, uno de los principales retos actuales en la ingeniería vial es la disponibilidad limitada de agregados pétreos vírgenes que cumplan con las propiedades físicas requeridas, sumado a su carácter no renovable y al impacto ambiental derivado de su explotación y transporte. En consecuencia, resulta necesario incorporar materiales alternativos que garanticen el desempeño estructural y, al mismo tiempo, contribuyan a la sostenibilidad del proceso constructivo.

El carbonato de calcio (CaCO_3) es uno de los minerales más abundantes y accesibles, lo que lo convierte en una opción viable para su incorporación en mezclas asfálticas. Desde el punto de vista químico, sus partículas presentan una carga superficial predominantemente positiva, lo que favorece la adherencia con el ligante asfáltico, de naturaleza ligeramente ácida (Sebaaly *et al.*, 2003). Este comportamiento se explica a partir del modelo ácido-base de Lewis, según el cual los materiales con carga electropositiva mejoran la unión adhesiva entre el agregado y el asfalto, reduciendo el riesgo de desprendimiento y el daño por humedad (Si *et al.*, 2002).

De Leeuw y Parker (1998) demostraron, mediante simulaciones atomísticas, que las superficies cristalinas de la calcita presentan una estructura estable y reactiva que favorece la interacción con compuestos orgánicos, lo cual refuerza su potencial como agente de mejora en mezclas asfálticas. De igual forma, investigaciones recientes (Chen *et al.*, 2020; Yarahmadi *et al.*, 2023) han confirmado que la presencia de carbonato de calcio incrementa la cohesión interna y la retención del ligante, generando mezclas más resistentes a la deformación y a la fatiga.

No obstante, la mayoría de los estudios se ha concentrado en el uso del carbonato de calcio como filler o nanorrelleno, existiendo un vacío de conocimiento en cuanto a su aplicación como sustituto parcial de agregados pétreos con tamaño superior a 0.075 mm. Explorar esta aplicación permite ampliar la comprensión del comportamiento mecánico de las mezclas modificadas y aprovechar materiales locales de origen calizo que, de otro modo, no se utilizarían en la pavimentación.

En este sentido, la presente investigación busca aportar evidencia experimental sobre la viabilidad técnica del uso de un mineral carbonatado (calcita) como sustituto parcial del agregado pétreo virgen en mezclas asfálticas tipo Superpave. La incorporación de este material no solo representa una alternativa técnica viable, sino

también una estrategia para promover prácticas constructivas sustentables, reducir la huella de carbono y optimizar el uso de recursos regionales.

La relevancia científica de este trabajo radica en su contribución al conocimiento sobre el comportamiento volumétrico y mecánico de mezclas asfálticas modificadas con minerales carbonatados, mientras que su relevancia social se vincula con la mejora de la durabilidad de los pavimentos y la disminución del impacto ambiental asociado a la construcción de infraestructura vial en México.

1.4 HIPÓTESIS

El uso de un mineral carbonatado en una mezcla asfáltica en caliente reducirá entre 15 y 20 % la deformación permanente y el agrietamiento por fatiga, en comparación de una mezcla asfáltica convencional.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Diseñar una mezcla asfáltica en caliente con un mineral carbonatado para identificar el incremento en sus propiedades mecánicas ante deformación permanente y agrietamiento por fatiga, con respecto a una mezcla convencional.

1.5.2 Objetivos Particulares

- Determinar el efecto en las propiedades volumétricas de una mezcla asfáltica modificada con un mineral carbonatado respecto a una mezcla convencional.
- Analizar la influencia de la sustitución parcial de agregado pétreo virgen por un mineral carbonatado respecto a la deformación permanente.
- Evaluar la resistencia de una mezcla con sustitución parcial de agregado pétreo por un mineral carbonatado respecto al agrietamiento por fatiga.

2. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES

El desempeño de las mezclas asfálticas depende en gran medida de la calidad de sus componentes, entre ellos el ligante y los agregados pétreos, así como de la adecuada interacción entre ambos. En los últimos años, diversos estudios han explorado la incorporación de materiales alternativos y aditivos con el propósito de mejorar propiedades clave como la adherencia, la resistencia al agrietamiento y la deformación permanente.

El presente capítulo desarrolla la revisión de los antecedentes más relevantes sobre el comportamiento estructural de los pavimentos flexibles, la composición y diseño de las mezclas asfálticas mediante la metodología Superpave, y los mecanismos de falla que afectan su durabilidad. Asimismo, se analizan investigaciones previas sobre el uso de materiales carbonatados, particularmente aquellos que contienen carbonato de calcio (CaCO_3), y su aplicación como sustituto parcial de agregados pétreos en mezclas asfálticas en caliente.

Esta revisión permite contextualizar la problemática abordada en la tesis, identificar los avances científicos más relevantes y reconocer las áreas de oportunidad en torno a la sustitución de materiales pétreos, aportando así el sustento teórico necesario para el desarrollo experimental descrito en los capítulos posteriores.

2.1 Tipos de Pavimentos

Los pavimentos se clasifican en función del uso, las cargas de tránsito esperadas y las condiciones del subsuelo determinadas en la investigación geotécnica, es común considerar dos tipos de estructuras de pavimento principales:

Pavimentos rígidos: Los pavimentos rígidos están conformados por losas de concreto hidráulico, elaboradas a partir de una mezcla de cemento, agregados, agua y, en algunos casos, aditivos especiales. Este tipo de pavimento se caracteriza

por su capacidad para distribuir las cargas de manera uniforme sobre una superficie amplia, lo que reduce la concentración de esfuerzos sobre la subrasante.

Entre sus principales ventajas destacan su alta resistencia estructural, excelente desempeño ante cargas repetitivas, y una vida útil prolongada. Además, presentan una menor susceptibilidad a deformaciones plásticas o térmicas en comparación con los pavimentos flexibles. Sin embargo, su costo inicial es más elevado y las reparaciones, en caso de daño, pueden ser más complejas y requerir equipos y procedimientos especializados (Portland Cement Association, 2011).

Gracias a estas propiedades, los pavimentos rígidos son especialmente adecuados para zonas con tránsito pesado.

Un pavimento rígido se compone de diversas capas que actúan conjuntamente para soportar las cargas del tránsito. La capa superior es la losa de concreto hidráulico, que proporciona la capacidad estructural principal. Debajo de ella se encuentra la capa de base hidráulica, normalmente compuesta por material granular compactado, cuya función es distribuir esfuerzos adicionales y ofrecer soporte intermedio. Finalmente, en la parte inferior se localiza la subrasante, que es material de corte o de banco que cumple con ciertas especificaciones y previamente compactado. La Figura 1 muestra la estructura típica de este tipo de pavimento.



Figura 1 Estructura típica de un pavimento rígido

Pavimentos flexibles: El pavimento flexible es una estructura compuesta por varias capas superpuestas que trabajan en conjunto para soportar y distribuir las cargas generadas por el tránsito vehicular, además de resistir las condiciones ambientales predominantes durante su vida útil (SICT, 2024). Generalmente, está conformado por una carpeta asfáltica o capa de rodadura, que constituye la superficie de contacto con los vehículos; una base hidráulica, construida con materiales granulares en estado natural o estabilizados con cemento u otro aglutinante, una subbase granular, que mejora la capacidad estructural del sistema y una subrasante previamente compactada (Asphalt Institute, 2007), en la Figura 2 se muestra la estructura típica de este tipo de pavimentos.



Figura 2 Estructura típica de un pavimento flexible

2.2 Mezclas asfálticas en caliente

El elemento principal de un pavimento flexible es su capa superficial, fabricada con mezclas asfálticas (materiales bituminosos), que proporciona resistencia al desgaste, impermeabilidad y una superficie adecuada para el tránsito vehicular. Debajo de esta capa, se encuentran otras capas granulares que actúan como soporte estructural y distribuyen las cargas hacia la subrasante (Asphalt Institute, 2007).

2.3 Diseño de mezclas enfocado al desempeño

Desde mediados del siglo XIX, la búsqueda por desarrollar mezclas asfálticas con alto desempeño ha impulsado avances significativos tanto en su formulación como en sus métodos de evaluación. Esta evolución se intensificó a partir de la década de 1990, cuando la investigación comenzó a enfocarse en la optimización del ligante, la distribución y forma de los agregados, las condiciones de compactación en laboratorio y el comportamiento de las mezclas bajo condiciones reales de servicio. Durante este periodo, las pruebas de desempeño fueron progresivamente complementadas por pruebas volumétricas, debido a su simplicidad y utilidad para establecer proporciones óptimas en el diseño (Roberts *et al.*, 1996). Un punto de inflexión fue la creación del Strategic Highway Research Program (SHRP) en 1987, impulsado por el Congreso de los Estados Unidos con una inversión de 150 millones de dólares, que permitió el desarrollo del sistema Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement), orientado a especificar con mayor precisión tanto el ligante como los agregados y a mejorar la formulación de mezclas con un enfoque técnico más riguroso (Garnica *et al.*, 2005a). Este sistema fue diseñado con tres niveles: el Nivel 1, basado en propiedades volumétricas para pavimentos de bajo tráfico; el Nivel 2, que incorpora algunas pruebas de desempeño para tráfico moderado; y el Nivel 3, que añade ensayos avanzados para carreteras sometidas a condiciones severas (Meroni *et al.*, 2021).

A pesar de sus limitaciones, el sistema Superpave logró avances importantes, como la reducción del ahuellamiento mediante el uso de agregados angulares, ligantes modificados y mayores esfuerzos de compactación (Walker *et al.*, 1998). No obstante, con la mitigación del ahuellamiento surgió un nuevo desafío: el agrietamiento, hoy considerado la principal forma de falla en pavimentos asfálticos (NCAT, 2021a). Este tipo de deterioro se atribuye a factores como la falta de rehabilitación estructural adecuada, problemas constructivos y deficiencias en los

diseños de mezcla (West *et al.*, 2018). Aunque diversas agencias estatales han modificado las especificaciones Superpave para mejorar la durabilidad, los ajustes no han sido suficientes para abordar problemas estructurales más profundos. En este contexto, el diseño de mezclas basado en el desempeño ha cobrado relevancia como una alternativa más robusta. A diferencia de los métodos tradicionales centrados únicamente en propiedades volumétricas, este enfoque incorpora ensayos que simulan condiciones reales de servicio y permiten evaluar la resistencia al agrietamiento, la deformación permanente (ahuellamiento) y el daño por humedad (León *et al.*, 2023). Fonseca (2000) destaca que, al considerar el comportamiento frente a deformaciones plásticas, se obtienen mezclas más resistentes y duraderas, que requieren menos mantenimiento y brindan mayor seguridad vial. Un ejemplo reciente del éxito de este enfoque es la implementación del diseño por desempeño en Estados Unidos bajo el sistema Superpave, que ha demostrado mejoras notables en la durabilidad de los pavimentos frente a climas extremos y cargas pesadas (FHWA, 2022). Además, los vacíos llenos de asfalto (VFA) que se ve fuertemente influenciados por la gravedad específica del agregado (Gsb), que puede variar considerablemente debido a factores geológicos y operativos, afectando así la precisión del diseño (NCHRP 20-07, 2018; Newcomb y Zhou, 2018).

2.4 Deformación permanente en pavimentos

La deformación permanente en la carpeta asfáltica constituye uno de los modos de falla más críticos en el desempeño de los pavimentos flexibles. Joumblat *et al.* (2023) destacan que esta se origina principalmente por la acumulación progresiva de deformaciones plásticas irreversibles dentro de la mezcla bituminosa cuando el material es sometido a cargas repetidas y temperaturas elevadas, lo que conduce a la pérdida gradual de estabilidad estructural. Este fenómeno se asocia con una baja resistencia al corte y una insuficiente rigidez de la mezcla, condiciones que

favorecen el flujo plástico lateral en las zonas de mayor esfuerzo de contacto neumático, generando surcos longitudinales o ruts en la superficie del pavimento.

Asimismo, diversos estudios han mostrado que la magnitud de la deformación permanente en la capa asfáltica depende de factores como el tipo de ligante, el contenido de vacíos, el tamaño y la angularidad del agregado, así como de las condiciones de carga y temperatura (Sousa *et al.*, 1991; Joumblat *et al.*, 2023). En este contexto, la evaluación del comportamiento viscoelasto-plástico de las mezclas asfálticas mediante ensayos como el Repeated Load Test (RLT) o el Hamburg Wheel Tracking Test resulta esencial para predecir la susceptibilidad al rutting y garantizar la durabilidad de la estructura de pavimento.

2.5 Agrietamiento por fatiga en pavimentos

En el ámbito de la ingeniería vial, la fatiga de pavimentos se refiere al deterioro progresivo de las mezclas asfálticas causado por la aplicación repetida de cargas dinámicas, que genera fisuración y pérdida de capacidad estructural aun cuando las tensiones aplicadas sean significativamente inferiores a la resistencia máxima del material. Este fenómeno se evalúa comúnmente mediante ensayos de laboratorio, donde la rotura de la probeta se define cuando su rigidez se reduce al 50 % de su valor inicial, siguiendo el criterio clásico de caracterización del comportamiento a fatiga (Valdés *et al.*, 2012)

El uso del ensayo IDEAL-CT (Indirect Tensile Asphalt Cracking Test) para evaluar el agrietamiento en mezclas asfálticas se considera altamente recomendable frente al tradicional ensayo de Viga a Cuatro Puntos, principalmente debido a su mayor eficiencia operativa, la simplicidad en la preparación de las muestras, la amplia disponibilidad del equipo necesario y el menor tiempo requerido para la ejecución del ensayo.

A diferencia del método de Viga a Cuatro Puntos, que implica procedimientos más complejos y un mayor consumo de recursos, el ensayo IDEAL-CT permite evaluar de forma directa la resistencia de la mezcla al agrietamiento mediante la aplicación de carga en compresión indirecta a una probeta cilíndrica, registrando el desplazamiento y la carga hasta la rotura.

De acuerdo con Zhou *et al.* (2017), los resultados obtenidos mediante el IDEAL-CT muestran alta correlación con el desempeño frente a agrietamiento por fatiga, fisuración por reflexión y fisuración térmica observados en pavimentos en servicio. Esto convierte al IDEAL-CT en una herramienta confiable no solo para la evaluación de laboratorio, sino también como predictor del comportamiento a largo plazo de los pavimentos flexibles bajo condiciones reales de operación.

2.6 Sustitución de agregado pétreo virgen en mezclas asfálticas

El uso de materiales alternativos en sustitución del agregado virgen en la construcción de pavimentos presenta múltiples beneficios económicos, ambientales y sociales. En primer lugar, permite una reducción de costos, ya que la extracción y procesamiento de agregados vírgenes implican elevados gastos económicos y consumo energético, mientras que los materiales reciclados pueden reducir significativamente los costos de producción. En segundo lugar, contribuye a disminuir el impacto ambiental, pues la explotación de canteras genera efectos negativos como la deforestación, la erosión del suelo y la contaminación de cuerpos de agua; al emplear materiales alternativos, se mitigan estos impactos (B. Huang, Shu, y Burdette., 2007). Finalmente, favorece una mejor gestión de residuos, al reutilizar subproductos industriales y de la construcción, como escorias de acería, cenizas volantes y residuos de demolición, promoviendo así un enfoque de economía circular y sostenible (Arulrajah *et al.*, 2014)

Diversos materiales han sido estudiados como sustitutos del agregado pétreo virgen en mezclas asfálticas, destacando por sus beneficios tanto técnicos como ambientales. La escoria de alto horno presenta propiedades similares al agregado tradicional y mejora la resistencia mecánica y durabilidad de la mezcla gracias a su alta densidad y textura rugosa (Ahmedzade y Sengoz, 2009). Las cenizas volantes generadas en procesos de combustión e incineración controlada han mostrado un comportamiento eficaz como relleno mineral en mezclas asfálticas, mejorando la resistencia al agrietamiento térmico y la deformación permanente gracias a su elevada superficie específica, que favorece la adhesión con el ligante asfáltico. Estudios recientes demostraron que su incorporación en proporciones óptimas puede igualar o superar el desempeño de los rellenos minerales convencionales sin implicaciones ambientales significativas (Chowdhury *et al.*, 2023). Los residuos de construcción y demolición (RCD), como concreto triturado, ladrillos y cerámica, pueden emplearse como reemplazo parcial del agregado pétreo, con propiedades mecánicas aceptables, aunque variables, dependiendo de la calidad y el tratamiento del material (Jiménez *et al.*, 2012). Por último, el plástico reciclado, ya sea en forma de fibras, gránulos o polvo, se ha empleado como modificador en mezclas asfálticas con el objetivo de mejorar la flexibilidad y la resistencia al agrietamiento del material. Su incorporación puede aumentar la estabilidad térmica y la durabilidad del ligante, reduciendo la rigidez excesiva a bajas temperaturas. No obstante, el desempeño final depende del tipo de polímero y del método de incorporación, ya que una dispersión inadecuada o una incompatibilidad química entre el plástico y el asfalto pueden provocar problemas de adherencia y homogeneidad en la mezcla (You *et al.*, 2022). En conjunto, estos materiales alternativos no solo permiten reducir el uso de recursos naturales, sino que también promueven prácticas sostenibles en la construcción vial.

2.7 Uso del carbonato de calcio en mezclas asfálticas

El uso de materiales calizos como sustitutos de agregados pétreos en mezclas asfálticas ha despertado creciente interés debido a su abundancia, bajo costo y características favorables para la adhesión con el ligante asfáltico. Las rocas calizas, por su textura superficial y su composición química rica en carbonato de calcio, ofrecen buena compatibilidad con el asfalto, lo que se traduce en una mejora en la cohesión interna de la mezcla y en la resistencia al daño por humedad. Estudios han demostrado que, si bien los agregados calizos pueden presentar una menor resistencia al pulido frente al tránsito intenso en comparación con rocas silíceas, su uso en capas inferiores o en vías de bajo a medio volumen de tráfico resulta técnicamente viable y económicamente beneficioso (Wenglas-Lara *et al.*, 2024).

Es importante aclarar que el término material calizo se refiere generalmente a cualquier roca o agregado que contenga una proporción significativa de carbonato de calcio, como es el caso de la caliza, mientras que la calcita es un mineral específico (CaCO_3) que constituye el principal componente de la caliza. Así, aunque ambos comparten la misma base química, la calcita es una unidad cristalina pura, y la caliza es una roca compuesta, frecuentemente con impurezas y estructuras sedimentarias (Press y Siever, 2000; Tucker, 2001). Esta distinción es clave para comprender el comportamiento mecánico y la interacción química de los materiales calizos dentro de mezclas asfálticas, ya que sus propiedades físicas pueden variar en función de su origen geológico y grado de pureza.

En este sentido, se ha comprobado que el uso de carbonato de calcio en mezclas asfálticas mejora la adherencia entre el ligante y los agregados, además de contribuir al mejoramiento de sus propiedades mecánicas. Yarahmadi *et al.* (2023) demostraron que el uso de nano partículas de carbonato de calcio (Nano CaCO_3) en ligantes asfálticos mejora la resistencia al ahuellamiento y al daño por fatiga. Las

muestras modificadas mostraron un comportamiento superior en comparación con las no modificadas, tanto en rendimiento como en durabilidad.

De manera similar, Chen *et al.* (2020) evaluaron el uso de rellenos minerales, incluyendo el carbonato de calcio, concluyendo que estos desempeñan un papel clave en la adherencia entre el ligante asfáltico y los agregados minerales. Además, se observó que los rellenos minerales aumentan la rigidez del mortero asfáltico, lo que mejora la resistencia de la mezcla frente a la deformación permanente provocada por la acción de las cargas.

Por su parte, Moghadas *et al.* (2012) estudiaron el efecto del carbonato de calcio precipitado en mezclas asfálticas, encontrando que las mezclas modificadas presentaron menor susceptibilidad al ahuellamiento y mayor rigidez en comparación con mezclas convencionales. También observaron que los ligantes modificados eran menos sensibles a los cambios de temperatura, lo cual favorece un comportamiento más estable a lo largo del tiempo.

Josephia (2009) analizó el desempeño de agregados gruesos de origen calizo, es decir, roca sedimentaria con alto contenido de carbonato de calcio , señalando que estos presentan buenas propiedades mecánicas, lo que los convierte en materiales alternativos viables para el diseño de mezclas asfálticas. Asimismo, destacó sus propiedades químicas y su mayor resistencia a la desintegración por efectos climáticos, evaluada mediante el método de sulfato de sodio, lo cual garantiza una mayor durabilidad frente al intemperismo y la erosión.

La adherencia entre el agregado y el ligante asfáltico es una propiedad fundamental que afecta significativamente el desempeño de las mezclas. La falta de adherencia puede provocar desprendimiento del asfalto, daños por humedad y aparición de grietas superficiales (López *et al.*, 2017). En este contexto, la calidad del agregado y su compatibilidad química con el ligante adquieren especial relevancia.

2.8 Agregados pétreos

Los agregados pétreos son uno de los componentes fundamentales en la elaboración de mezclas asfálticas, ya que conforman alrededor del 95% del peso total de la mezcla. Su función principal es proporcionar resistencia estructural, estabilidad volumétrica y durabilidad al pavimento. Se definen como materiales granulares inertes y, de acuerdo a la solicitud de Superpave, deben ser 100% producto de trituración, utilizados en combinación con ligantes asfálticos para formar la mezcla final (Asphalt Institute, 2007).

Los agregados pétreos desempeñan un papel crucial en el desempeño de las mezclas asfálticas, ya que su tamaño, forma, textura y propiedades físicas determinan en gran medida la compactación, estabilidad y durabilidad del pavimento. La gradación, es decir, la distribución del tamaño de partículas influye directamente en el comportamiento mecánico de la mezcla: una gradación continua mejora la resistencia a la deformación permanente, mientras que una discontinua puede incrementar la susceptibilidad al agrietamiento (Roberts *et al.*, 1996). En cuanto a la forma y textura, los agregados angulares y de textura rugosa promueven una mayor interconexión mecánica, mejorando la resistencia al deslizamiento y la estabilidad estructural; además, las partículas de forma cúbica son preferidas, ya que se compactan de forma más eficiente en comparación con las alargadas o planas (Mamlouk y Zaniewski, 2011).

Asimismo, la resistencia al desgaste y a la fragmentación es vital para evitar la desintegración prematura del pavimento, y se evalúa mediante ensayos como Desgaste de Los Ángeles, entre otros (Asphalt Institute, 2007). Otros aspectos importantes son la absorción y la gravedad específica (G_{sb}), las cuales afectan directamente la cantidad de ligante necesario y la precisión del diseño volumétrico, especialmente en el cálculo de parámetros como el VMA y el Vbe (Meroni *et al.*, 2021). Finalmente, la compatibilidad entre el agregado y el ligante asfáltico es

esencial para garantizar una buena adherencia, minimizando el riesgo de daño por humedad o desprendimiento (stripping), lo cual se puede verificar mediante pruebas como el Tensile Strength Ratio (TSR) (NCAT, 2021b). Estos factores, en conjunto, determinan la calidad y el comportamiento a largo plazo de la mezcla asfáltica.

En Estados Unidos, la calidad de los agregados utilizados en mezclas asfálticas está regulada por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y la ASTM (American Society for Testing and Materials). En México, la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), el Instituto Mexicano del Transporte y la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC) publican especificaciones y recomendaciones técnicas que rigen los ensayos y parámetros de calidad de los agregados.

2.9 Cemento asfáltico

El grado de desempeño PG (Performance Grade) se refiere al comportamiento del ligante asfáltico bajo las condiciones climáticas y de carga esperadas. Este sistema considera temperaturas máximas y mínimas según el lugar de aplicación, así como el tráfico y velocidad de operación (SCT, 2018). El grado PG garantiza que el asfalto tenga un desempeño adecuado frente a la deformación, el agrietamiento por bajas temperaturas y la fatiga. En México, la normativa N·CMT·4·05·004/18 permite clasificar cualquier cemento asfáltico con base en su grado PG (González, 2024).

2.10 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X es una técnica analítica ampliamente utilizada para estudiar la estructura interna de materiales cristalinos. Su principio se basa en que la disposición ordenada de los átomos en un cristal actúa como una red de difracción para la radiación X, generando patrones característicos que dependen de la composición y la simetría cristalina. El análisis de estos patrones, conocidos como difractogramas, permite identificar fases minerales y estimar parámetros como el

tamaño de cristal o el grado de cristalinidad. La técnica es especialmente útil para la detección de minerales finamente cristalizados que no pueden identificarse de forma fiable mediante microscopía óptica (Pérez-Monserrat, 2000).

2.11 Ley de Bragg

La Ley de Bragg describe la condición necesaria para que ocurra la difracción de rayos X por una familia de planos reticulares dentro de un cristal. Establece que la interferencia constructiva se produce cuando la diferencia de camino óptico entre dos rayos reflejados por planos cristalinos adyacentes es un múltiplo entero de la longitud de onda de la radiación incidente, expresándose mediante la ecuación $n\lambda = 2d \cdot \text{sen}\theta$. En esta relación, n representa el orden de la difracción, λ la longitud de onda de la radiación, d la distancia entre planos y θ el ángulo de incidencia. Este principio constituye la base para interpretar los picos de un difractograma y, por ende, para la identificación de materiales cristalinos (Pérez-Monserrat, s. f.).

3. METODOLOGÍA

El presente capítulo describe la metodología empleada para el desarrollo del estudio, estructurada en tres fases principales que permiten una evaluación integral del comportamiento de mezclas asfálticas con distintos niveles de sustitución de material pétreo. El proceso metodológico se presenta de forma secuencial y lógica en la Figura 3 mediante un diagrama de flujo que guía desde la selección de materiales hasta el análisis de resultados.

En la Fase I, se lleva a cabo la selección de proveedores y la evaluación de la calidad de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas, tales como cemento asfáltico, agregados pétreos y mineral carbonatado. Esta etapa garantiza que todos los materiales cumplan con los requisitos establecidos antes de proceder a su utilización.

Una vez verificado el cumplimiento de los estándares, se avanza a la Fase II, donde se elaboran diseños volumétricos mediante el método Superpave para una mezcla base (MB), así como mezclas con un 10% y 20% de sustitución de material, denominadas MC 10 y MC 20, respectivamente.

En la Fase III, se desarrollan pruebas específicas para evaluar el desempeño mecánico de las mezclas: la resistencia a la deformación permanente y la resistencia al agrietamiento por fatiga. Los resultados obtenidos en esta fase son fundamentales para el análisis comparativo de las distintas formulaciones.

Finalmente, se realiza un análisis de resultados y se presentan las conclusiones que permiten determinar la viabilidad y eficiencia del uso de materiales sustituidos en mezclas asfálticas.

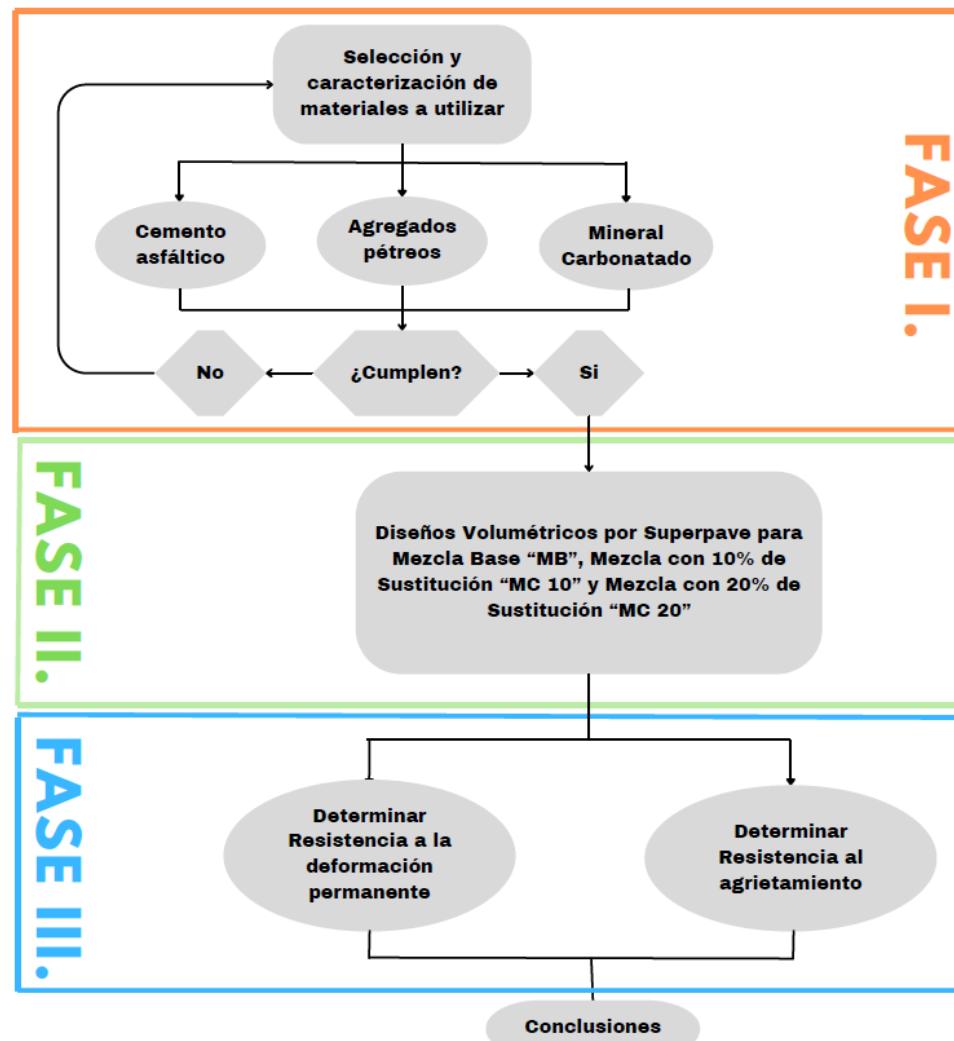


Figura 3 Diagrama de metodología

3.1 FASE I. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.1.1 Búsqueda y recolección de materiales

Como paso inicial de esta investigación, y con el objetivo de garantizar la calidad, confiabilidad y disponibilidad de los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto, se realizó la búsqueda y selección de proveedores que contaran con materiales potencialmente aptos para su incorporación en mezclas asfálticas.

Esta etapa fue fundamental, ya que la correcta elección de las fuentes de suministro permitió asegurar que los insumos cumplieran con las especificaciones técnicas establecidas por las normas aplicables, reduciendo así la variabilidad experimental y garantizando la uniformidad en las características de los materiales empleados.

De esta manera, se estableció una base sólida para las fases posteriores del estudio, asegurando la reproducibilidad de los resultados y fortaleciendo la validez del análisis de desempeño de las mezclas asfálticas.

Los materiales seleccionados para la investigación comprenden tres componentes principales: agregados pétreos, cemento asfáltico y mineral carbonatado (empleado como material de sustitución parcial del agregado). La procedencia de cada uno de ellos se describe a continuación.

a) Agregados pétreos

Los materiales pétreos se obtuvieron del banco “Construcarr km 273”, ubicado en la planta de asfaltos del km 240 de la Autopista Maravatío–Zapotlanejo, Michoacán (ver Figura 4).

En este banco se muestreó grava con tamaño nominal de 12.5 mm (1/2") y arena mezclada con polvo de trituración, identificándose como basalto vesicular (Ver Figura 5).

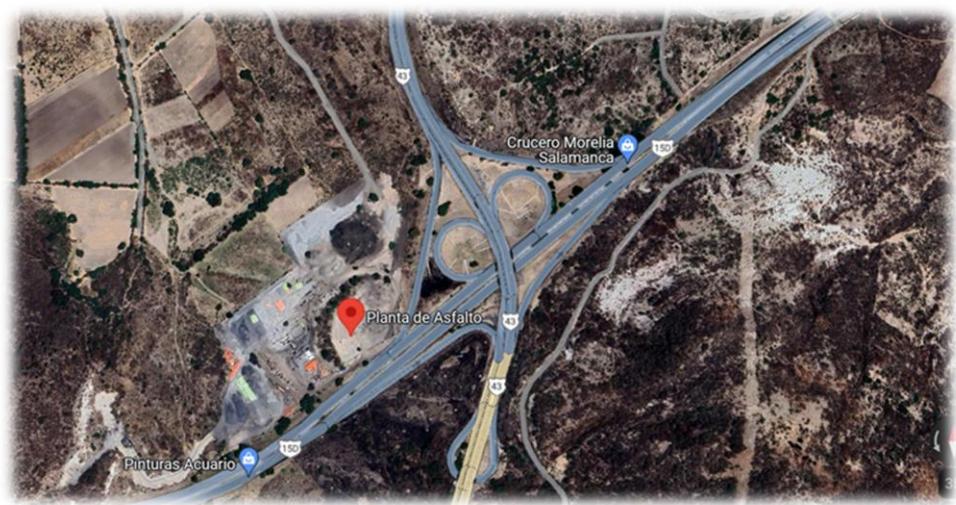


Figura 4 Ubicación de muestreo de agregados pétreos



Figura 5 Muestreo de los materiales pétreos en banco

b) Cemento asfáltico

El cemento asfáltico empleado fue suministrado por uno de los principales proveedores nacionales, quien proporcionó una muestra de asfalto modificado con

polímero tipo I SBS, clasificado por grado de desempeño como PG 76V-22 (Ver Figura 6), conforme a los lineamientos de la norma N-CMT-4-05-004/18.



Figura 6 Muestra de cemento asfáltico PG 76V-22

c) Mineral carbonatado

El mineral carbonatado utilizado proviene del banco de materiales ubicado en el km 74+800 de la Carretera San Juan del Río – Xilitla, en Vizarrón de Montes, Querétaro, distribuido por CALCIMEXICANA S.A. de C.V., bajo la designación G 1-3 (Ver Figura 7 y Figura 8).

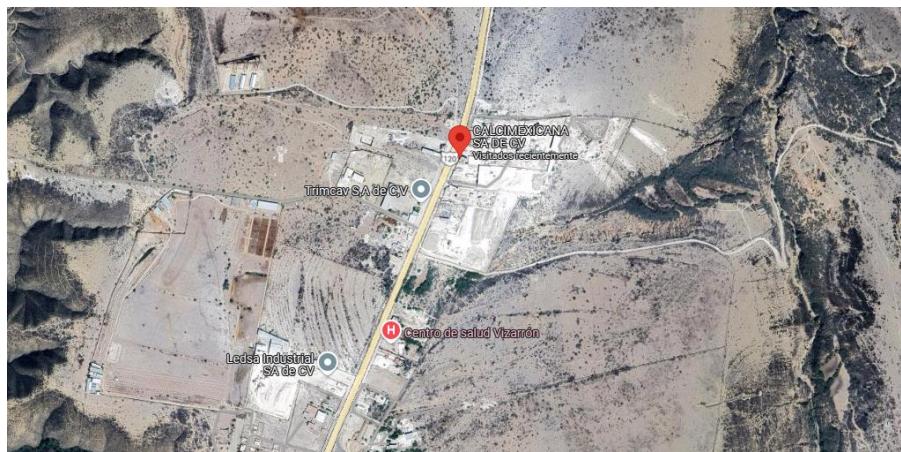


Figura 7 Ubicación del banco de mineral carbonatado.



Figura 8 Muestra de calcita tipo G.1-3 (Grava 1-3) suministrada por CALIMEXICANA.

3.1.2 Caracterización de los materiales

La caracterización de los materiales constituye una etapa esencial en la presente investigación, ya que permite conocer las propiedades físicas, químicas y mecánicas de cada componente antes de su incorporación a las mezclas asfálticas.

En esta investigación, los porcentajes asociados a la composición de materiales y a las propiedades determinadas por masa, incluyendo: sustitución parcial del

agregado pétreo por mineral carbonatado, granulometría, contenido óptimo de ligante, porcentajes de absorción y propiedades derivadas de la caracterización de agregados y del cemento asfáltico) se expresan en base masa/masa (m/m). Por otro lado, los parámetros volumétricos como vacíos de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos con asfalto (VFA), se expresan en porcentaje volumen/volumen (v/v), al derivarse del análisis geométrico de volúmenes y densidades de la mezcla compactada.

El propósito de esta fase es verificar que los materiales seleccionados cumplan con los criterios de calidad y desempeño establecidos en las normas nacionales e internacionales, garantizando así la reproducibilidad de los diseños y la confiabilidad de los resultados obtenidos en laboratorio.

Con base en el tipo de material y su función dentro de la mezcla, se aplicaron diferentes conjuntos de ensayos que permiten evaluar aspectos como la granulometría, densidad, absorción, adherencia y composición mineralógica.

3.1.2.1 Agregados pétreos

Los agregados pétreos se caracterizaron mediante un conjunto de ensayos orientados a determinar sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad, tanto de la fracción gruesa como de la fracción fina (Ver Figura 9) con el fin de asegurar su idoneidad para la elaboración de mezclas asfálticas bajo el método Superpave.

Estos ensayos se ejecutaron conforme a las normas ASTM y N-CMT vigentes, permitiendo verificar el cumplimiento de los límites especificados y establecer las bases para el cálculo de los parámetros volumétricos y de desempeño del material.

En la Tabla 1 se resumen las propiedades evaluadas y las normas aplicadas.

Tabla 1 Ensayos para caracterización del agregado pétreo. Fuente: Elaboración propia con base en normas ASTM, N-CMT y AMAAC.

Ensayo	Norma de referencia
<i>Agregado Grueso</i>	
Densidad del agregado grueso	ASTM C127
Absorción del agregado grueso	ASTM C127
Desgaste de Los Ángeles	ASTM C131
Desgaste Microdeval	ASTM D6928
Intemperismo acelerado	ASTM C88
Caras fracturadas	ASTM D5821
Partículas planas y alargadas	M-MMP-4-04-005/08
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	AMAAC RA-08
<i>Agregado Fino</i>	
Densidad del agregado fino	ASTM C128
Absorción del agregado fino	ASTM C128
Equivalente de Arena	ASTM D2419
Angularidad	ASTM C1252
Azul de metileno	AMAAC RA-05



Figura 9 Agregados pétreos (fracción gruesa y fracción fina)

a) Fracción gruesa

La fracción gruesa corresponde al material con tamaño de partículas mayores a 4.75 mm (No. 4), en este caso se trata de la grava identificada como basalto vesicular con tamaño nominal de 12.5 mm (1/2").

Se evaluaron las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad conforme a los lineamientos de las normas ASTM, N-CMT y AMAAC, con el propósito de verificar su conformidad con el método Superpave. A continuación se describen brevemente los ensayos realizados:

- **Granulometría (ASTM C136, 2006):** determinación de la distribución de tamaños mediante tamizado mecánico con tamices de 3/4", 1/2", 3/8", No. 4 (4.75 mm) y No. 8 (2.36 mm) (Ver Figura 10). Los resultados se representaron en la gráfica de potencia 0.45, utilizada en Superpave para verificar la gradación.



Figura 10 Juego de Tamices para granulometrías

- **Densidad y absorción (ASTM C127, 2015):** determinación de la densidad aparente, densidad relativa y absorción del agregado grueso, parámetros

necesarios para el cálculo del contenido óptimo de ligante y el control volumétrico de la mezcla.

- **Desgaste Los Ángeles (ASTM C131, 2020)**: evaluación de la resistencia del agregado a la abrasión e impacto en condiciones secas, expresada como porcentaje de pérdida de masa, para estimar la durabilidad frente a esfuerzos mecánicos.
- **Desgaste Micro-Deval (ASTM D6928, 2017a)**: determinación de la resistencia a la degradación en presencia de agua, identificando agregados susceptibles a desgaste húmedo o a pérdida de resistencia por saturación.
- **Intemperismo acelerado (ASTM C88, 2024)**: ensayo de durabilidad mediante ciclos de inmersión en sulfato de sodio y secado en horno, que permite estimar la pérdida de masa y la resistencia del material frente a la desintegración por cristalización de sales.
- **Caras fracturadas (ASTM D5821, 2017b)**: determinación del porcentaje de partículas con una o más caras angulares, asociadas con una mayor fricción interna y estabilidad de la mezcla.
- **Partículas planas y alargadas (N·CMT·4·04·005, SCT)**: cuantificación de partículas con geometría desfavorable (planas o alargadas) para prevenir fracturas y deslizamientos durante la compactación o el servicio, asegurando la estabilidad estructural del pavimento (Ver Figura 11).

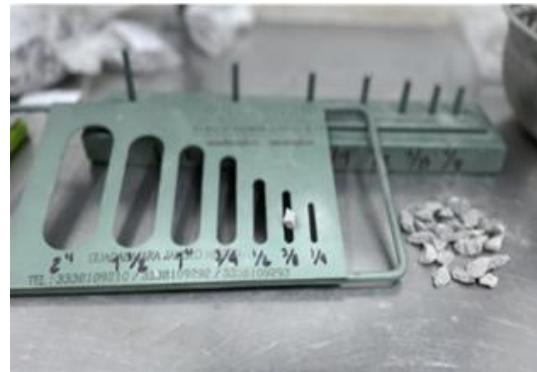


Figura 11 Calibrador de partículas planas

- **Cubrimiento del agregado (AMAAC, 2010a):** evaluación de la afinidad entre el agregado y el ligante asfáltico mediante agitación controlada; el porcentaje de cubrimiento indica la adherencia y la susceptibilidad al desprendimiento por humedad.

La caracterización obtenida permitió confirmar que la fracción gruesa presenta una gradación adecuada, alta resistencia al desgaste y buena adherencia con el ligante, cumpliendo con los criterios de calidad establecidos en la metodología Superpave.

a) Fracción fina

La fracción fina corresponde al material que pasa la malla No. 4 (4.75 mm), conformada por arena mezclada con polvo de trituración.

Los ensayos aplicados tuvieron como finalidad evaluar las propiedades físicas, de limpieza, reactividad y textura del material, las cuales influyen directamente en la trabajabilidad y estabilidad de las mezclas asfálticas.

Las pruebas se realizaron conforme a normas ASTM y recomendaciones AMAAC, según se describe a continuación:

- Granulometría (ASTM C136, 2006): determinación de la distribución de tamaños de partícula mediante tamizado mecánico con las mallas No. 4 (4.75 mm), No. 8 (2.36 mm), No. 16 (1.18 mm), No. 30 (0.60 mm), No. 50 (0.30 mm), No. 100 (0.15 mm) y No. 200 (0.075 mm).

Los resultados se graficaron en la representación de potencia 0.45 para verificar el cumplimiento con los límites de gradación establecidos por el método Superpave.

- Densidad y absorción (ASTM C128, 2023a): determinación de la densidad aparente, densidad relativa y absorción del agregado fino (Ver imagen alusiva en Figura 12). Estos parámetros son esenciales para el cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla y para evaluar la interacción del material con el ligante.



Figura 12 Densidad y Absorción del agregado fino

- Azul de metileno (AMAAC, 2010b): determinación del grado de reactividad del material que pasa la malla No. 200 (0.075 mm), utilizando el reactivo RA-

05. Este ensayo permite identificar la presencia de finos activos o arcillas que pueden afectar la estabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica.
- Equivalente de arena (ASTM D2419, 2022a): evaluación de la proporción relativa de finos plásticos o de tamaño arcilla presentes en el agregado. El resultado, expresado como valor de equivalente de arena, refleja la limpieza del material y su aptitud para mezclas asfálticas.
 - Angularidad del agregado fino (ASTM C1252, 2023c): determinación del contenido de vacíos no compactados, influenciado por la forma y textura superficial de las partículas. Este parámetro se relaciona con la estabilidad y la capacidad de entrelazamiento del agregado dentro de la mezcla.

La caracterización de la fracción fina permitió verificar que el material cumple con los criterios de gradación, limpieza, angularidad y estabilidad exigidos por la metodología Superpave, garantizando una adecuada interacción con el ligante y una estructura interna densa y resistente.

3.1.2.2 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico empleado en esta investigación corresponde a un asfalto modificado con polímero tipo I SBS, con clasificación PG 76V-22, suministrado por uno de los principales proveedores nacionales.

La caracterización tuvo como finalidad verificar las propiedades reológicas, térmicas y de envejecimiento del material, conforme al sistema Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements), que clasifica los ligantes en función de su desempeño frente a temperaturas extremas y condiciones de carga.

En la Tabla 2 se muestran los ensayos realizados y las normas aplicadas.

Tabla 2 Ensayos para caracterización del cemento asfáltico. Fuente: Elaboración propia con base en normas ASTM y SCT.

Ensayo	Norma de referencia
<u>Condición Original</u>	
Punto de inflamación	ASTM D 92
Viscosidad rotacional	ASTM D 4402
Punto de reblandecimiento	M-MMP-4-05-009
Separación anillo y esfera	M-MMP-4-05-009
Recup. elástica por torsión	M-MMP-4-05-024
Corte dinámico en Reómetro de Corte (DSR)	ASTM D 7175
<u>Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)</u>	
Cambio de masa	ASTM D 2872
Recup. elástica ductilómetro	ASTM D6048M
Corte dinámico en Reómetro de Corte (DSR)	ASTM D 7175
JNR a 3.2 kPa en MSCR	ASTM D 7405
Respuesta elástica RE 3.2 kPa en MSCR	ASTM D 7405
<u>Después de envejecimiento en Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV)</u>	
Envejecimiento en PAV	ASTM D6521
Corte dinámico en Reómetro de Corte (DSR)	ASTM D 7175
Rigidez a flexión en Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648

A continuación se describen brevemente los ensayos realizados:

- Punto de inflamación (ASTM D92): determina las temperaturas de inflamación y combustión mediante el método de la copa abierta de Cleveland, verificando la seguridad del material durante su manejo y calentamiento (rango 79–400 °C).

- Viscosidad rotacional (ASTM D4402, 2023): mide la viscosidad del ligante a temperaturas elevadas mediante un viscosímetro rotacional, permitiendo definir las temperaturas adecuadas de mezclado y compactación.
- Punto de reblandecimiento (M.MMP.4.05.009/00, SCT 2000) (Ver Figura 13): determina la temperatura a la cual el cemento asfáltico pierde su consistencia sólida, parámetro útil para identificar la modificación polimérica.



Figura 13 Ensayo de punto de reblandecimiento

- Separación anillo-esfera (M.MMP.4.05.009/00, SCT 2000): evalúa la homogeneidad del polímero dentro del asfalto modificado, verificando la correcta dispersión y compatibilidad del aditivo.
- Recuperación elástica por torsión (M.MMP.4.05.024/21, SCT 2021): determina la capacidad del ligante para recuperar su forma después de ser deformado, indicador de elasticidad y del efecto del polímero SBS.
- Corte dinámico en reómetro de corte (DSR) (ASTM D7175, 2023d): mide el módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) en estado original, tras envejecimiento a corto plazo (RTFO) y a largo plazo (PAV). Permite evaluar la resistencia a la deformación permanente y al agrietamiento por fatiga.

- Cambio de masa (RTFO) (ASTM D2872, 2022b): determina la pérdida de masa del asfalto al ser expuesto a calor y aire en movimiento, simulando el envejecimiento a corto plazo durante la producción de la mezcla.
- Fluencia y recuperación de tensión múltiple (MSCR) (ASTM D7405, 2020b): determina el porcentaje de recuperación elástica (RE) y el cumplimiento no recuperable (Jnr) mediante ensayos de fluencia y recuperación bajo tensiones múltiples, para clasificar la resistencia del ligante al ahuellamiento.
- Envejecimiento en vasija a presión (PAV) (ASTM D6521, 2022c): simula el envejecimiento oxidativo a largo plazo del ligante mediante exposición a aire presurizado y temperatura elevada, reproduciendo los efectos de varios años de servicio.
- Rigidez a flexión en reómetro de viga (BBR) (ASTM D6648, 2016): determina la rigidez a la fluencia por flexión y el valor m, que reflejan la capacidad del ligante para resistir la fisuración térmica a bajas temperaturas.

De acuerdo con el sistema Superpave, la evaluación del cemento asfáltico considera tres estados de envejecimiento, cada uno asociado a una etapa del proceso constructivo o de servicio del pavimento:

- Original: representa el estado del ligante recién producido, antes de ser calentado y mezclado con los agregados, es decir, la condición inicial del material en planta.
- RTFO (Rolling Thin Film Oven Test, ASTM D2872): simula el envejecimiento a corto plazo que ocurre durante el mezclado, tendido y compactación de la mezcla asfáltica, debido a la exposición del ligante a temperaturas elevadas y al contacto con el aire.
- PAV (Pressurized Aging Vessel, ASTM D6521): reproduce el envejecimiento oxidativo a largo plazo que experimenta el ligante una vez construido el

pavimento y en servicio, al estar expuesto durante años al oxígeno y a variaciones térmicas ambientales.

Estos procedimientos permiten reproducir en laboratorio las condiciones reales de transformación y oxidación del asfalto, posibilitando una evaluación precisa de su comportamiento reológico y su durabilidad a lo largo de la vida útil del pavimento.

La caracterización del cemento asfáltico PG 76V-22 demostró que el ligante cumple con los criterios de calidad y desempeño establecidos por la metodología Superpave, siendo adecuado para condiciones de tránsito pesado y climas cálidos, gracias a su alta estabilidad térmica y elasticidad derivada de la modificación con polímero.

3.1.2.3 Mineral carbonatado

El mineral carbonatado empleado en la presente investigación se utilizó como sustitución parcial del agregado fino en las mezclas modificadas (MC10 y MC20), con el objetivo de evaluar su influencia en las propiedades volumétricas y de desempeño mecánico.

La caracterización se realizó mediante ensayos físicos y mineralógicos para determinar su composición, morfología y distribución granulométrica.

Los procedimientos aplicados fueron los siguientes:

- Granulometría (ASTM C136, 2006): determinación de la distribución de tamaños de partícula, representada mediante la curva de potencia 0.45, para verificar su compatibilidad con la fracción fina del método Superpave.
- Densidad aparente y absorción (ASTM C128, 2023a): determinación de la densidad y absorción del material seco y saturado, parámetros empleados para el cálculo volumétrico en el diseño de mezclas.

- Difracción de rayos X (DRX): identificación del tipo de mineral carbonatado empleado, fundamental para diferenciar entre fases como calcita o dolomita, cuyas propiedades físico-químicas pueden modificar el desempeño de la mezcla asfáltica.



Figura 14 Preparación de muestra para DRX

El análisis se realizó con un equipo Rigaku MiniFlex, radiación Cu K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), bajo configuración Bragg-Brentano, con un rango 2θ de 2° – 80° , paso angular 0.02° y velocidad de $2^\circ/\text{min}$.

La muestra se preparó con el material que pasa la malla No. 200 (0.075 mm), compactado en el porta-muestras para cumplir con las condiciones de la ley de Bragg (Ver Figura 14).

El difractograma obtenido mostró la intensidad relativa frente al ángulo 2θ , y las fases cristalinas se identificaron mediante comparación con la base de datos Powder Diffraction File (PDF-2, Release 2005).

El análisis permitió clasificar el material como calcita (CaCO_3) con estructura cristalina romboédrica, validando su selección como sustituto parcial del agregado fino y garantizando la reproducibilidad del estudio.

3.2 FASE II. DISEÑOS VOLUMÉTRICOS

Con base en la información obtenida durante la caracterización de los materiales, se procedió al desarrollo de la Fase II, correspondiente al diseño volumétrico de mezclas asfálticas.

Esta etapa tuvo como propósito definir la estructura granulométrica de diseño y determinar el contenido óptimo de ligante (Pb) para tres formulaciones experimentales: mezcla base (MB), mezcla MC10 con sustitución del 10 % de agregado pétreo por mineral carbonatado, y mezcla MC20 con una sustitución del 20 %.

El diseño se realizó bajo los principios del método Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements), el cual permite establecer mezclas con propiedades volumétricas y mecánicas adecuadas en función de las condiciones de tránsito y temperatura de servicio, garantizando así la reproducibilidad y el desempeño estructural de los materiales evaluados.

3.2.1 Selección de la estructura granulométrica de diseño

La estructura granulométrica se definió conforme al método Superpave, combinando los agregados pétreos previamente caracterizados hasta obtener una curva que cumpliera con los criterios de control establecidos por la metodología.

Toda combinación propuesta debe ubicarse dentro de los límites granulométricos establecidos por los puntos de control, garantizando un equilibrio adecuado entre estabilidad, durabilidad y trabajabilidad.

Estos puntos delimitan la banda de gradación permitida mediante valores mínimos y máximos del porcentaje que pasa por cada tamiz.

En esta investigación se seleccionó una mezcla con tamaño nominal máximo de 19.0 mm, y los puntos de control correspondientes se muestran en la Tabla 3, conforme al Manual de Referencia para el Diseño de Mezclas Superpave publicado por la Federal Highway Administration (FHWA, 2011).

De acuerdo con la metodología Superpave, el tamaño máximo corresponde al tamiz inmediatamente superior a aquel que retiene más del 10 % del material, mientras que el tamaño nominal máximo es el tamiz siguiente al que retiene más del 10 %.

Tabla 3 Puntos de control Superpave para tamaño nominal de 19.0 mm, (FHWA, 2011)

Abertura (mm)	Designación	Puntos de control TN 19.0 mm	
		Tamiz	
37.5	1 1/2"		
25	1"	100	100
19	3/4"	90	100
12.5	1/2"		90
9.6	3/8"		
4.75	No. 4		
2.36	No. 8	23	49
1.18	No. 16		
0.6	No. 30		
0.3	No. 50		
0.15	No. 100		
0.075	No. 200	2	8

La estructura granulométrica seleccionada cumplió con los criterios de control del método Superpave, manteniéndose dentro de los límites de gradación permitidos y por debajo de la línea de máxima densidad, lo que asegura un espacio adecuado para la película de ligante y una compactación eficiente.

Dicha estructura fue posteriormente validada mediante la evaluación de las propiedades volumétricas, a fin de confirmar su adecuación y estabilidad dentro de los parámetros del diseño volumétrico.

Una vez definida la estructura final de la mezcla base (MB), se formularon las mezclas modificadas MC10 y MC20, manteniendo la misma granulometría de referencia y sustituyendo el 10 % y 20 % del total de agregado pétreo, respectivamente, por mineral carbonatado.

Para conservar la distribución global de la mezcla, la sustitución se realizó mediante una reducción proporcional de las fracciones de grava y finos: en la mezcla MC10 se reemplazó 5 % de grava y 5 % de finos, mientras que en la mezcla MC20 se sustituyeron 10 % de grava y 10 % de finos.

Esta estrategia permitió mantener la estructura granulométrica general del diseño base dentro de los límites establecidos por la metodología Superpave, garantizando la coherencia del diseño y la comparabilidad entre mezclas durante la evaluación volumétrica y de desempeño.

3.2.2 Diseños volumétricos

En esta etapa se desarrolló el proceso experimental correspondiente al diseño volumétrico, conforme a la metodología Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) descrita por la Federal Highway Administration (FHWA, 2011).

El objetivo de esta fase fue determinar el contenido óptimo de ligante (Pb) para cada una de las mezclas asfálticas: mezcla base (MB), mezcla MC10 con 10 % de sustitución de agregado por mineral carbonatado y mezcla MC20 con 20 % de sustitución.

3.2.2.1 *Preparación y acondicionamiento de mezclas*

Para la fase de diseño volumétrico, se prepararon mezclas asfálticas con cinco contenidos de cemento asfáltico, variando $\pm 1.0\%$ alrededor de un valor central adoptado como punto de partida, con el fin de determinar volumétricamente el contenido óptimo de cemento asfáltico (P_b) conforme al método Superpave.

Cada contenido fue evaluado mediante la fabricación y compactación de especímenes representativos, lo que permitió obtener las propiedades volumétricas requeridas para la selección del ligante óptimo.

Para cada diseño de mezcla (MB, MC10 y MC20) se fabricaron 12 mezclas en total, de las cuales:

- 10 especímenes se destinaron al diseño volumétrico (dos por cada contenido de ligante).
- 2 mezclas adicionales se emplearon para determinar la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) (Ver Figura 15), conforme a la norma ASTM D2041.



Figura 15 Muestra de mezcla para G_{mm}

El mezclado y la compactación se realizaron a las temperaturas recomendadas por el proveedor del cemento asfáltico PG 76V-22. Los valores empleados se presentan en la Tabla 4, la cual muestra los rangos de temperatura de mezclado y compactación.

Tabla 4 Temperaturas de mezclado y compactación

Temperatura de mezclado	Temperatura de compactación
175 – 190 °C	163 – 175 °C

Previo a la compactación, las mezclas se mantuvieron durante dos horas en horno a la temperatura de compactación, siguiendo el procedimiento de acondicionamiento a corto plazo indicado en AASHTO PP2, con el fin de permitir la absorción inicial del ligante por parte del agregado y simular el envejecimiento que ocurre durante la producción en planta

3.2.2.2 Compactación de especímenes

La compactación se realizó en el Compactador Giratorio Superpave (SGC) conforme a la norma ASTM D6925, utilizando las condiciones establecidas en el Manual de Diseño Superpave (FHWA, 2011).

El equipo aplica una presión vertical constante mientras gira el molde a un ángulo fijo, simulando las condiciones de consolidación que se generan durante la compactación en campo.

Los parámetros de operación utilizados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5 Parámetros de compactación utilizados

Parámetro	Valor aplicado
Presión vertical	600 ± 18 kPa
Velocidad de giro	30 ± 0.5 rpm
Ángulo de inclinación	1.25° ± 0.02°
Diámetro del molde	150 mm
Altura objetivo del espécimen	115 ± 5 mm

El número de giros de diseño se seleccionó de acuerdo con la clasificación de tránsito de 3 a 10 millones de ejes equivalentes (ESALs), conforme a la FHWA (2011), como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Niveles de esfuerzo de compactación Superpave

ESALs de diseño	Giros iniciales	Giros de diseño	Giros máximos
	N _{inicial}	N _{diseño}	N _{máx}
3 – 10 millones	8	100	160

Tras la compactación, los especímenes se dejaron enfriar durante 20 horas a temperatura ambiente, asegurando la estabilización térmica antes de determinar la gravedad específica bruta (G_{mb}), obtenida mediante pesadas en aire seco, sumergido y saturado con superficie seca, de acuerdo con la norma ASTM D2726.



Figura 16 Espécimen para G_{mb}

3.2.2.3 Determinación de propiedades volumétricas

Las propiedades volumétricas de las mezclas se calcularon con base en las densidades determinadas experimentalmente, de acuerdo con los procedimientos ASTM D3203 y AASHTO R35.

Los parámetros evaluados fueron:

- Porcentaje de vacíos de aire (Va): espacio de aire dentro de la mezcla compactada, expresado como porcentaje del volumen total.
- Vacíos en el agregado mineral (VMA): volumen de vacíos entre las partículas del agregado, susceptibles de llenarse con ligante o aire.
- Vacíos llenos con asfalto (VFA): porcentaje de vacíos del agregado ocupados por el ligante asfáltico.
- Relación Filler-Asfalto (Dp): se define como la razón entre el porcentaje de material pasante por la malla No. 200 y el contenido de cemento asfáltico en la mezcla. Este parámetro permite evaluar el equilibrio entre la cantidad de finos y el ligante, siendo un indicador de la consistencia, trabajabilidad y cohesión interna del material.

Los valores de gravedad específica empleados en los cálculos volumétricos fueron los siguientes:

- Gb: gravedad específica del ligante asfáltico.
- Gsb: gravedad específica bulk del agregado, considerando el volumen total, incluidos los poros permeables.
- Gsa: gravedad específica aparente del agregado, que excluye los poros permeables al agua.
- Gse: gravedad específica efectiva del agregado, que representa el volumen del agregado más los poros no llenos por asfalto.
- Gmm: gravedad específica máxima teórica de la mezcla, obtenida según ASTM D2041.
- Gmb: gravedad específica bruta de la mezcla compactada, determinada según ASTM D2726.

Asimismo, se determinaron los siguientes parámetros asociados al ligante asfáltico:

- Pb: contenido total de asfalto en la mezcla (%).
- Pba: porcentaje de asfalto absorbido por el agregado.
- Pbe: contenido de asfalto efectivo, que representa la fracción de ligante que recubre los agregados y participa en la cohesión interna.

Los resultados de estos parámetros permitieron graficar las curvas volumétricas en función del contenido de ligante, a partir de las cuales se determinó el contenido óptimo de asfalto (Pb) para cada mezcla.

3.2.2.4 Selección del contenido óptimo de ligante (Pb)

El contenido óptimo de cemento asfáltico (Pb) se determinó mediante la interpolación de las curvas de Va, VMA y VFA en función del contenido de ligante, siguiendo los criterios de aceptación establecidos por el método Superpave.

El contenido seleccionado para la mezcla base con una estructura granulométrica de 50% grava y 50% arena, cumple simultáneamente con los siguientes parámetros:

Va: 4 %.

VMA: $\geq 13\%$ (para tamaño nominal de 19 mm).

VFA: 65 – 75 %.

La estructura granulométrica adoptada, correspondiente a una proporción de 50 % de grava y 50 % de arena, mostró un comportamiento volumétrico adecuado, cumpliendo con los criterios establecidos por el método Superpave.

Por esta razón, se mantuvo como granulometría de diseño de referencia para las mezclas modificadas MC10 y MC20, en las cuales se sustituyó parcialmente el agregado pétreo por mineral carbonatado en proporciones de 10 % y 20 %, respectivamente (Ver Figura 17).

En primer término, se evaluaron las propiedades volumétricas de la mezcla base (MB), verificando su cumplimiento con los parámetros establecidos por la metodología Superpave.

Una vez validado su comportamiento, se realizaron las sustituciones del 10 % y 20 % de agregado por mineral carbonatado, partiendo de la estructura granulométrica previamente verificada.

Posteriormente, se efectuó la determinación de las propiedades volumétricas de las mezclas modificadas (MC10 y MC20) para analizar la influencia del material sustituto sobre el comportamiento volumétrico del sistema asfáltico.

Con la verificación volumétrica de la mezcla base y la evaluación de las mezclas modificadas, se establecieron las condiciones necesarias para la Fase III, destinada a la evaluación del desempeño mecánico de las mezclas asfálticas.



Figura 17 Dosificación de Agregados pétreos y Calcita

3.3 FASE III. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS

En esta fase se evaluó el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas diseñadas mediante la metodología Superpave, con el objetivo de analizar la influencia de la sustitución parcial de agregado por mineral carbonatado sobre su comportamiento frente a dos mecanismos principales de falla en pavimentos flexibles: la deformación permanente y el agrietamiento por fatiga.

Los ensayos se realizaron sobre las tres formulaciones evaluadas: mezcla base (MB), mezcla MC10 con 10 % de sustitución y mezcla MC20 con 20 % de sustitución.

Cada mezcla fue fabricada con su correspondiente contenido óptimo de ligante (Pb), determinado en la Fase II.

Para la evaluación del desempeño se aplicaron dos métodos de prueba complementarios, conforme a las normas técnicas correspondientes:

- Ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324), empleado para determinar la resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento).
- Ensayo IDEAL-CT (ASTM D8225-19), utilizado para evaluar la resistencia al agrietamiento mediante carga de tracción indirecta.

El desarrollo de esta fase se estructuró en los apartados siguientes.

3.3.1 Resistencia a la deformación permanente

Para determinar la resistencia a la deformación permanente, se empleó el método AASHTO T 324 “Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures”, utilizando el equipo de Rueda Cargada de Hamburgo.

Este ensayo permite evaluar la susceptibilidad de las mezclas asfálticas al ahuellamiento mediante la aplicación de una carga repetida sobre especímenes

cilíndricos parcialmente sumergidos en agua a una temperatura controlada (en la Figura 18 se muestra un ejemplo de las muestras después de ensayadas en el equipo de Rueda Carga de Hamburgo).



Figura 18 Muestra ensayada en equipo de Rueda Cargada de Hamburgo

La deformación vertical acumulada producida por el paso de la rueda se registra en función del número de ciclos de carga, obteniendo así la curva de deformación permanente de la mezcla.

Para cada diseño de mezcla (MB, MC10 y MC20) se fabricaron ocho especímenes compactados con el Compactador Giratorio Superpave (SGC), utilizando el contenido óptimo de ligante (Pb) determinado en la Fase II.

La altura de los especímenes fue de 55 ± 2 mm y el diámetro de 150 mm, conforme a la norma.

Las condiciones de ensayo se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7 Condiciones de ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo

Parámetro	Condición aplicada
Temperatura de ensayo	50 ± 1 °C
Medio de contacto	Aqua (inmersión)
Carga aplicada	705 ± 10 N
Frecuencia de aplicación	52 ciclos/min
Tipo de rueda	Acero, 203 mm diámetro
Número máximo de pasadas	20,000

Durante la prueba se registró el profundidad de la huella (rut depth) en milímetros a lo largo del número de pasadas.

El criterio de aceptación se estableció considerando un límite máximo de deformación de 10 mm a 20,000 pasadas, conforme a la recomendación de la Federal Highway Administration (FHWA, 2011).

El parámetro de interés obtenido de este ensayo fue la deformación permanente (mm), la cual se empleó para comparar el desempeño de las mezclas y analizar la influencia del mineral carbonatado en la resistencia al ahuellamiento.

3.3.2 Resistencia al agrietamiento

Inicialmente se consideró aplicar el ensayo de fatiga en viga de cuatro puntos (AASHTO T321) para la evaluación del agrietamiento en las mezclas asfálticas. Sin embargo, debido a la disponibilidad limitada del equipo y a las ventajas técnicas y operativas del ensayo IDEAL-CT (Indirect Tensile Cracking Test), se optó por sustituir el método originalmente planteado.

El ensayo IDEAL-CT presenta una serie de beneficios frente al método de viga a cuatro puntos, entre ellos una mayor eficiencia operativa, facilidad en la preparación

de especímenes, menor tiempo de ejecución y mayor disponibilidad de equipo en laboratorio, en Figura 19 se muestra un espécimen dentro del dispositivo de ensayo.



Figura 19 Ensayo de Ideal CT

De acuerdo con Zhou *et al.* (2017), los resultados del ensayo IDEAL-CT muestran una alta correlación con los mecanismos de agrietamiento por fatiga, reflexión y térmico observados en pavimentos reales, por lo que su empleo resulta adecuado y representativo para los fines de este estudio.

En consecuencia, la evaluación de la resistencia al agrietamiento se realizó conforme a la norma ASTM D8225-19, “Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index (CTIndex) of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature.”

Este método permite determinar el Índice de Tolerancia al Agrietamiento (CTIndex) de mezclas asfálticas mediante un ensayo indirecto a tensión (IDEAL-CT), que considera tanto la iniciación como la propagación de grietas bajo una carga aplicada a desplazamiento controlado.

El procedimiento se fundamenta en principios de mecánica de fractura y proporciona un parámetro de desempeño que refleja la capacidad de la mezcla para resistir el agrietamiento a temperaturas intermedias.

Para cada mezcla (MB, MC10 y MC20) se elaboraron cuatro especímenes con geometría cilíndrica de 150 ± 1 mm de diámetro y 62 ± 2 mm de altura, compactados con el compactador giratorio a la temperatura especificadas por el proveedor del ligante PG 76V-22.

Los especímenes se ensayaron a una temperatura controlada de 25 ± 0.5 °C, conforme a la norma.

Las condiciones de ensayo se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8 Condiciones de ensayo para la determinación del CTIndex (ASTM D8225-19)

Parámetro	Condición aplicada
Temperatura de ensayo	25 ± 0.5 °C
Velocidad de carga	50 mm/min
Tipo de carga	Tracción indirecta
Número de especímenes por mezcla	4
Parámetro obtenido	CTIndex (Índice de tolerancia al agrietamiento)

Durante el ensayo se registraron la carga aplicada y la deformación vertical, con las cuales se construyó la curva carga–desplazamiento, como se muestra en la Figura 20.

El área bajo la curva representa la energía de fractura (G_f), mientras que la pendiente de la porción descendente se asocia con la capacidad de liberación de energía del material durante la propagación de la grieta.

A partir de estos parámetros, el Índice de Tolerancia al Agrietamiento (CTIndex) se calcula mediante la expresión establecida en la norma, integrando la energía de fractura, el espesor (t) y el diámetro (D) del espécimen.

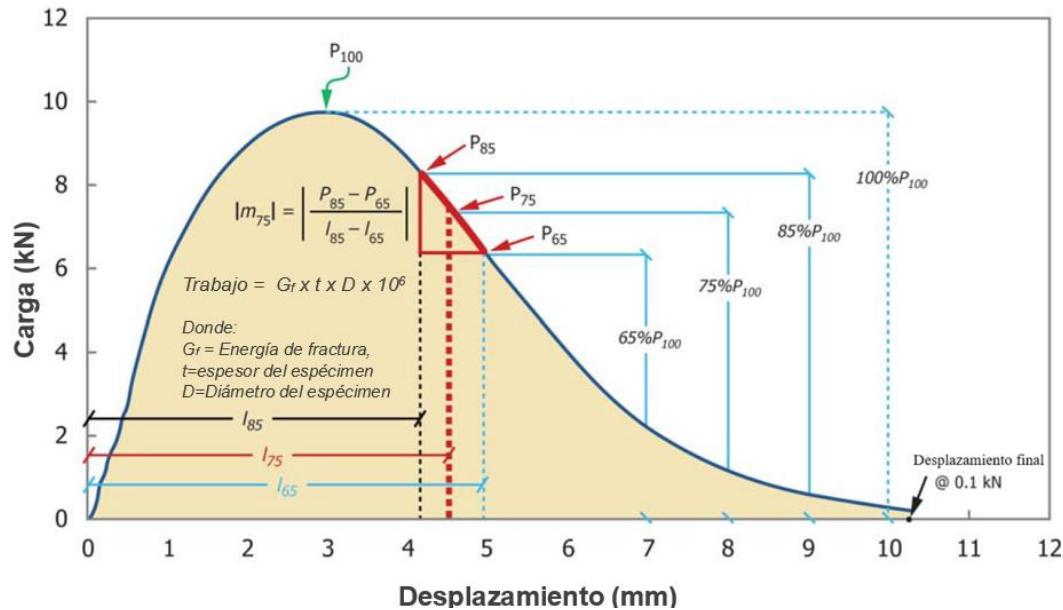


Figura 20 Carga registrada (P) versus desplazamiento de línea de carga (I).

Fuente: Adaptado de ASTM D8225-19

La figura ilustra gráficamente la determinación de estos componentes, los puntos de carga correspondientes a los porcentajes P_{65} , P_{75} y P_{85} del valor máximo P_{100} , y el desplazamiento final al que se completa la falla del material.

Los resultados obtenidos proporcionaron información esencial sobre el efecto del material sustituto en el comportamiento estructural y funcional de las mezclas asfálticas, sirviendo como base para el análisis presentado en el capítulo de Resultados y Discusión.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los principales hallazgos obtenidos durante el desarrollo experimental de la investigación. Cada sección muestra los resultados de las distintas etapas del estudio, desde la caracterización de los materiales hasta la evaluación del desempeño mecánico de las mezclas asfálticas modificadas con mineral carbonatado.

4.1 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales utilizados en la investigación, correspondientes a los agregados pétreos, el cemento asfáltico PG 76V-22 y el mineral carbonatado empleado como sustituto parcial del agregado fino.

4.1.1 Agregados pétreos

Los agregados pétreos empleados en esta investigación corresponden a basalto vesicular en las fracciones identificadas como grava de 1/2" y arena mezclada con polvo de trituración, provienen del banco "Construcarr km 273", ubicado en la planta de asfaltos del km 240 de la Autopista Maravatío–Zapotlanejo, Michoacán.

De acuerdo con la norma ASTM C136, se determinó la distribución granulométrica de los agregados pétreos (grava y arena) utilizados en esta investigación. En la Tabla 9 se presentan los porcentajes que pasan obtenidos para cada fracción, y en la Figura 21 se muestra la curva de distribución granulométrica correspondiente, elaborada con base en los resultados experimentales.

Tabla 9 Composición granulométrica del agregado pétreo

Tamiz		% que pasa	
Abertura (mm)	Designación	Grava 1/2"	Arena
37.5	1 1/2"	100	100
25	1"	100	100
19	3/4"	100	100
12.5	1/2"	89	100
9.6	3/8"	68	100
4.75	No. 4	13	100
2.36	No. 8	3	80
1.18	No. 16	0	52
0.6	No. 30	0	33
0.3	No. 50	0	21
0.15	No. 100	0	14
0.075	No. 200	0.0	9.4

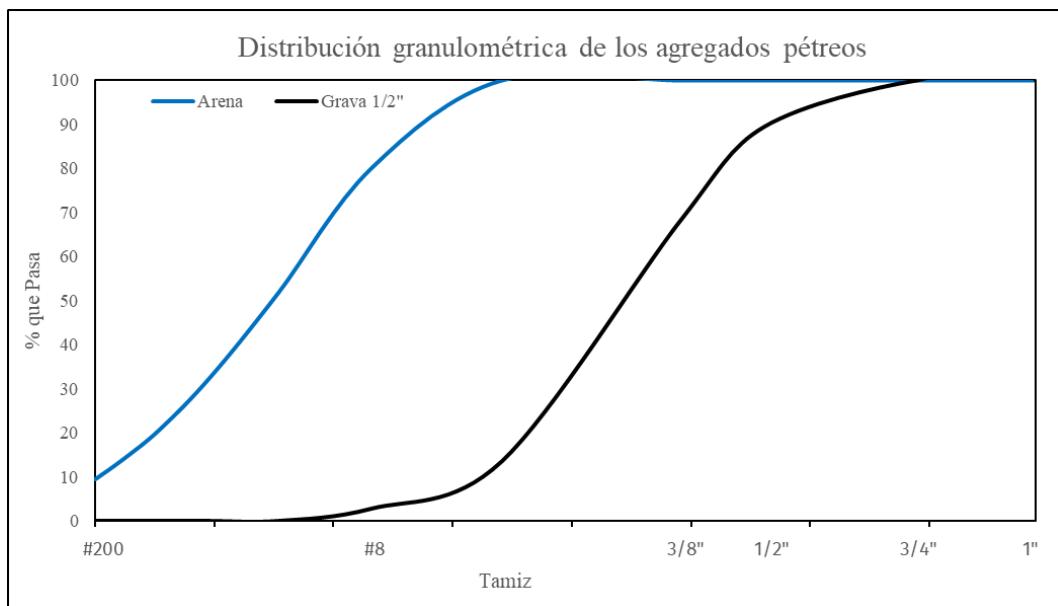


Figura 21 Granulometría de agregado pétreo

Complementariamente, cada material fue sometido a una serie de ensayos conforme a los métodos establecidos por las normas ASTM y SICT, con el propósito de determinar sus propiedades físicas y verificar su cumplimiento con los requisitos de calidad establecidos en la norma mexicana N-CMT-4-04/17 “Materiales pétreos para mezclas asfálticas”.

En la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos para cada propiedad, junto con los valores límite establecidos por la norma mencionada.

Tabla 10 Resultados de las propiedades físicas de los agregados pétreos

Ensayo	Norma de referencia	Resultado	Especificación
Agregado Grueso			
Densidad del agregado grueso	ASTM C127	2.507	2.4 mín
Absorción del agregado grueso	ASTM C127	2.0%	reportar
Desgaste de Los Ángeles	ASTM C131	18%	30 máx
Desgaste Microdeval	ASTM D6928	5%	18 máx
Intemperismo acelerado	ASTM C88	2.0%	15 máx
Caras fracturadas, dos o más caras	ASTM D5821	100%	85 % mín
Partículas planas y alargadas	M-MMP-4-04-005/08	27.5%	40 máx
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	AMAAC RA-08	94%	90 mín
Agregado Fino			
Densidad del agregado fino	ASTM C128	2.607	2.4 mín
Absorción del agregado fino	ASTM C128	0.9%	reportar
Equivalente de Arena	ASTM D2419	78.0%	50 mín
Angularidad	ASTM C1252	48%	45 mín
Azul de metileno	AMAAC RA-05	4 mg/g	15 máx

Los resultados obtenidos evidencian que los agregados pétreos analizados presentan características físicas adecuadas y consistentes con los criterios de calidad establecidos por la norma N-CMT-4-04/17, lo que garantiza su idoneidad para su uso en mezclas asfálticas. Las propiedades medidas reflejan materiales con buena resistencia, durabilidad y limpieza, aspectos fundamentales para asegurar un comportamiento estable y un adecuado desempeño volumétrico en el diseño de mezclas bajo la metodología Superpave.

4.1.2 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico empleado en esta investigación fue proporcionado por uno de los principales productores nacionales, reconocido por su distribución de asfaltos modificados. El material corresponde a un cemento asfáltico modificado con polímero tipo SBS, clasificado por Grado de Desempeño (PG) como PG 76V-22.

El sistema PG clasifica los ligantes en función de su comportamiento frente a las temperaturas extremas (máxima y mínima) esperadas en el sitio de aplicación, así como del nivel de tránsito y velocidad de operación de la vía. Esta designación permite garantizar que el material proporcione un desempeño adecuado frente a la deformación permanente, el agrietamiento por fatiga y la fisuración térmica, de acuerdo con las condiciones de servicio del pavimento.

La determinación del grado PG se realizó a partir de una serie de ensayos reológicos y de envejecimiento acelerado, tanto a corto como a largo plazo, conforme a lo indicado en la norma N-CMT-4-05-004/18 “Cementos asfálticos para mezclas asfálticas”.

En la Tabla 11 se presentan los resultados de la caracterización del cemento asfáltico PG 76V-22, en estado original y después de los procesos de envejecimiento, junto con los límites de aceptación establecidos por la normativa.

Tabla 11 Resultados de caracterización del cemento asfáltico

Ensayo	Norma de referencia	Resultado
Condición Original		
Punto de inflamación	ASTM D 92	PI = 260°C
Viscosidad rotacional	ASTM D 4402	$\delta = 1.272 \text{ Pa.s}$
Punto de reblandecimiento	M-MMP-4-05-009	60.2
Separación anillo y esfera	M-MMP-4-05-009	1.0°C
Recup. elástica por torsión	M-MMP-4-05-024	53.3°C
Corte dinámico en Reómetro de Corte (DSR)	ASTM D 7175	G*/Sen = 2.115 kPa
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)		
Cambio de masa	ASTM D 2872	CM = -0.568%
Recup. elástica ductilómetro	ASTM D6048M	80.0%
Corte dinámico en Reómetro de Corte (DSR)	ASTM D 7175	G*/Sen = 6.31 kPa
JNR a 3.2 kPa en MSCR	ASTM D 7405	0.461
Respuesta elástica RE 3.2 kPa en MSCR	ASTM D 7405	35.41
Después de envejecimiento en Vaso de Envejecimiento a Presión (PAV)		
Envejecimiento en PAV	ASTM D6521	
Corte dinámico en Reómetro de Corte (DSR)	ASTM D 7175	G*(sen) = 1987.35 kPa
Rigidez a flexión en Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648	S = 105.58 m = 0.312

Los resultados obtenidos muestran que el cemento asfáltico PG 76V-22 cumple con los criterios establecidos en la N-CMT-4-05-004/18, tanto en su estado original como después de los procesos de envejecimiento acelerado.

En conjunto, las propiedades evaluadas reflejan un material estable, con buena manejabilidad y comportamiento elástico, adecuado para resistir los efectos combinados de temperatura y carga en servicio. Estas características confirman la idoneidad del ligante para su empleo en el diseño volumétrico y en la fabricación de las mezclas asfálticas modificadas consideradas en esta investigación.

4.1.3 Mineral carbonatado

El mineral carbonatado empleado en esta investigación corresponde a una calcita natural proveniente del banco de materiales ubicado en el km 74+800 de la Carretera San Juan del Río – Xilitla, en Vizarrón de Montes, Querétaro, distribuido por CALCIMEXICANA S.A. de C.V., bajo la designación G 1-3. Este material se utilizó como sustituto parcial del agregado pétreo en proporciones del 10 % y 20 %, con el propósito de evaluar su influencia en las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas asfálticas.

De acuerdo con la norma ASTM C136, se determinó su distribución granulométrica. En la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos, y en la Figura 22 se muestra la curva de distribución correspondiente.

Tabla 12 Granulometría de mineral carbonatado

Tamiz Abertura (mm)	Designación	% que pasa
		Mineral carbonatado
25	1"	100
19	3/4"	100
12.5	1/2"	100
9.6	3/8"	94
4.75	No. 4	57
2.36	No. 8	17
1.18	No. 16	4
0.6	No. 30	3
0.3	No. 50	2
0.15	No. 100	2
0.075	No. 200	1.9

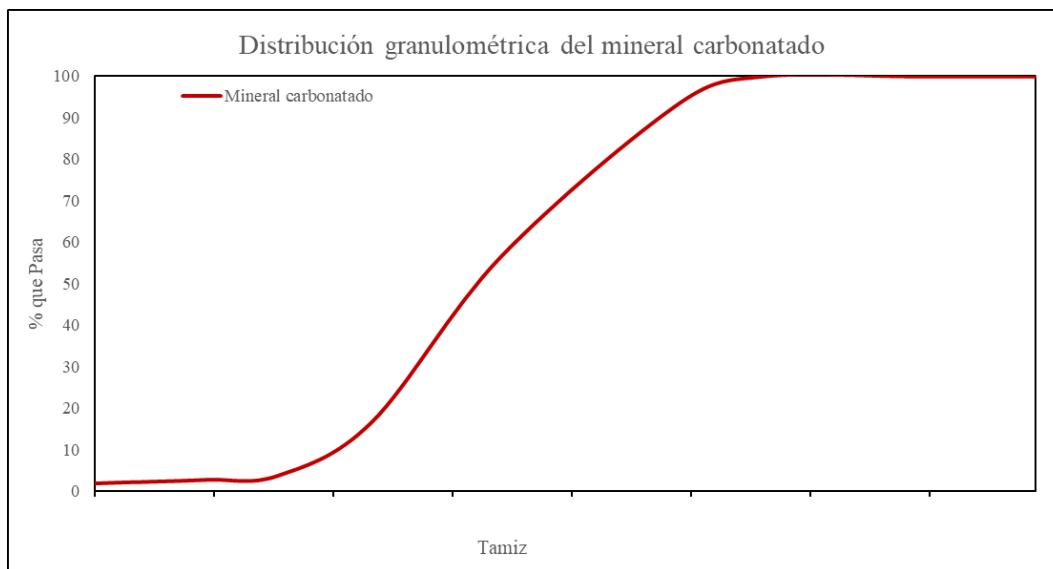


Figura 22 Granulometría de mineral carbonatado

La distribución obtenida muestra que el material se encuentra predominantemente dentro de la fracción fina (menor a 0.075 mm), lo que evidencia su compatibilidad granulométrica con las fracciones de menor tamaño de los agregados pétreos.

Por esta razón, el mineral carbonatado se incorporó como sustituto parcial del agregado pétreo total, aplicando una reducción proporcional en las fracciones de grava y finos equivalente al porcentaje de reemplazo considerado. Esta condición permitió mantener la estructura granulométrica global de la mezcla dentro de los límites establecidos por la metodología Superpave.

Para identificar su composición mineralógica, se realizó un ensayo de Difracción de Rayos X (DRX) en el laboratorio de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Juriquilla (Querétaro). El difractograma obtenido se presenta en la Figura 23, correspondiente a la muestra FC25-030 S1, mismo que fue comparado con el patrón PDF#00-047-1743 correspondiente a Calcita CaCO_3 obtenido de la base de datos Powder Diffraction File (PDF-2, Release 2005).

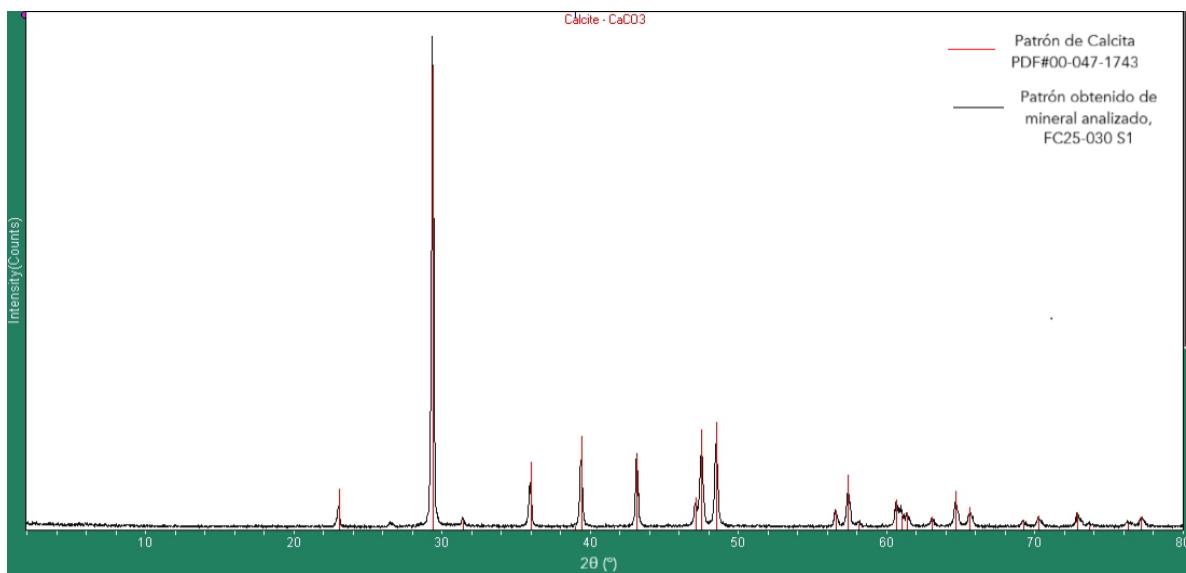


Figura 23 Difractograma de mineral carbonatado FC25-030 S1

El análisis del difractograma permitió clasificar el mineral carbonatado como una calcita, ya que está compuesto mayormente por carbonato de calcio (CaCO₃). Esta composición respalda su empleo como sustituto parcial del agregado, ya que aporta mayor adherencia con el ligante y contribuye al mejoramiento del desempeño mecánico de las mezclas.

4.2 DISEÑOS VOLUMÉTRICOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del diseño volumétrico de las mezclas asfálticas MB, MC10 y MC20, elaborado conforme a la metodología Superpave.

El propósito de esta etapa fue determinar el contenido óptimo de ligante (Pb) y evaluar las propiedades volumétricas que aseguran un comportamiento equilibrado entre estabilidad, durabilidad y trabajabilidad.

4.2.1 Mezcla base (MB)

Para el diseño de la mezcla base se elaboró una propuesta granulométrica teórica inicial, la cual fue ajustada mediante iteraciones sucesivas hasta lograr que la combinación de materiales se mantuviera dentro de los puntos de control establecidos por el método Superpave para mezclas con tamaño nominal máximo de 19.0 mm.

En la Tabla 13 se presentan los porcentajes que pasan por cada tamiz, resultado de la combinación de 50 % de grava de 1/2" y 50 % de arena mezclada con polvo de trituración, mientras que en la Figura se muestra la curva de distribución granulométrica correspondiente.

Tabla 13 Composición granulométrica de la mezcla base (MB)

Abertura (mm)	Designación	Tamiz	% que pasa		Puntos de control TN 19.0 mm
			MB		
25	1"		100	100	100
19	3/4"		100	90	100
12.5	1/2"		95		90
9.6	3/8"		84		
4.75	No. 4		57		
2.36	No. 8		41	23	49
1.18	No. 16		26		
0.6	No. 30		16		
0.3	No. 50		10		
0.15	No. 100		7		
0.075	No. 200		4.7	2	8

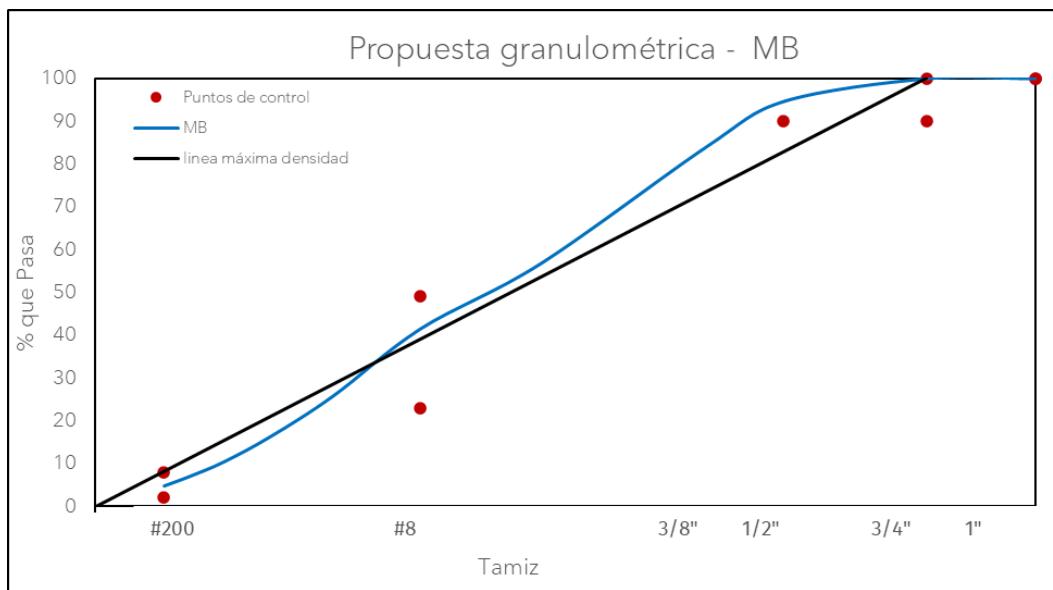


Figura 24 Curva de distribución granulométrica de la mezcla base (MB)

Como se observa en la Figura 24, la mezcla se ubica completamente dentro de los límites de control definidos por el manual Superpave (FHWA, 2011), mostrando una gradación continua y bien equilibrada que favorece la estabilidad y la compactación.

Esta mezcla se consideró como formulación de referencia para las mezclas modificadas MC10 y MC20, en las cuales se realizó la sustitución parcial de los agregados pétreos por mineral carbonatado (calcita), manteniendo la misma estructura granulométrica base.

Con base en la propuesta granulométrica seleccionada, se elaboraron y compactaron especímenes con el propósito de complementar el diseño volumétrico de la mezcla base.

Se fabricaron mezclas con contenidos de cemento asfáltico del 6.0 %, 6.5 %, 7.0 %, 7.5 % y 8.0 % respecto al peso total del agregado, a fin de determinar el contenido óptimo de ligante (Pb) conforme a los criterios establecidos por el método Superpave.

En la Tabla 14 se presentan los resultados promedio obtenidos para las propiedades volumétricas determinadas en cada contenido de asfalto: vacíos de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos con asfalto (VFA) y relación filler-asfalto (Dp).

Tabla 14 Diseño volumétrico MB

No. Pastilla	% de asfalto		Gravedad específica de la mezcla compactada						Propiedades volumétricas de la mezcla					
	respecto a la mezcla	respecto al agregado	Masa en aire	Masa SSS g	Masa en agua g	Gmb	Prom Gmb	Gmm	Vacíos de aire %	VAM %	VFA %	Pbe	DP	
1A	6.00	6.38	4687.1	4717.1	2635.2	2.251		2.255	2.421	6.840	16.469	58.469	4.397	1.066
1B	6.00	6.38	4675.1	4712.0	2643.0	2.260								
2A	6.50	6.95	4733.8	4746.6	2675.3	2.285		2.278	2.404	5.234	16.085	67.457	4.906	0.956
2B	6.50	6.95	4726.8	4749.4	2667.6	2.271								
3A	7.00	7.53	4719.8	4734.8	2676.2	2.293		2.296	2.387	3.808	15.877	76.017	5.415	0.866
3B	7.00	7.53	4725.3	4732.8	2677.5	2.299								
4A	7.50	8.11	4731.1	4740.5	2689.2	2.306		2.307	2.370	2.679	15.943	83.196	5.923	0.792
4B	7.50	8.11	4732.5	4739.8	2688.1	2.307								
5A	8.00	8.70	4738.8	4742.1	2690.4	2.310		2.310	2.353	1.843	16.268	88.670	6.432	0.729
5B	8.00	8.70	4737.8	4744.5	2693.9	2.310								
Gmm promedio:			2.427	Gse:		2.649	Pba:			1.70				
Gsb combinado:			2.538	Gb:		1.030								

En la Figura 25 se muestran las gráficas de variación de las propiedades volumétricas respecto al contenido de cemento asfáltico (Pb), identificado de la siguiente manera, (a) Vacíos de aire (Va), (b) Vacíos en el agregado mineral (VMA), (c) Vacíos llenos con asfalto (VFA) y (d) Relación filler-asfalto (Dp).

Las curvas obtenidas permiten visualizar la tendencia de cada parámetro y localizar el punto de equilibrio volumétrico que cumple con los criterios de aceptación del método Superpave.

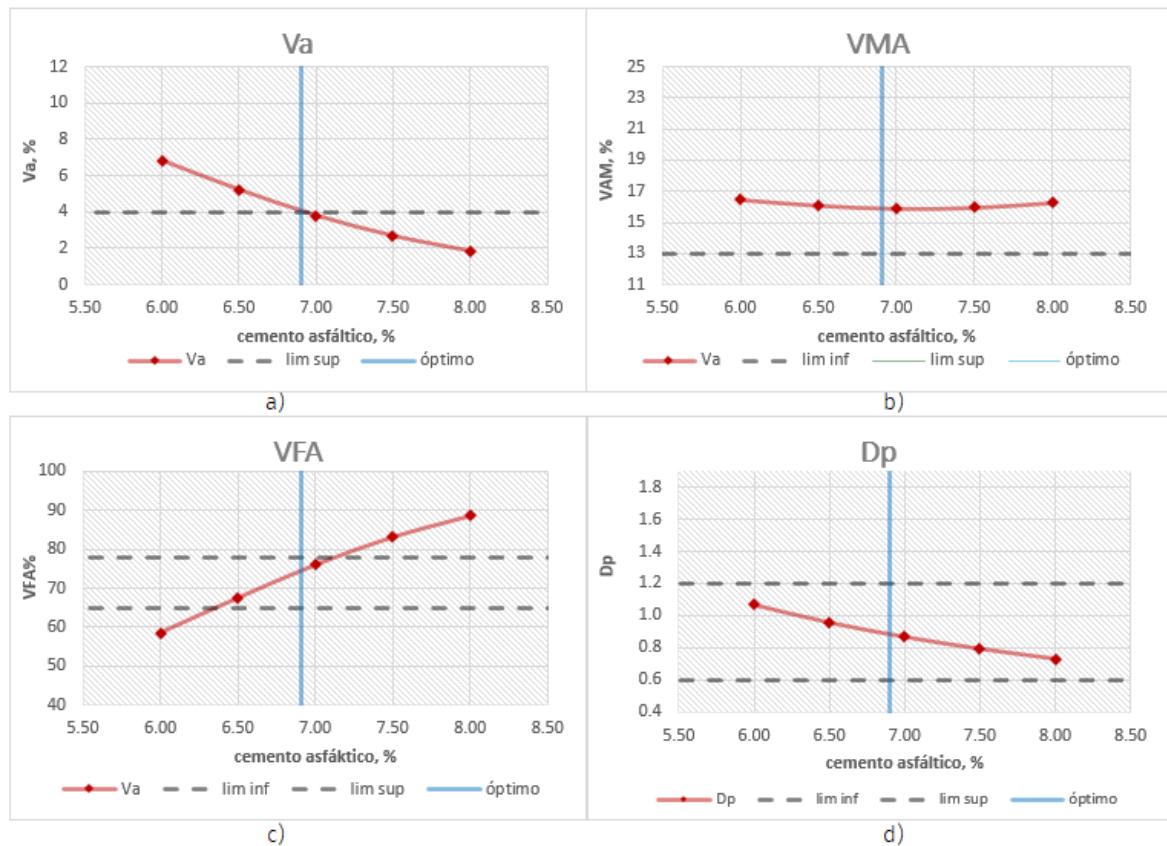


Figura 25 Propiedades volumétricas de diseño Superpave para la mezcla base (MB)
 (a) Vacíos de aire (Va), (b) Vacíos en el agregado mineral (VMA), (c) Vacíos llenos con asfalto (VFA) y (d) Relación Filler–Asfalto (Dp).

El contenido óptimo de ligante (Pb-óptimo) se determinó a partir de la gráfica de la Figura 25 a, que muestra la variación del porcentaje de vacíos de aire (Va %) en función del contenido de cemento asfáltico (Pb %). El valor de Pb óptimo corresponde al punto donde la curva de Va % intercepta el valor de 4 %, conforme a los criterios establecidos por el método Superpave. Una vez definido el contenido óptimo de ligante, este se utilizó para interceptar las gráficas de las demás propiedades volumétricas (VMA, VFA y Dp), con el fin de obtener los valores correspondientes a dicho contenido.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15 Propiedades volumétricas respecto a contenido de asfalto óptimo de MB

Propiedad	Vol.	Resultado	Especificación
Pb % óptimo	6.90	-	
Gmb	2.293	-	
Gmm	2.390	-	
Va	4.0	4.0	
VAM	15.9	13% mín	
VFA	74.6	68 - 75 %	
Dp	0.9	0.6 - 1.2	

4.2.2 Mezcla con 10% de sustitución (MC10)

A partir de la estructura granulométrica definida para la mezcla base (MB), se formuló la mezcla modificada MC10, en la cual se sustituyó un 10 % del total del agregado pétreo por mineral carbonatado (calcita).

La sustitución se realizó mediante una reducción proporcional de las fracciones de grava (–5 %) y arena (–5 %), manteniendo la misma distribución general de la curva granulométrica base y garantizando el cumplimiento de los puntos de control establecidos por el método Superpave para mezclas con tamaño nominal máximo de 19.0 mm, quedando una proporción de 45 % grava de 1/2", 45 % arena y 10 % mineral carbonatado.

En la Tabla 16 se presentan los porcentajes que pasan por cada tamiz, mientras que en la Figura 26 se muestra la curva de distribución granulométrica comparativa entre la mezcla base (MB) y la mezcla modificada MC10.

Tabla 16 Composición granulométrica de la mezcla MC10

Abertura (mm)	Designación	MC 10	Puntos de control TN 19.0 mm	
			% que pasa	Puntos de control TN
25	1"	100	100	100
19	3/4"	100	90	100
12.5	1/2"	95		90
9.6	3/8"	85		
4.75	No. 4	57		
2.36	No. 8	39	23	49
1.18	No. 16	24		
0.6	No. 30	15		
0.3	No. 50	10		
0.15	No. 100	6		
0.075	No. 200	4.4	2	8

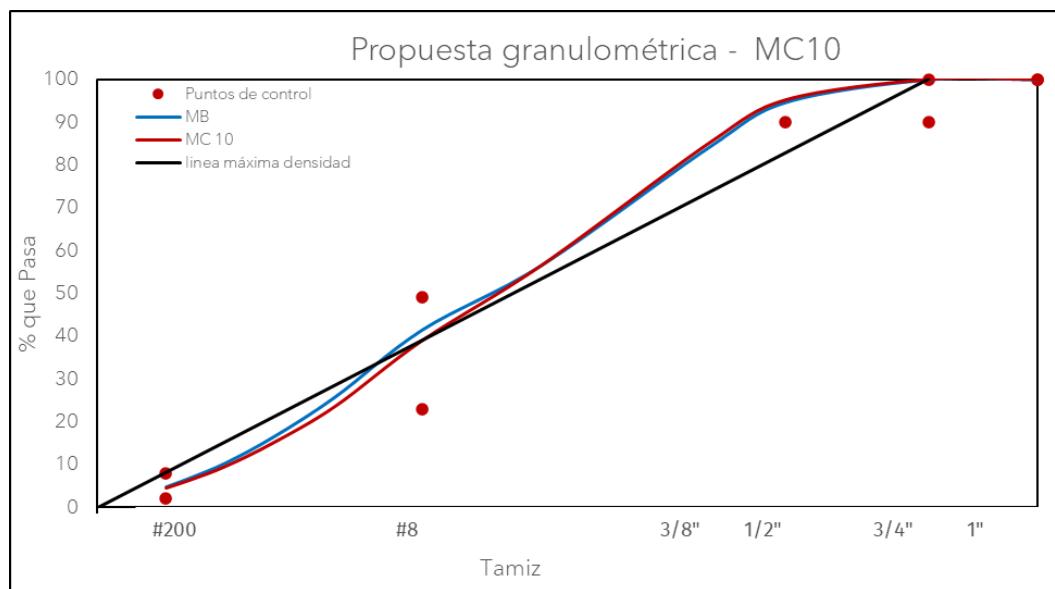


Figura 26 Curva granulométrica comparativa de las mezclas MB y MC10

Como se observa en la Figura 26 la curva granulométrica de la mezcla MC10 mantiene la forma y tendencia de la MB, ubicándose dentro de los límites de control establecidos por la FHWA (2011).

La incorporación del 10 % de mineral carbonatado (calcita) produjo una ligera modificación en la zona media de la curva (tamices No. 8 y No. 200), donde se aprecia un ligero incremento en el contenido de finos respecto a la MB.

Con base en esta formulación, se elaboraron y compactaron especímenes con contenidos de cemento asfáltico de 6.0 %, 6.5 %, 7.0 %, 7.5 % y 8.0 %, siguiendo el mismo procedimiento aplicado a la mezcla base, con el objetivo de determinar el contenido óptimo de ligante (Pb).

Los resultados del diseño volumétrico de la mezcla base (MC 10) se presentan en la tabla 17.

Tabla 17 Diseño volumétrico MC 10

No. Pastilla	% de asfalto		Masa en aire	Gravedad específica de la mezcla compactada				Propiedades volumétricas de la mezcla				
	respecto a la mezcla	respecto al agregado		Masa SSS g	Masa en agua g	Gmb	Prom Gmb	Gmm	Váculos de aire %	VAM %	VFA %	Pbe
1A	6.00	6.38	4587.9	4630.1	2569.9	2.227	2.229	2.433	8.392	17.918	53.166	4.402
1B	6.00	6.38	4594.3	4634.6	2575.8	2.232						
2A	6.50	6.95	4600.4	4625.8	2574.6	2.243	2.244	2.416	7.098	17.798	60.117	4.910
2B	6.50	6.95	4606.5	4629.8	2578.9	2.246						
3A	7.00	7.53	4609.1	4630.6	2588.1	2.257	2.265	2.399	5.569	17.486	68.149	5.419
3B	7.00	7.53	4606.7	4623.3	2597.1	2.274						
4A	7.50	8.11	4610.2	4617.9	2599.3	2.284	2.283	2.382	4.143	17.281	76.023	5.927
4B	7.50	8.11	4608.9	4618.4	2598.8	2.282						
5A	8.00	8.70	4612.4	4616.7	2605.5	2.293	2.294	2.365	2.993	17.327	82.724	6.436
5B	8.00	8.70	4615.8	4615.8	2604.4	2.295						
Gmm promedio:			2.399	Gse:		2.665	Pba:		1.70			
Gsb combinado:			2.553	Gb:		1.030						

En la Figura 27 se presentan las gráficas de variación de las propiedades volumétricas en función del contenido de asfalto, donde se puede observar la tendencia de cada parámetro.

Las curvas se identifican de la siguiente manera: (a) vacíos de aire (Va), (b) vacíos en el agregado mineral (VMA), (c) vacíos llenos con asfalto (VFA) y (d) relación Filler–Asfalto (Dp).

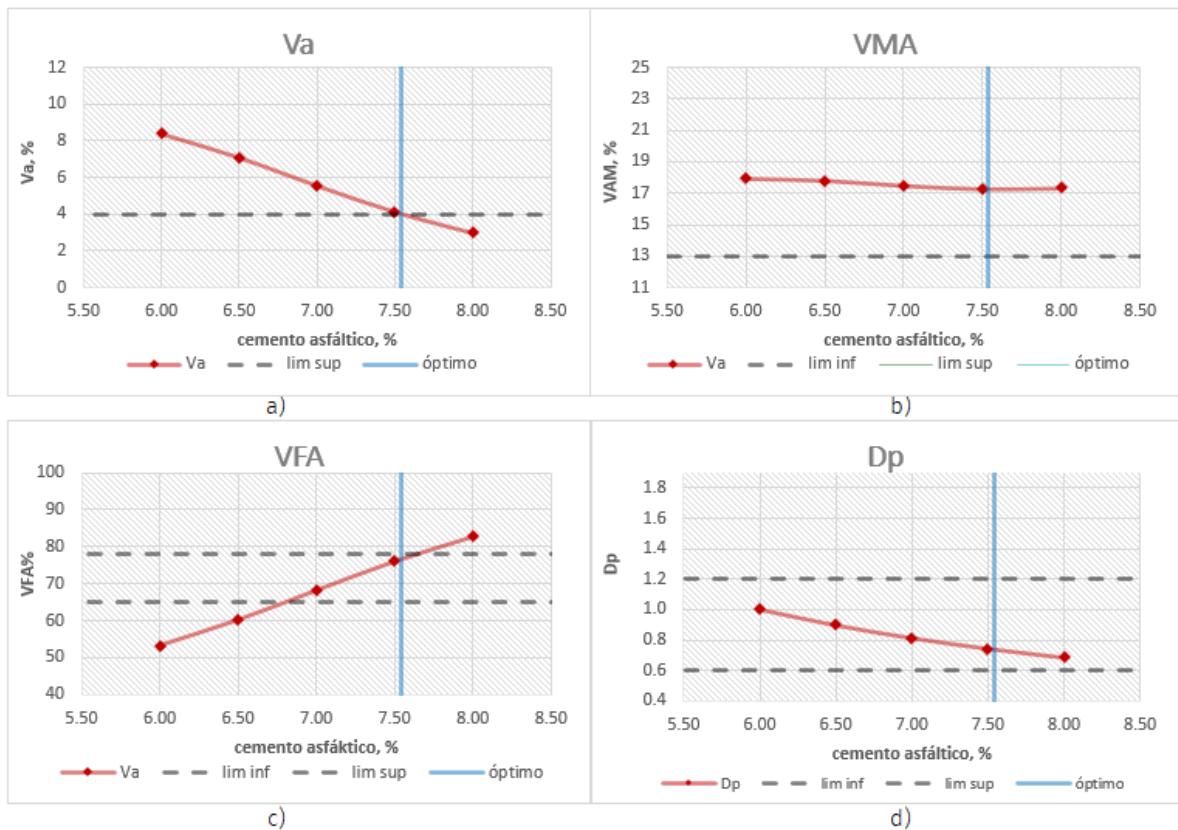


Figura 27 Gráficas de propiedades volumétricas de diseño MC 10

El contenido óptimo de ligante (Pb-óptimo) se determinó a partir de la gráfica de la Figura 27a, que muestra la variación del porcentaje de vacíos de aire (Va %) en función del contenido de cemento asfáltico (Pb %). El valor de Pb óptimo corresponde al punto donde la curva de Va % intercepta el valor de 4 %, conforme

a los criterios establecidos por el método Superpave. Una vez definido el contenido óptimo de ligante, este se utilizó para interceptar las gráficas de las demás propiedades volumétricas (VMA, VFA y D_p), con el fin de obtener los valores correspondientes a dicho contenido, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 18.

Tabla 18 Propiedades volumétricas respecto a contenido de asfalto óptimo de MC 10

Propiedad	Vol.	Resultado	Especificación
Pb % óptimo		7.54	-
G _{mb}		2.282	-
G _{mm}		2.377	-
V _a		4.0	4.0
VAM		17.3	13% mín
VFA		76.8	68 - 75 %
D _p		0.7	0.6 - 1.2

Los resultados obtenidos muestran que la mezcla MC10 cumple con todos los criterios volumétricos establecidos por el método Superpave.

El valor de vacíos llenos con asfalto (VFA = 76.8 %) se encuentra ligeramente por encima del límite superior recomendado (65–75 %), lo que indica una mayor proporción de vacíos ocupados por ligante dentro de la estructura mineral.

Este comportamiento puede atribuirse a la incorporación del material carbonatado, que incrementa la cantidad de partículas finas y promueve una mayor retención del ligante, generando una mezcla más densa.

Aunque el valor de VFA se encuentra fuera del rango especificado, se decidió proceder con la evaluación del desempeño mecánico de la mezcla, con el propósito de analizar su comportamiento frente a la deformación permanente y al agrietamiento, y determinar la influencia del mineral carbonatado sobre la respuesta

estructural de la mezcla, aun cuando sus parámetros volumétricos no cumplan completamente con las especificaciones de diseño.

4.2.3 Mezcla con 20% de sustitución (MC 20)

A partir de la estructura granulométrica definida para la mezcla base (MB), se formuló la mezcla modificada MC20, en la cual se sustituyó un 20 % del total del agregado pétreo por mineral carbonatado (calcita).

La sustitución se realizó mediante una reducción proporcional de las fracciones de grava (-10 %) y arena (-10 %), manteniendo la misma distribución general de la curva granulométrica base y garantizando el cumplimiento de los puntos de control establecidos por el método Superpave para mezclas con tamaño nominal máximo de 19.0 mm, quedando conformada por 40 % de grava de 1/2", 40 % de arena y 20 % de mineral carbonatado.

En la Tabla 19 se presentan los porcentajes que pasan por cada tamiz, mientras que en la Figura 28 se muestra la curva de distribución granulométrica comparativa entre la mezcla base (MB) y la mezcla modificada MC20.

Tabla 19 Composición granulométrica de la mezcla MC20

Abertura (mm)	Designación	% que pasa MC 20	Puntos de control TN 19.0 mm	
			1"	100
25		100	100	100
19	3/4"	100	90	100
12.5	1/2"	96		90
9.6	3/8"	86		
4.75	No. 4	57		
2.36	No. 8	36	23	49
1.18	No. 16	21		
0.6	No. 30	14		
0.3	No. 50	9		
0.15	No. 100	6		
0.075	No. 200	4.1	2	8

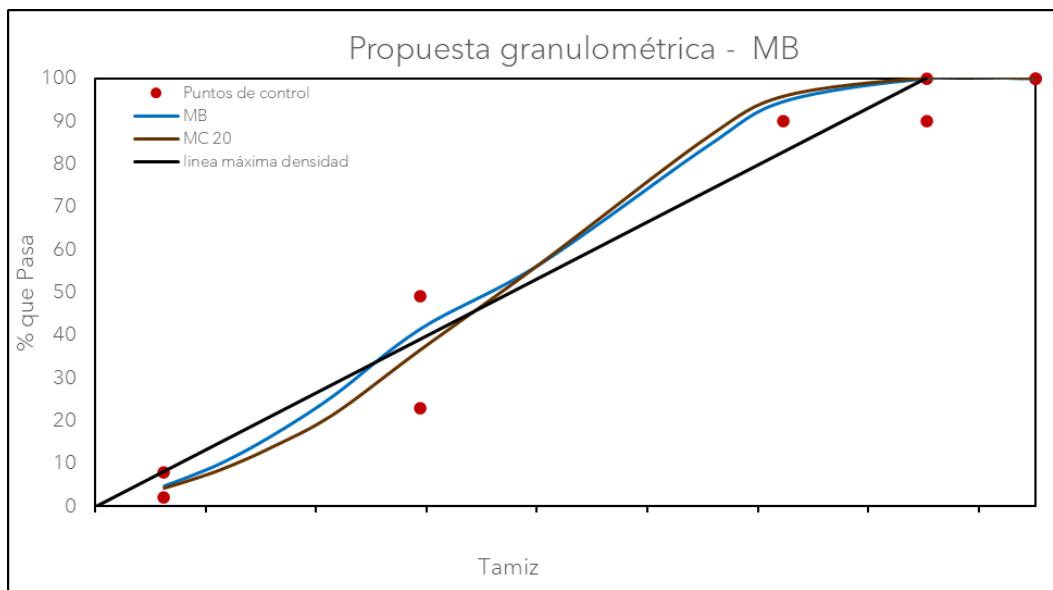


Figura 28 Curva granulométrica comparativa de las mezclas MB y MC20

Como se observa en la Figura 28, la curva granulométrica de la mezcla MC20 conserva la tendencia general de la mezcla base, ubicándose dentro de los límites de control del método Superpave (FHWA, 2011).

Sin embargo, se aprecia un incremento en el contenido de finos, principalmente en las fracciones correspondientes a los tamices No. 8 y No. 200, derivado del mayor porcentaje de sustitución con mineral carbonatado.

Esta condición produce una curva ligeramente más densa y desplazada hacia la zona inferior de la banda granulométrica, lo que sugiere una estructura más cerrada con menor volumen de vacíos intergranulares.

Con base en esta formulación, se elaboraron y compactaron especímenes con contenidos de cemento asfáltico de 6.0 %, 6.5 %, 7.0 %, 7.5 % y 8.0 %, siguiendo el mismo procedimiento aplicado a las mezclas anteriores, con el objetivo de determinar el contenido óptimo de ligante (Pb).

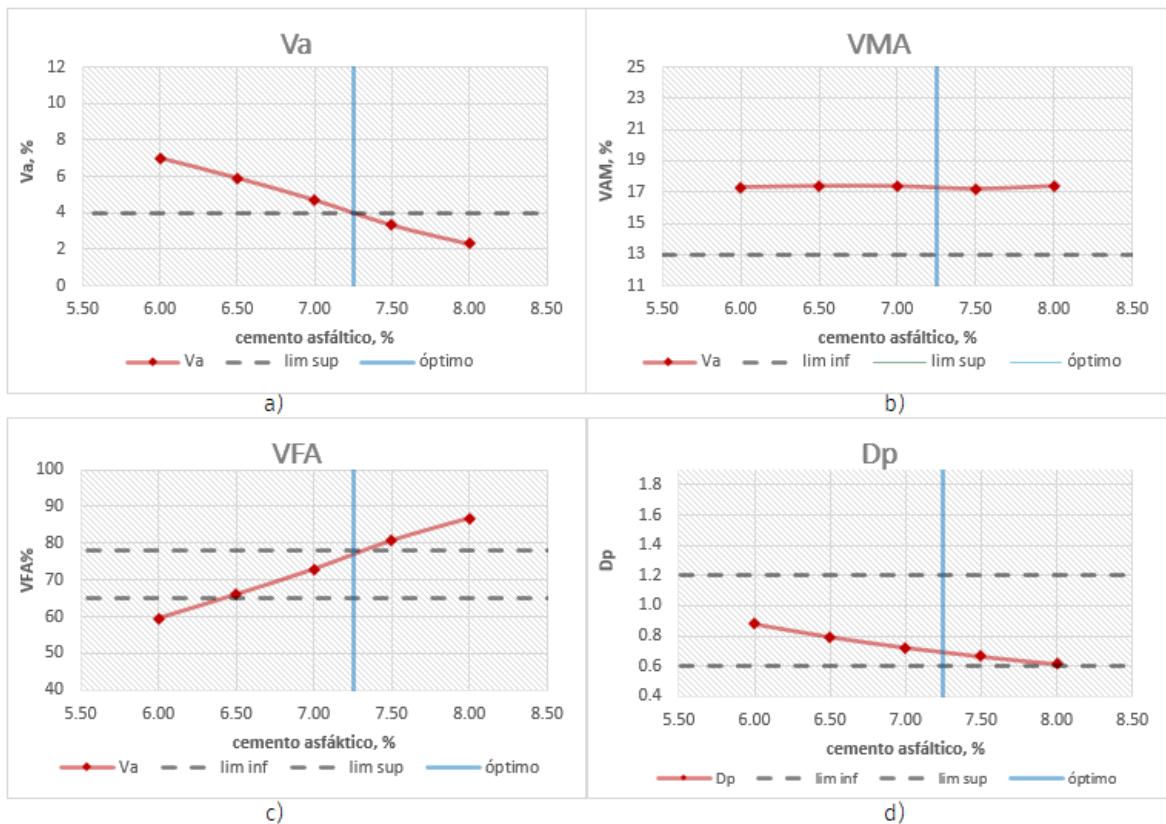
Los resultados del diseño volumétrico de la mezcla MC20 se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20 Diseño volumétrico MC 20

No. Pastilla	% de asfalto		Gravedad específica de la mezcla compactada					Propiedades volumétricas de la mezcla					
	respecto a la mezcla	respecto al agregado	Masa en aire	Masa SSS g	Masa en agua g	Gmb	Prom Gmb	Gmm	Váculos de aire %	VAM %	VFA %	Pbe	DP
1A	6.00	6.38	4595.7	4624.9	2589.9	2.258	2.259	2.430	7.009	17.292	59.469	4.652	0.887
1B	6.00	6.38	4593.8	4623.7	2591.4	2.260							
2A	6.50	6.95	4600.2	4625.9	2598.8	2.269	2.270	2.412	5.905	17.361	65.987	5.159	0.800
2B	6.50	6.95	4603.3	4627.8	2599.7	2.270							
3A	7.00	7.53	4617.8	4630.4	2605.8	2.281	2.282	2.395	4.699	17.351	72.917	5.666	0.729
3B	7.00	7.53	4619.0	4626.6	2603.6	2.283							
4A	7.50	8.11	4622.9	4625.4	2613.4	2.298	2.299	2.377	3.316	17.200	80.722	6.173	0.669
4B	7.50	8.11	4620.8	4624.8	2615.3	2.299							
5A	8.00	8.70	4628.4	4630.6	2624.1	2.307	2.307	2.360	2.280	17.357	86.865	6.680	0.618
5B	8.00	8.70	4625.7	4627.8	2622.4	2.307							
Gmm promedio:			2.395	Gse:		2.664	Pba:			1.43			
Gsb combinado:			2.568	Gb:		1.030							

En la Figura 29 se presentan las gráficas de variación de las propiedades volumétricas en función del contenido de asfalto, donde se observa la tendencia de cada parámetro.

Las curvas se identifican de la siguiente manera: (a) vacíos de aire (Va), (b) vacíos en el agregado mineral (VMA), (c) vacíos llenos con asfalto (VFA) y (d) relación Filler–Asfalto (Dp).



**Figura 29 Propiedades volumétricas de diseño Superpave para la mezcla MC20
(a) Va, (b) VMA, (c) VFA, (d) Dp.**

El contenido óptimo de ligante (Pb-óptimo) se determinó a partir de la gráfica de la Figura 29a, que muestra la variación del porcentaje de vacíos de aire (Va %) en función del contenido de cemento asfáltico (Pb %). El valor de Pb óptimo corresponde al punto donde la curva de Va % intercepta el valor de 4 %, conforme a los criterios establecidos por el método Superpave. Una vez definido el contenido óptimo de ligante, este se utilizó para interceptar las gráficas de las demás propiedades volumétricas (VMA, VFA y Dp), con el fin de obtener los valores correspondientes a dicho contenido.

Los valores resultantes se presentan en la Tabla 21, donde se resumen las propiedades volumétricas correspondientes al Pb óptimo determinado para la mezcla MC20.

Tabla 21 Propiedades volumétricas respecto al contenido de asfalto óptimo de la mezcla MC20

Propiedad	Vol.	Resultado	Especificación
Pb % óptimo		7.25	-
Gmb		2.288	-
Gmm		2.383	-
Va		4.0	4.0
VAM		17.3	13% mín
VFA		76.9	68 - 75 %
Dp		0.7	0.6 - 1.2

Los resultados muestran que la mezcla MC20 cumple con los criterios volumétricos establecidos por el método Superpave, aunque presenta un valor de vacíos llenos con asfalto ($VFA = 76.9\%$) ligeramente superior al límite máximo recomendado (65–75 %).

Este incremento indica una mayor proporción de vacíos ocupados por ligante, derivada del mayor contenido de partículas finas producto de la sustitución del 20 % de los agregados por mineral carbonatado (calcita).

Como consecuencia, la mezcla presenta una menor cantidad de vacíos de aire (Va) y una mayor densificación, lo que podría favorecer la cohesión interna y la resistencia al agrietamiento, aunque potencialmente incremente la susceptibilidad a la deformación permanente bajo cargas repetidas.

Aun cuando el valor de VFA se encuentra fuera del rango especificado, se decidió proceder con la evaluación del desempeño mecánico, con el objetivo de analizar los efectos de la sustitución del material carbonatado sobre el comportamiento

estructural de la mezcla y su respuesta frente a la deformación permanente y al agrietamiento.

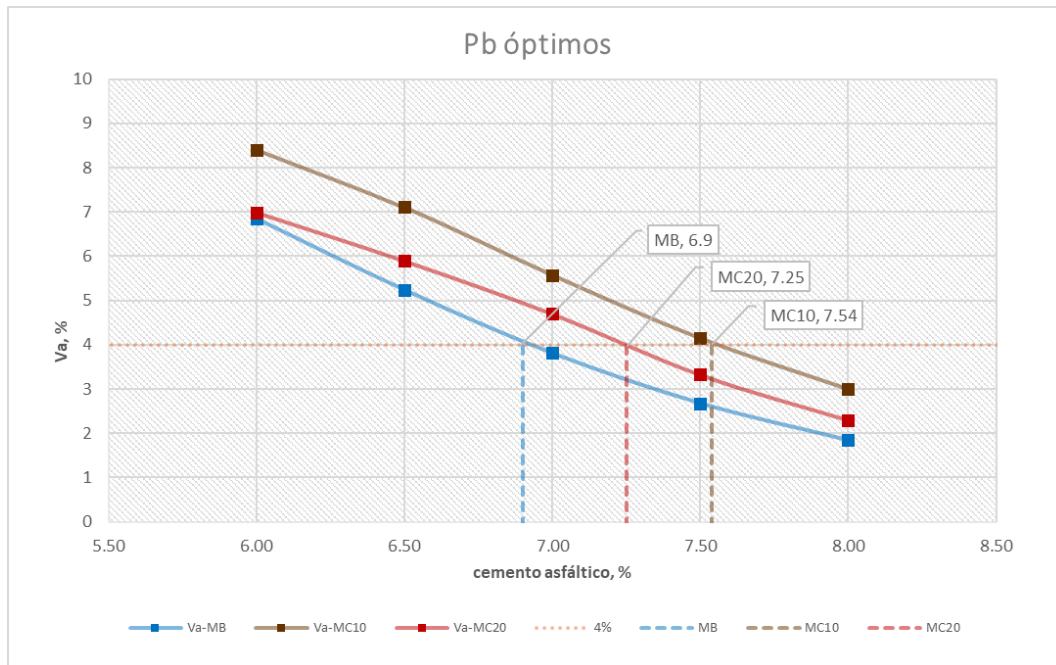


Figura 30 Determinación comparativa del Pb-óptimo (curvas Va-Pb)

En la Figura 30 se presentan los valores del contenido óptimo de ligante (Pb-óptimo) obtenidos para cada diseño de mezcla, determinados a partir de la condición de vacíos de aire ($V_a = 4\%$). Se observa que la mezcla base (MB) requirió un 6.90 % de cemento asfáltico, mientras que las mezclas modificadas MC10 y MC20 alcanzaron valores de 7.54 % y 7.25 %, respectivamente.

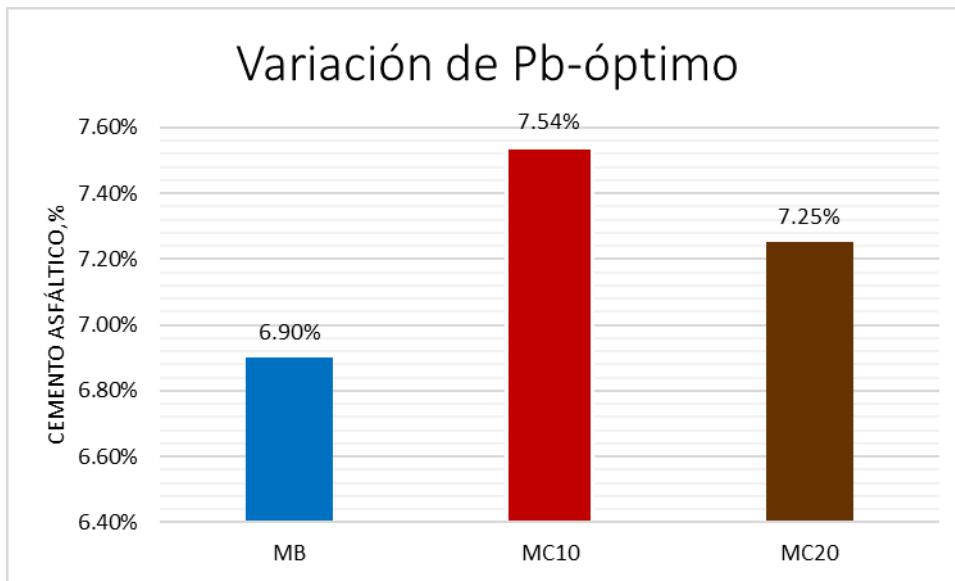


Figura 31 Variación del contenido óptimo de cemento asfáltico entre mezclas

La Figura 31 resume esta variación, mostrando que ambas mezclas modificadas presentan un incremento del contenido de ligante respecto a la mezcla base, aunque el valor correspondiente a MC20 es ligeramente menor que el de MC10. Esta diferencia puede atribuirse a ajustes en la distribución granulométrica y a la interacción específica del mineral carbonatado con el ligante, que influyen en la demanda de asfalto para alcanzar el nivel de vacíos de aire especificado.

En términos de diseño, este comportamiento sugiere que las mezclas modificadas presentan una mayor demanda de ligante y una estructura más densa, en la siguiente fase se evaluó la forma en que esto influye en su desempeño frente al agrietamiento y la deformación permanente.

4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos de desempeño mecánico realizados a las mezclas asfálticas MB, MC10 y MC20, diseñadas conforme a la metodología Superpave.

El objetivo de esta etapa fue evaluar el efecto de la sustitución parcial del agregado pétreo por mineral carbonatado (calcita) sobre el comportamiento frente a la deformación permanente y al agrietamiento, mediante la aplicación de pruebas normalizadas que reproducen las condiciones reales de carga y temperatura de servicio de un pavimento.

4.3.1 Resistencia a la deformación permanente

Con el propósito de evaluar la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas, se aplicó el método de ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo, conforme a la norma AASHTO T 324 “Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures”. Este ensayo permite cuantificar la profundidad de rodera generada por carga cíclica bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, proporcionando una medida directa de la estabilidad plástica de la mezcla.

Para cada diseño de mezcla [mezcla base (MB), mezcla con 10 % de sustitución (MC10) y mezcla con 20 % (MC20)] se fabricaron cuatro especímenes, a fin de garantizar la representatividad estadística de los resultados. En la Tabla 22 se presentan los valores individuales obtenidos y los promedios correspondientes de la profundidad de deformación.

Tabla 22 Resultados de resistencia a la deformación permanente

No. Ensayo	Deformación, mm		
	MB	MC10	MC20
1	2.3725	2.5722	2.4314
2	2.4311	2.6265	2.4739
3	2.4826	2.6605	2.5055
4	2.5081	2.6871	2.5812
Promedio	2.4486	2.6366	2.4980

Los resultados muestran una variación mínima entre réplicas, con diferencias inferiores a 0.3 mm, lo que refleja una adecuada reproducibilidad del procedimiento. Las tres mezclas presentan deformaciones muy por debajo del límite máximo de 10 mm establecido por la AASHTO T 324 y la especificación AMAAC RA-05 (2024) para mezclas de alto desempeño, lo que evidencia un comportamiento satisfactorio frente al ahuellamiento.

En la Figura 32 se presenta la gráfica de desempeño, elaborada con los valores promedio de cada diseño de mezcla. Aunque el límite normativo es de 10 mm, el eje vertical se muestra únicamente hasta 3 mm para visualizar con mayor claridad las diferencias de comportamiento entre los diseños.

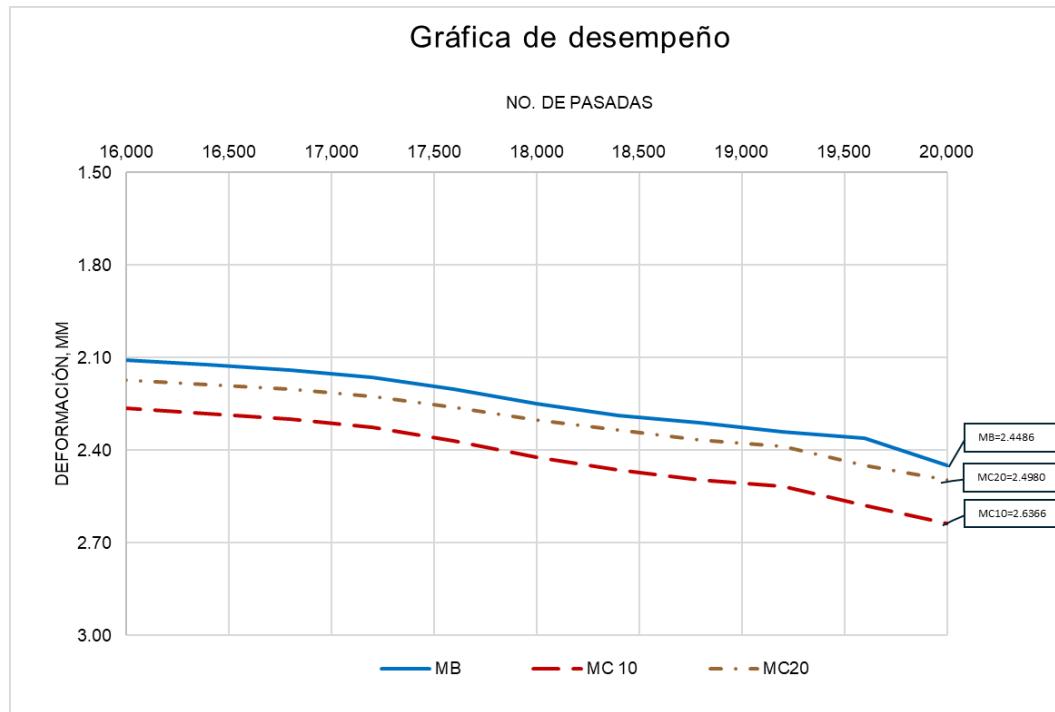


Figura 32 Deformación permanente promedio a las 20,000 pasadas de MB, MC 10 Y MC 20.

La comparación de resultados promedio indica una ligera tendencia al incremento de la deformación en la mezcla MC10, mientras que MC20 presentó un valor intermedio, apenas superior al de la mezcla base.

En términos relativos:

- MC10 mostró una deformación 7.7 % mayor que MB.
- MC20 presentó una deformación 2.0 % mayor que MB.

En la Figura 33 se presenta la comparación gráfica de la deformación permanente promedio obtenida para los tres diseños de mezcla. La representación confirma las variaciones porcentuales previamente descritas y permite visualizar la diferencia relativa en el desempeño de cada mezcla frente al ahuellamiento.

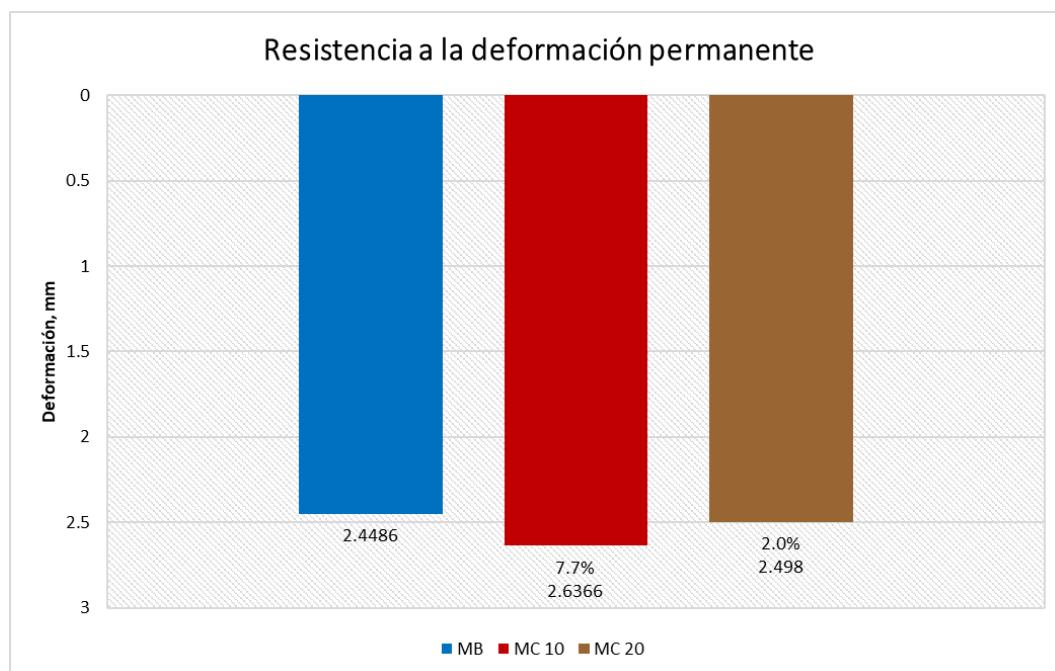


Figura 33 Comparación de la deformación permanente promedio a 20 000 pasadas para MB, MC10 y MC20.

Aunque las diferencias son pequeñas, estos resultados sugieren que la adición de calcita modifica la rigidez de la estructura granular y la interacción ligante-agregado. En el caso de MC10, la leve disminución de estabilidad podría asociarse a una redistribución de fracciones finas que reduce marginalmente la fricción interna y el incremento en la demanda de cemento asfáltico; sin embargo, al incrementar la sustitución a 20 %, la mayor presencia del mineral carbonatado favorece el empaquetamiento del esqueleto pétreo y una mejor cohesión de la matriz asfáltica, aun cuando la demanda de asfalto es menor que la mezcla con el 10% de sustitución, equilibrando la respuesta frente al esfuerzo repetido.

En contraste con lo reportado por Moghadas *et al.* (2015) y Chen *et al.* (2020), quienes documentaron reducciones de hasta 30 % en la deformación permanente al incorporar carbonato de calcio como relleno mineral, en el presente estudio se observó un ligero incremento de 7.7 % y 2.0 % para las mezclas MC10 y MC20, respectivamente, respecto a la mezcla base.

Este comportamiento puede atribuirse a diferencias en los tamaños de partícula utilizados en la investigación, la demanda óptima de cemento asfáltico y el nivel de sustitución empleado, factores que influyen directamente en la rigidez y la densificación del esqueleto granular.

Aun con dicho aumento, las tres mezclas se mantuvieron muy por debajo del límite normativo de 10 mm de rodera (AASHTO T 324; AMAAC RA-05, 2024), lo que confirma una adecuada estabilidad plástica.

Resultados similares fueron descritos por Josephia (2009), quien destacó que el empleo de agregados calizos puede modificar la compactabilidad y la interacción asfalto-agregado, incrementando la cohesión interna sin afectar la durabilidad estructural.

4.3.2 Resistencia al agrietamiento

Cabe señalar que, aunque inicialmente se había previsto aplicar el ensayo de viga a cuatro puntos para la evaluación de la resistencia al agrietamiento, se optó por utilizar el método IDEAL-CT (Indirect Tensile Cracking Test) conforme a la norma ASTM D8225-19, debido a su mayor practicidad, rapidez de ejecución y disponibilidad de equipo, sin comprometer la validez ni la reproducibilidad de los resultados. Esta sustitución metodológica permitió mantener la confiabilidad del análisis de resistencia a la fisuración y asegurar la comparabilidad entre los diseños de mezcla evaluados.

De acuerdo con el procedimiento descrito en el apartado 3.3.2, se realizaron cuatro ensayos IDEAL-CT por cada diseño de mezcla (MB, MC10 y MC20), siguiendo los lineamientos de la ASTM D8225-19. En la Tabla 23 se presentan los resultados individuales de cada réplica y los valores promedio del Índice de Tolerancia al Agrietamiento (CTIndex) obtenidos a 25 °C.

Tabla 23 Resultados de resistencia al agrietamiento

No. Ensayo	Índice de tolerancia al agrietamiento (CT Index)		
	MB	MC10	MC20
1	126.26	280.53	276.90
2	127.52	305.55	252.82
3	120.07	281.14	272.56
4	122.41	305.45	282.50
Promedio	124.06	293.17	271.19

Los resultados permiten cuantificar la resistencia de las mezclas a la iniciación y propagación de grietas bajo esfuerzos de tracción indirecta, proporcionando un parámetro confiable para caracterizar el desempeño frente al agrietamiento por fatiga.

En la Figura 34 se muestran las curvas carga-desplazamiento representativas de cada diseño de mezcla. Dichas curvas evidencian un comportamiento típico de

fractura frágil en la mezcla base, mientras que las mezclas modificadas con mineral carbonatado presentan un área bajo la curva mayor, lo que refleja mayor capacidad de absorción de energía antes de la ruptura.

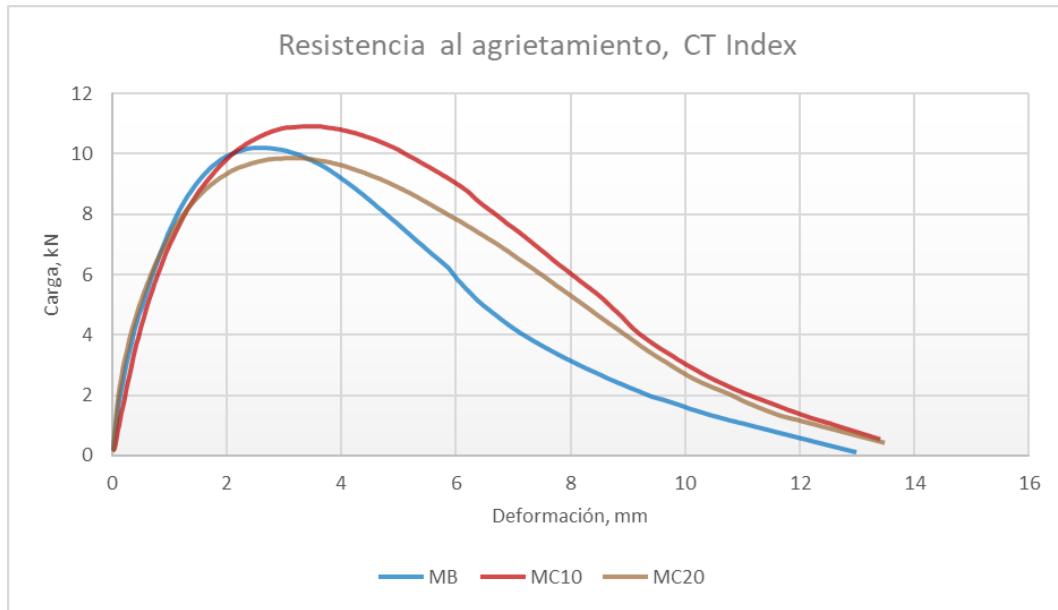


Figura 34 Curvas carga-desplazamiento del ensayo IDEAL-CT para las mezclas MB, MC10 y MC20

Para facilitar la comparación global, en la Figura 35 se ilustra el valor promedio del CTIndex para cada mezcla.

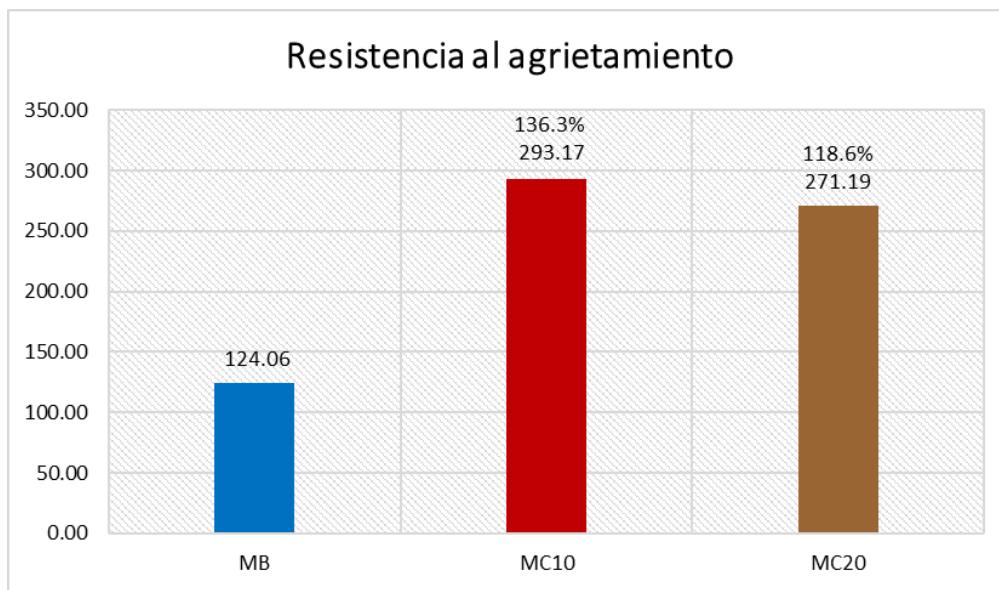


Figura 35 Valores de resistencia al agrietamiento para MB, MC10 Y MC20

Estos valores reflejan una mejor resistencia al agrietamiento en las mezclas modificadas, atribuible a la acción del carbonato de calcio (CaCO_3), que mejora la adherencia ligante-agregado y contribuye a una mayor cohesión interna. En particular, la mezcla MC10 alcanzó el valor más alto de CTIndex (293.17), indicando un comportamiento más dúctil y una capacidad superior para resistir la propagación de grietas.

El leve descenso observado en MC20 respecto a MC10 podría asociarse a un incremento excesivo de rigidez al elevar el contenido de mineral carbonatado, lo cual reduce ligeramente la deformabilidad antes de la fractura. Aun así, su desempeño se mantuvo muy por encima del valor obtenido para la mezcla base.

Los resultados de resistencia al agrietamiento obtenidos en este estudio se encuentran en concordancia y por encima del incremento de la resistencia al agrietamiento registrado por Yarahmadi *et al.* (2023), quienes registraron 40% menos fatiga al incorporar carbonato de calcio como filler.

El aumento del CTIndex en la mezclas con susitución (superior al 100 % respecto a la base) confirma esta tendencia y demuestra una mejora significativa en la capacidad de absorción de energía antes de la fractura.

De igual forma, López *et al.* (2017) destacan que la adherencia ligante–agregado es un factor crítico para el rendimiento del pavimento, lo que explica el comportamiento más dúctil y resistente al agrietamiento de las mezclas modificadas.

4.3.3 Aplicaciones potenciales del material desarrollado

Los resultados obtenidos en esta investigación indican que las mezclas desarrolladas son adecuadas para pavimentos sometidos a niveles de tránsito medio a alto, equivalentes a 3–30 millones de ejes equivalentes de 8.2 t.

De acuerdo con el Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013: Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño, este rango corresponde al Nivel III de tránsito, que incluye carreteras federales tipo A, autopistas de cuota, vialidades urbanas principales y caminos interestatales, donde se busca un equilibrio entre resistencia al ahuellamiento y tolerancia al agrietamiento.

El mismo protocolo establece que, para este nivel de tránsito, deben emplearse 8 giros (Nini), 100 giros (Ndiseño) y 160 giros (Nmáx) en el proceso de compactación giratoria (AMAAC, 2013). Estos parámetros fueron utilizados en los diseños volumétricos de las mezclas MB, MC10 y MC20, garantizando la correspondencia entre las condiciones de laboratorio y las solicitudes reales esperadas en el carril de diseño.

Los resultados confirman que la sustitución parcial de agregados pétreos por calcita es una alternativa técnica viable dentro del rango de diseño definido por el Protocolo AMAAC PA-MA-01/2013, al mejorar la durabilidad estructural y la resistencia al agrietamiento de pavimentos de alto desempeño. En este contexto, las mezclas MC10 y MC20 presentaron un comportamiento favorable frente al agrietamiento y a

la deformación permanente, resultando idóneas para capas de rodadura o intermedias en carreteras alimentadoras, troncales o vialidades urbanas con tráfico pesado moderado.

Estas aplicaciones son coherentes con los criterios de diseño descritos en el Tabulador de Costos Paramétricos para la Construcción y Modernización de la Infraestructura Carretera (SICT, 2020), que asocia los tipos de pavimento y estructura con los rangos de ejes equivalentes definidos por la Dirección General de Servicios Técnicos. En conjunto, la sustitución parcial de agregados pétreos por calcita se perfila como una opción técnica y ambientalmente viable, capaz de prolongar la vida útil del pavimento y reducir la frecuencia de mantenimiento.

Finalmente, los resultados obtenidos muestran una coherencia general con las tendencias documentadas en la literatura sobre el uso del carbonato de calcio (CaCO_3) en mezclas asfálticas. Yarahmadi et al. (2023) y López et al. (2017) destacan que este material mejora la adherencia ligante–agregado y la resistencia al agrietamiento, efecto confirmado en las mezclas MC10 y MC20 mediante el incremento del CTIndex respecto a la mezcla base. De manera complementaria, Chen et al. (2020) y Moghadas et al. (2015) señalan que la incorporación de relleno mineral puede fortalecer la mezcla y modificar su respuesta frente a la deformación permanente; en este estudio, aunque se registró un incremento moderado en la rodera (7.7 % y 2.0 %), los valores permanecieron muy por debajo del límite normativo de 10 mm, confirmando una adecuada estabilidad plástica. Por su parte, Josephia (2009) y Fonseca (2000) enfatizan que el uso de agregados calizos contribuye a mejorar la durabilidad y el rendimiento estructural del pavimento, aspectos evidenciados en el desempeño obtenido y en las posibles aplicaciones de las mezclas modificadas para vialidades de tránsito medio a alto.

En síntesis, los hallazgos experimentales se ubican dentro de los rangos de mejora reportados en la literatura, validando la viabilidad técnica y funcional del mineral

carbonatado como sustituto parcial de agregados pétreos en mezclas asfálticas de alto desempeño.

4.4 Comparación de investigación de México y de Colombia

Durante la estancia de investigación en la Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia), en colaboración con el Grupo de Procesos Fisicoquímicos Aplicados (PFA). Se realizó una investigación con el propósito de evaluar el efecto de un mineral carbonatado (calcita) en mezclas asfálticas en caliente, como parte de una fase exploratoria del proyecto de tesis, orientada a determinar su influencia en las propiedades volumétricas y mecánicas básicas de las mezclas.

En esta etapa, el diseño se llevó a cabo bajo el método volumétrico Marshall, utilizando probetas compactadas con martillo Marshall y dimensiones normalizadas de acuerdo con ASTM D6927.

Se elaboraron tres mezclas: una mezcla base (M0) y dos mezclas modificadas con 10 % (M1) y 20 % (M2) de sustitución parcial del agregado pétreo por mineral carbonatado.

El análisis incluyó la determinación del contenido óptimo de asfalto, la estabilidad y el flujo Marshall, con el objetivo de identificar las variaciones inducidas por la presencia de calcita.

Los resultados mostraron un incremento en la demanda de cemento asfáltico con la incorporación del mineral carbonatado.

La mezcla con 10 % de sustitución (M1) presentó el mayor contenido óptimo de asfalto (5.88 %), mientras que la mezcla con 20 % (M2) mostró una ligera disminución (5.56 %), aunque se mantuvo por encima de la mezcla base (5.52 %).

También se observó una ligera reducción de la estabilidad Marshall y un aumento del flujo, lo que sugiere mayor deformabilidad en las mezclas modificadas.

Aunque el procedimiento de compactación, la geometría de las probetas y los equipos empleados diferían respecto a los utilizados posteriormente en México, el comportamiento general fue similar.

En ambos estudios, la sustitución del 10 % de calcita provocó un incremento del contenido óptimo de asfalto, y al elevar la sustitución al 20 %, el valor disminuyó ligeramente, pero sin regresar al nivel de la mezcla base.

La Figura 36 ilustra esta tendencia de comportamiento común observada en ambas investigaciones.

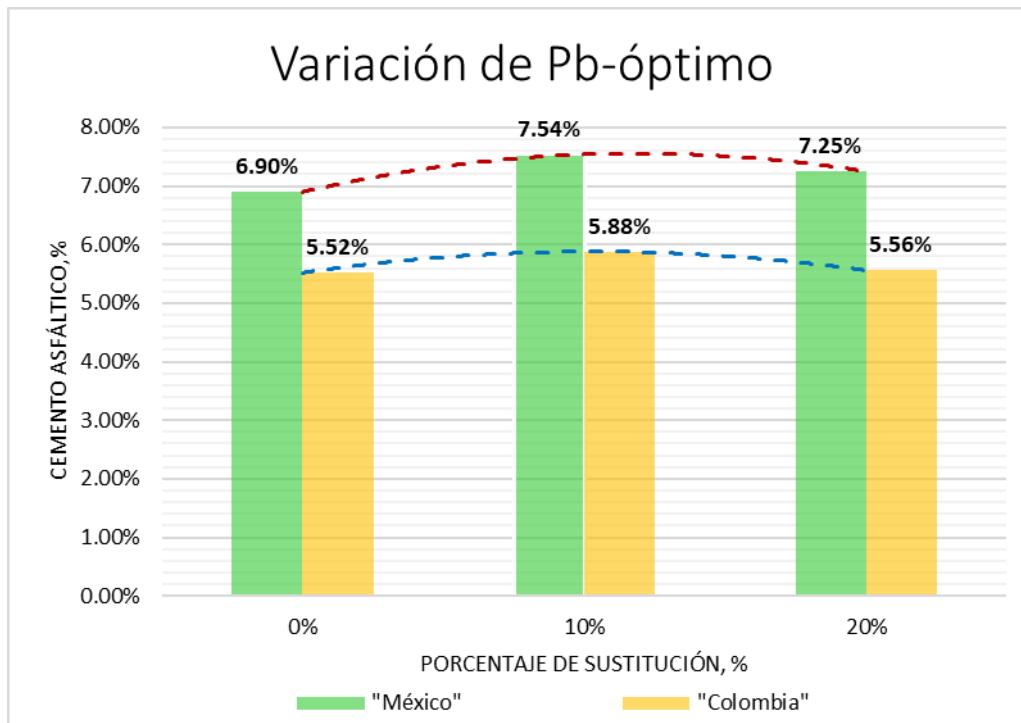


Figura 36 Variación del contenido óptimo de cemento asfáltico con la incorporación de calcita (M0, M1 y M2).

Los análisis mineralógicos mediante difracción y fluorescencia de rayos X (DRX y FRX) confirmaron que tanto el mineral empleado en Colombia como el utilizado en México correspondían a calcitas de alta pureza, con contenidos predominantes de carbonato de calcio (CaCO_3).

Esta similitud mineralógica explica el comportamiento comparable en el contenido de ligante y la respuesta volumétrica, pese a las diferencias en materiales, método de compactación y condiciones de laboratorio.

Los resultados obtenidos en Colombia constituyeron una base experimental valiosa, ya que permitieron confirmar la influencia de la calcita en la absorción del ligante y en el comportamiento volumétrico de las mezclas.

A partir de esta experiencia, el trabajo de tesis en México amplió el alcance hacia el análisis del desempeño mecánico avanzado, mediante los ensayos de Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324) y IDEAL-CT (ASTM D8225-19), con los cuales se evaluaron la resistencia a la deformación permanente y al agrietamiento, respectivamente.

En conjunto, ambos estudios muestran un comportamiento coherente y complementario:

En la estancia de movilidad (Colombia) se caracterizó el efecto volumétrico y de absorción de ligante mediante el método Marshall.

En la tesis (México) se analizó la influencia del mineral en el desempeño mecánico y la durabilidad, validando que la calcita incrementa la demanda de ligante y mejora la resistencia al agrietamiento, sin afectar negativamente la estabilidad estructural.

5. CONCLUSIONES

- I. Los resultados evidencian que el efecto del mineral carbonatado sobre las propiedades mecánicas de las mezclas reduce el agrietamiento pero aumenta ligeramente la deformación, por lo que se concluye que la hipótesis se cumple parcialmente.
- II. En lo referente a la deformación permanente, los valores de rodera obtenidos para las mezclas con 10 % y 20 % de sustitución (MC10 y MC20) fueron similares o ligeramente superiores a los de la mezcla base, por lo que no se registró la reducción esperada del 15 – 20 %. No obstante, todas las mezclas cumplieron con los límites establecidos por AASHTO T 324 y AMAAC RA-05 (2024), confirmando que la incorporación de calcita no compromete la estabilidad estructural del pavimento, aunque tampoco la mejora.

- III. En contraste, los resultados del ensayo IDEAL-CT (ASTM D8225-19) mostraron un incremento muy significativo en el Índice de Tolerancia al Agrietamiento (CTIndex). La mezcla MC10 alcanzó un aumento del 136 % respecto a la mezcla base, mientras que MC20 incrementó en 118 %, superando ampliamente la mejora esperada en la hipótesis. Por lo tanto, si se cumple la hipótesis en el componente de agrietamiento, demostrando que el mineral carbonatado actúa como refuerzo microestructural que mejora la adherencia ligante-agregado y la capacidad de la mezcla para disipar esfuerzos de tracción.
- IV. El análisis integral indica que la calcita modifica la rigidez del sistema agregado-ligante, incrementando la cohesión interna y favoreciendo la resistencia a la tracción indirecta, aunque sin alterar significativamente el comportamiento frente a cargas repetidas. La mezcla con 10 % de sustitución (MC10) se identificó como la formulación de mejor desempeño global, al combinar un adecuado control de deformación y una marcada mejora en la tolerancia al agrietamiento.
- V. Desde una perspectiva técnica y ambiental, la utilización de mineral carbonatado como sustituto parcial de agregados pétreos representa una alternativa viable y sostenible, al mantener la funcionalidad estructural del pavimento y mejorar su durabilidad frente al agrietamiento, contribuyendo así a una reducción en la frecuencia de mantenimiento y en el consumo de materiales vírgenes.
- VI. El conocimiento generado permite distinguir el rol del mineral carbonatado como modificador de la resistencia a la fisuración, más que como agente de refuerzo para la resistencia a la deformación plástica. Este hallazgo proporciona una base experimental sólida para orientar futuros trabajos hacia

la optimización del porcentaje de sustitución y la evaluación del desempeño a largo plazo bajo condiciones reales de servicio.

6. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se proponen las siguientes líneas de trabajo para profundizar en el estudio del uso de minerales carbonatados en mezclas asfálticas:

- Análisis del comportamiento frente al daño por humedad. Incorporar ensayos como el Tensile Strength Ratio (TSR) para determinar la susceptibilidad de la adherencia entre asfalto–agregado en presencia de agua y su efecto en la durabilidad de la mezcla.
- Estudio de mezclas con mayores porcentajes de sustitución. Evaluar el desempeño mecánico y volumétrico de mezclas con niveles de reemplazo superiores (30 %, 40 % y 45 %), a fin de identificar el umbral óptimo que maximice la resistencia sin comprometer la estabilidad estructural.
- Aplicación del diseño balanceado de mezclas asfálticas. Implementar el enfoque de diseño balanceado (Balanced Mix Design, BMD) para integrar simultáneamente criterios de deformación permanente y agrietamiento, ajustando el contenido óptimo de ligante y el porcentaje de sustitución con calcita.
- Evaluación del desempeño a largo plazo en campo. Validar los resultados de laboratorio mediante la implementación de tramos de prueba en carreteras reales, con monitoreo periódico del comportamiento frente al tráfico y las condiciones ambientales.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ahmedzade, P., y Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165 (1-3), 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2006). *ASTM C136-06. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. ASTM International. <https://www.astm.org/c0136-06.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2015). *ASTM C127-15. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate*. ASTM International. <https://www.astm.org/c0127-15.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2016). *ASTM D6648-08(2016). Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)*. ASTM International. <https://www.astm.org/d6648-08r16.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2017a). *ASTM D6928-17. Standard test method for resistance of coarse aggregate to degradation by abrasion in the Micro-Deval apparatus*. ASTM International. <https://www.astm.org/d6928-17.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2017b). *ASTM D5821-13(2017). Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate*. ASTM International. <https://www.astm.org/d5821-13r17.html>

American Society for Testing and Materials International. (2017c). *ASTM D2726-17. Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures (asphalt)*. ASTM International. <https://www.astm.org/d2726-17.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2018). *ASTM D92-18. Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester*. ASTM International. <https://www.astm.org/d0092-18.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2020a). *ASTM C131-20. Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine*. ASTM International. <https://www.astm.org/c0131-20.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2020b). *ASTM D7405-20. Standard test method for multiple stress creep and recovery (MSCR) of asphalt binder using a dynamic shear rheometer*. ASTM International. <https://www.astm.org/d7405-20.html>

American Society for Testing and Materials International. (2021). *ASTM D6925-15a (2021). Standard test method for preparation and determination of the relative density of asphalt mix test specimens by means of the Superpave gyratory compactor*. ASTM International. <https://www.astm.org/d6925-15a.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2022a). *ASTM D2419-22. Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate*. ASTM International. <https://www.astm.org/d2419-22.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2022b). *ASTM D2872-22. Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt binder (Rolling Thin-Film Oven Test)*. ASTM International. <https://www.astm.org/d2872-22.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2022c). *ASTM D6521-22. Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV)*. ASTM International. <https://www.astm.org/d6521-22.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2023a). *ASTM C128-23. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate*. ASTM International. <https://www.astm.org/c0128-23.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2023b). *ASTM D4791-19(2023). Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate*. ASTM International. <https://www.astm.org/d4791-19r23.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2023c). *ASTM C1252-23. Standard test methods for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture, and grading)*. ASTM International. <https://www.astm.org/c1252-23.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2023d). *ASTM D7175-23. Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer*. ASTM International. <https://www.astm.org/d7175-23.html>

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2024). *ASTM C88-24. Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate*. ASTM International. <https://www.astm.org/c0088-24.html>

Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M. W., y Sivakugan, N. (2014). Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications. *Materials and Structures*, 47(8), 1301-1312. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000652](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652)

Asphalt Institute. (2007). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*. Asphalt Institute.

Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (AMAAC). (2013). Protocolo PA-MA-01/2013: *Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño*. México: AMAAC.

Asociación Mexicana del Asfalto, A. C. (2010a). *Recomendación AMAAC RA 08/2010*. Ciudad de México.

Asociación Mexicana del Asfalto, A. C. (2010b). *Recomendación AMAAC RA-05/2010*. Ciudad de México.

Ayala del Toro, Y., Delgado Alamilla, H., Guzmán Ortiz, D. V., y Salazar Rivera, A. Z. (2018). *Manual de ensayos para laboratorio. Mezclas asfálticas en caliente (MAC) – Parte 1: Para el cálculo de volumetría y ensayos de desempeño* (Publicación Técnica No. 516). Instituto Mexicano del Transporte. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/PT516.pdf>

Chen, Y., Xu, S., Tebaldi, G., y Romeo, E. (2020). Role of mineral filler in asphalt mixture. *Road Materials and Pavement Design*, 23(2), 247-286. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1826351>

Chowdhury, R., Al Biruni, M. T., Afia, A., Hasan, M., Islam, M. R., & Ahmed, T. (2023). Medical Waste Incineration Fly Ash as a Mineral Filler in Dense Bituminous Course in Flexible Pavements. *Materials*, 16(16), 5612. <https://doi.org/10.3390/ma16165612>.

Cuevas, J. (2021). Evaluación a la fatiga de concreto asfáltico modificado con residuos de construcción y demolición [Tesis de licenciatura, Universidad Santo Tomás]. Villavicencio, Colombia.

De Leeuw, N., y Parker, S. (1998). Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: An atomistic approach. *The*

Journal of Physical Chemistry B, 102(16), 2914–2922.
<https://doi.org/10.1021/jp973210f>

Federal Highway Administration. (s.f.). *Superpave fundamentals reference manual* (NHI Course No. 131053). U.S. Department of Transportation, National Highway Institute.

Fonseca, (2000). Estudio de deformaciones plásticas permanentes (rutting) en mezclas asfálticas elaboradas con materiales de la zona Noreste de México mediante la máquina de pista (wheel tracking). *Ingeniería de Construcción*, 15(2). <https://redae.uc.cl/index.php/ric/article/download/17363/14193/36239>

Garnica, P., Delgado H., y Sandoval, C. (2005a) P.T. No. 271 *Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado el 06 de noviembre de 2023 de <https://imt.mx/descarga-archivo.html?I=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNpb25lcy9QdWJsaWNhY2lvbIRlY25pY2EvcHQyNzEucGRm>.

Garnica, P., Flores, M., Gómez, J., Delgado, H. (2005b) P.T. No. 267 *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Recuperado el 13 de noviembre de 2023 de <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt267.pdf>.

González, J., Pérez-Rea, M. de la L., Hernández-Padrón, G., y Castellanos-Cordero, A. (2024). Diseño balanceado de mezcla asfáltica en caliente con pavimento recuperado (RAP) y agregado virgen. *Ingeniería Investigación y Tecnología, Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XXV*, 25(01), 1-11. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.1.008>

Huang B, Shu X, Burdette EG (2006), "Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements". *Magazine of Concrete Research*, Vol. 58 No. 5 pp. 313–320, doi: <https://doi.org/10.1680/macr.2006.58.5.313>.

Huang, Y. H., Bird, R. N., y Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>

Jiménez, J. R., Ayuso, J., Galvín, A. P., López, M., & Agrela, F. (2012). Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Construction and Building Materials*, 34, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.042>.

Josephia, R. (2009). *Materiales calizos como agregado grueso en mezclas asfálticas en caliente*. [Tesis de maestría, Universidad Técnica de Oruro]. Biblioteca Digital ODUCAL.
<https://bibliotecadigital.oducal.com/Record/oai:ucb.edu.bo:biblio:215235>

Joumblat, R., Al Basiouni Al Masri, Z., Al Khateeb, G., Elkordi, A., El Tallis, A. R., & Absi, J. (2023). State-of-the-Art Review on Permanent Deformation Characterization of Asphalt Concrete Pavements. *Sustainability*, 15(2), 1166. <https://doi.org/10.3390/su15021166>.

Leiva, F., Pérez, E., Aguilar, J., y Loría, L. (2017) Modelo de deformación permanente para la evaluación de la condición del pavimento. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, 32(1), 37-46. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732017000100004>.

Leon, L. P., Roopnarine, K., Azamathulla, H. M., Chadee, A. A., & Rathnayake, U. (2023). A performance-based design framework for enhanced asphalt concrete in

the Caribbean region. *Buildings*, 13(7), 1661.
<https://doi.org/10.3390/buildings13071661>

López, Y., Chaves, A., Akbulut, M., Cheng, Z., y Hoyos, L. (2017). Fuerzas de adhesión en mezclas asfálticas a escala nanométrica. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 7(1), 59-72. <https://doi.org/10.29047/01225383.65>

Loría, G., y Arce, M. (2003). *Análisis de fatiga en mezclas asfálticas. Reporte de investigación* (LM-PI-PV-IN-XX-02). Recuperado el 20 de octubre de 2023 de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1200/LM-PI-PV-IN-XX-2%20An%C3%A1lisis%20de%20fatiga%20en%20mezclas%20asf%C3%A1lticas%20Fase%201.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mamlouk, M. S., y Zaniewski, J. P. (2011). *Materials for civil and construction engineers* (3rd ed.). Pearson.

Manfro, A., Staub, J., Villena, J., y Borba, W. (2022). Permanent deformation performance under moisture effect of an asphalt mixture modified by calcium carbonate nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 342(B), 128087. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128087>

Meroni, Fabrizio & Flintsch, Gerardo & Habbouche, Jhony & Diefenderfer, Brian & Giustozzi, Filippo. (2021). Three-level performance evaluation of high RAP asphalt surface mixes. *Construction and Building Materials*. 309. 125164. [10.1016/j.conbuildmat.2021.125164](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125164).

Modupe, A., Aladegboye, D., Alejolowo, E., Orogbade, B., Akade, G., y Akinmolayan, O. (2021) Performance evaluation of asphalt concrete mixture incorporating calcite powder as filler substitute for sustainable pavement

construction. *Materials Science and Engineering*, 1036(1), 012034.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1036/1/012034>

Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamed, G., y Azarhoosh, M. (2015). Characterization of permanent deformation resistance of precipitated calcium carbonate modified asphalt mixture. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(5), 615-622. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.890654>

Mora, M., Jiménez, M., Aguiar, J. y Sequeira, W., (2021) Análisis de la variabilidad asociada a ensayos de fatiga en mezclas asfálticas. *Infraestructura Vial*. 23(41), 20-30. <https://doi.org/10.15517/iv.v23i41.44420>

Motamedi, M., Shafabakhsh, G., y Azadi, M., (2021) Evaluation of fatigue and rutting properties of asphalt binder and mastic modified by synthesized polyurethane. *Journal of traffic and Transportation Engineering*, 8(6), 1036 – 1048. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.05.006>

Moreno, H., Ibáñez y S., Gisbert, J. (2011). *Minerales carbonatados*. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado el 14 de noviembre de 2023, de: <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/ec15a6ce-047c-428f-8e4b-782d29ece327/content>

Miró, J., Pérez, F., Olivier, M., y Moutier, F. (2002). *Evaluación de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas formuladas a partir de la normativa española y francesa*. Recuperado el 14 de noviembre de 2023 de <http://hdl.handle.net/2117/2854>

National Center for Asphalt Technology (NCAT). (2021a). *Asphalt Pavement: A Critically Important Aspect of Infrastructure Resiliency* (Report 21-02). Auburn University. <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep21-02.pdf>

National Center for Asphalt Technology (NCAT). (2021b). *Improving asphalt mixture performance with balanced mix design* (NAPA Information Series 143). Auburn University. <https://eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/NAPA-IS-143-BMD-Resource-Guide-2021.pdf>.

Pérez-Monserrat, E. M. (2012.). *Técnicas de caracterización petrológicas (I): Microscopía óptica de polarización (MOP) y difracción de rayos X (DRX)*. Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Departamento de Geomateriales. https://digital.csic.es/bitstream/10261/46766/1/Curso_Geomateriales_23_30.pdf?utm_source=chatgpt.com

Portland Cement Association. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures*. PCA.

Press, F., y Siever, R. (2000). *Understanding Earth* (3rd ed.). W.H. Freeman and Company. ISBN 0 72674 117 2. Geol. Mag. 139, 2002. <https://doi.org/10.1017/S0016756802286513>

Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., y Kennedy, T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction* (2nd ed.). National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.

Rondón, H., Muniz, M., y Reyes, F. (2018). Use of Blast Furnace Slag and Steel in Asphalt Mixtures: Review. *Revista Ingenierías Universidad De Medellín*, 17(33), 71-97.

Salgado, B., y Momm, L. (2012). Evaluación de características físicas y químicas de los rellenos minerales de piedra caliza y polvo de piedra en la formulación de los morteros asfálticos. *Infraestructura Vial*, 11(22), 34–45. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rvial/article/view/3223>

Sánchez, E., Pacheco, C., Fonseca, A., Pineda, Y., Mercado, R., Yepes, R., y Lagares, R., (2020) The chemical-mineralogical characterization of recycled concrete aggregates from different sources and their potential reactions in asphalt mixtures. *Materials*, 13, 5592. <https://doi.org/10.3390/ma13245592>

Sebaaly, P., Hitti, E., y Weitzel, D. (2003). Effectiveness of lime in hot-mix asphalt pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1832, 34–41. <https://doi.org/10.3141/1832-05>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2000). *M.MMP.4.05.009/00, Punto de reblandecimiento en cementos asfálticos*. Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/libros>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2008). *N-CMT-4-04-005: Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/libros>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2018). *N-CMT-4-05-004/18: Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG)*. Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/libros>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2020). *Tabulador de costos paramétricos para la construcción y modernización de la infraestructura carretera*. Dirección General de Servicios Técnicos. México: SICT. <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/tabulador/>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2021). *M.MMP.4.05.024/21: Recuperación Elástica por Torsión en Cemento Asfáltico Modificado*. Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/libros>

Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes. (2024). N·PRY·CAR·5·01·001/24: *Ejecución del proyecto de pavimentos asfálticos*. Instituto Mexicano del Transporte. <https://normas.imt.mx/libros>

Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2007). *Clasificación de los Minerales. Museo Virtual*. Recuperado el 15 de noviembre de 2023 de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Clasificacion-de-los-minerales.html>.

Si, Z., Little, D. N., y Lytton, R. L. (2002). Evaluation of fatigue healing effect of asphalt concrete by pseudostiffness. *Transportation Research Record*, 1789(2), 73–79. <https://doi.org/10.3141/1789-09>

Sousa, J. B., Craus, J., y Monismith, C. L. (1991). Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete. SHRP-A/IR-91-104. *Strategic Highway Research Program*.

Tucker, M. E. (2001). *Sedimentary petrology: An introduction to the origin of sedimentary rocks* (3rd ed.). Blackwell Science. ISBN 0 632 05735 1. Geol. Mag. 139, 2002. <https://doi.org/10.1017/S0016756801005483>

Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., y Martínez, A. (2012). Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles. *Revista de la Construcción*, 11(1), 88–101. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000100009>

Vargas, A. (2014). *Evaluación de resistencia al agrietamiento por fatiga de mezclas asfálticas mediante el enfoque de energía disipada*. San José, Costa Rica. Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/134>

Walker, D., Turner, P., & Anderson, M. (1998). *What we have learned about Superpave*. Asphalt Institute. https://www.asphaltinstitute.org/wp-content/uploads/What_We_Have_Learned_About_Superpave.pdf

Wenglas-Lara, Gilberto, Domínguez-Mendoza, Sergio Adrián, Burillo-Montufar, Juan Carlos, & Castañeda-Ávila, José. (2024). Mezclas asfálticas elaboradas con agregado calizo y adición de óxido de calcio probadas a temperaturas de servicio. *Revista de ciencias tecnológicas*, 7(4), e377. Epub 30 de marzo de 2025. <https://doi.org/10.37636/recit.v7n4e377>

West, R., Taylor, A., y Yin, F. (2018). *Improved mix design, evaluation, and materials selection for longer-lasting asphalt pavements*. National Center for Asphalt Technology (NCAT) Report 17-06. <https://nap.nationalacademies.org/read/22554/chapter/1>

Yarahmadi, A. M. , Shafabakhsh, G. and Asakereh, A. (2023). Laboratory Evaluation of Fatigue and Rutting Performance of Nano CaCO₃ Modified Asphalt Binders. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 11(3), 144-157. doi: 10.22075/jrce.2022.27095.1651

You, L., Long, Z., You, Z., Guo, H., & Xu, F. (2022). Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition), 9(5), 742–764. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>

Zhou, F., Im, S., Sun, L., y Scullion, T. (2017). Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA. *Road Materials and Pavement Design*, 18 (suppl. 4), 405–427. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389082>