



POSGRADOS

MAESTRÍA EN VIALIDAD Y TRANSPORTE

RPC-SO-05-No.087-2024

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS: COMPARATIVA ENTRE EL
DISEÑO PARA PRODUCCIÓN EN UNA
PLANTA DEL AUSTRO ECUATORIANO Y
VARIACIONES EN LA GRANULOMETRÍA

AUTORES:

ALEXANDER MAURICIO CAICEDO TILLAGUANGO
CARLOS MAURICIO CALDERÓN BERNAL

DIRECTOR:

JAIME ASDRUBAL BOJORQUE IÑEGUEZ

CUENCA – ECUADOR
2026

Autores:**Alexander Mauricio Caicedo Tillaguango**

Ingeniero Civil.

Candidato a Magíster en Vialidad y Transporte por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

acaicedot@est.ups.edu.ec

**Carlos Mauricio Calderón Bernal**

Ingeniero Civil.

Candidato a Magíster en Vialidad y Transporte por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

ccalderonb3@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**Jaime Asdrubal Bojorque Iñiguez**

Ingeniero Civil.

jbojorque@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2026 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

ALEXANDER MAURICIO CAICEDO TILLAGUANGO

CARLOS MAURICIO CALDERÓN BERNAL

Análisis del desempeño de mezclas asfálticas: comparativa entre el diseño para producción en una planta del austro ecuatoriano y variaciones en la granulometría

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres y familiares, quienes con su amor, esfuerzo y confianza han sido la base fundamental de mi formación personal y profesional. Dedico este trabajo a todos aquellos que creyeron en mí y me motivaron a alcanzar cada meta con perseverancia y compromiso.

Alexander Mauricio Caicedo Tillaguango

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres, Rosario y César. A mi padre, mi mejor maestro y mentor; aunque ya no esté físicamente, su confianza inquebrantable para alcanzar grandes objetivos sigue guiando cada uno de mis pasos. A mi madre, cuyo impulso y apoyo constante han sido y seguirán siendo mi motivación día tras día. Asimismo, a mis hermanos, Augusto y Gloria, que me acompañaron en este proceso, junto a mis sobrinas Emma y Olivia, quienes llenan de alegría cada esfuerzo.

Carlos Mauricio Calderón Bernal

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, por proporcionarnos el entorno y los recursos necesarios para el desarrollo del presente proyecto de titulación dentro de la Maestría en Vialidad y Transporte.

Como manera especial, agradecemos a nuestro tutor de tesis, por ser nuestra guía constante, acompañamiento académico y valiosos aportes durante todas las etapas del desarrollo del trabajo. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al laboratorista Pedro Arce, quien colaboró activamente y brindó su apoyo técnico en el presente proyecto de titulación, contribuyendo de manera significativa a la obtención de resultados confiables.

Finalmente, agradecemos a la empresa Titanium Road por las facilidades brindadas y el apoyo proporcionado para la realización del estudio, así como a nuestras familias y a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron con su respaldo y motivación para que este logro académico se hiciera realidad.

Tabla de Contenido

Resumen	13
Abstract	15
1. Introducción	17
1.1. Antecedentes.....	17
2. Determinación del Problema.....	19
2.1. Justificación	19
2.2. Objetivos	20
2.2.1. Objetivo General.....	20
2.2.2. Objetivos Específicos	20
2.3. Alcance.....	20
2.4. Organización del trabajo de titulación	21
3. Marco teórico referencial	23
3.1. Mezclas asfálticas.....	23
3.2. Agregados minerales.....	24
3.3. Cemento asfáltico	24
3.4. Propiedades de las mezclas asfálticas	25
3.4.1. Estabilidad	25
3.4.2. Durabilidad	26
3.4.3. Flexibilidad	26
3.4.4. Resistencia a la fatiga.....	26
3.4.5. Resistencia al agrietamiento por baja temperatura	27
3.4.6. Resistencia al daño por humedad.....	27
3.4.7. Resistencia al deslizamiento.....	27
3.4.8. Trabajabilidad	28
3.5. Clasificación de las mezclas asfálticas	28

3.5.1.	Según las fracciones de árido empleadas	28
3.5.2.	Según la temperatura de producción	29
3.5.3.	Según los vacíos en la mezcla	29
3.5.4.	Según la granulometría del árido (curva granulométrica).....	29
3.6.	Mezclas asfálticas densas	30
3.7.	Mezclas asfálticas abiertas	30
3.8.	Producción en planta	31
3.8.1.	Plantas Mezcladoras	31
3.8.2.	Procedimiento de trabajo.....	32
3.9.	Producción en laboratorio	34
3.10.	Método Marshall.....	35
3.11.	Método SUPERPAVE	36
3.12.	Combinación de agregados.....	37
3.13.	Ensayos de laboratorio.....	38
3.13.1.	Ensayos de laboratorio en agregados	38
3.13.2.	Ensayos de laboratorio en el betún asfáltico	43
3.13.3.	Ensayos de laboratorio en la mezcla asfáltica	45
4.	Materiales y metodología.....	52
4.1	Caracterización de áridos	52
4.1.1.	Análisis granulométrico.....	53
4.1.2.	Equivalente de arena.....	58
4.1.3.	Resistencia al desgaste.....	60
4.1.4.	Peso específico aparente / Absorción agregado grueso	63
4.1.5.	Peso específico aparente / Absorción agregado fino	65
4.1.6.	Deletéreos	67
4.2.	Caracterización del betún asfáltico	69
4.2.1.	Penetración a 25°C	70
4.2.2.	Punto de ablandamiento.....	71
4.2.3.	Punto de inflamación	72

4.2.4.	Peso específico del betún.....	74
4.2.5.	Viscosidad cinemática a 135 °C	74
4.3.	Combinación de áridos	76
4.3.1.	Requisitos de los áridos.....	76
4.3.2.	Granulometría de diseño	77
4.4.	Diseño de mezcla asfáltica	84
4.4.1.	Contenido de asfalto óptimo	85
5.	Resultados y discusión	90
5.1.	Estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas.....	94
5.2.	Gravedad específica neta o bulk.....	97
5.3.	Porcentaje de vacíos	98
5.4.	Vacíos en el agregado mineral	99
5.5.	Vacíos rellenos de asfalto.....	101
5.6.	Relación filler / betún	103
6.	Conclusiones y Recomendaciones	104
7.	Referencias	106
8.	Anexos	109
8.1.	Anexo 1. Registro fotográfico.....	109
8.2.	Anexo 2. Contenido de betún asfáltico.....	113

Índice de tablas

Tabla 1. Requisitos de granulometría de agregados.....	39
Tabla 2. Equivalente de arena.....	41
Tabla 3. Parámetros del método Marshall.....	46
Tabla 4. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).....	47
Tabla 5. Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto (VFA).....	47
Tabla 6. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral según el TMN (VMA).....	48
Tabla 7. Ensayos utilizados para la caracterización de áridos.....	53
Tabla 8 Tamices utilizados para análisis granulométrico agregado de 3/4''.....	54
Tabla 9. Análisis granulométrico agregado de 3/4.....	54
Tabla 10. Tamice utilizados para análisis granulométrico agregado de 3/8''.....	55
Tabla 11. Análisis granulométrico agregado de 3/8.....	56
Tabla 12. Tamice utilizados para análisis granulométrico del fino triturado.....	57
Tabla 13. Análisis granulométrico agregado de fino triturado.....	57
Tabla 14. Lecturas de equivalente de arena.....	60
Tabla 15. Promedio de lecturas de equivalente de arena.....	60
Tabla 16. Datos para ensayo de abrasión para material de 3/8.....	60
Tabla 17. Datos para ensayo de abrasión para material de 3/4.....	61
Tabla 18. Peso específico del agregado de 3/4.....	65
Tabla 19. Peso específico del agregado de 3/8.....	65
Tabla 20. Peso específico del agregado fino triturado.....	67
Tabla 21. Resumen de ensayo de deletéreos agregado fino y grueso.....	68
Tabla 22. Ensayos de betún asfáltico.....	69
Tabla 23. Resultados de ensayo de penetración.....	71
Tabla 24. Resultados de punto de ablandamiento.....	72
Tabla 25. Análisis granulométrico de mezcla en planta.....	78
Tabla 26. Mínimos cuadrados para mezcla abierta.....	80
Tabla 27. Corrección de porcentajes de agregados por el método de mínimos cuadrados.....	80
Tabla 28. Porcentaje de agregados mezcla abierta.....	81
Tabla 29. Ajuate granulométrico mezcla abierta.....	82
Tabla 30. Porcentaje de agregados mezcla cerrada.....	83
Tabla 31. Ajuste granulométrico mezcla cerrada.....	83
Tabla 32. Resumen de porcentajes de asfalto para asfalto óptimo.....	85
Tabla 33. Cálculo de asfalto óptimo.....	87

Tabla 34. Resultados de verificación de asfalto óptimo.....	89
Tabla 35 . Resultados de propiedades volumétricas y gravimétricas obtenidas mediante ensayo Marshall.....	91
Tabla 36. Parámetros geomecánicos del ensayo Marshall, con porcentajes de asfalto de prueba de 5.50% y 6.00%. Elaboración propia.	113
Tabla 37. Parámetros geomecánicos del ensayo Marshall, con porcentajes de asfalto de prueba de 6.50% y 7.00%. Elaboración propia.	114

Índice de figuras

Figura 1. Equipo de rueda de carga – Wheel Tracking.	49
Figura 2. Equipo de resistencia a fatiga en 4 puntos.....	50
Figura 3. Granulometría.....	53
Figura 4. Curva granulométrica agregado de ¾.	55
Figura 5. Curva granulométrica agregado de 3/8.	56
Figura 6. Curva granulométrica fino triturado.	58
Figura 7. Equivalente de arena.	59
Figura 8. Ensayo de Penetración.	70
Figura 9. Punto de ablandamiento.	71
Figura 10. Ensayo de punto de inflamación.	73
Figura 11. Viscosidad del betún asfáltico.	75
Figura 12. Combinación de áridos mezcla de planta.....	78
Figura 13. Curva $power^{0.45}$ vs Granulometría de planta.	79
Figura 14. Coeficientes para mínimos cuadrados.	80
Figura 15. Ajuste granulométrico 1 del método de mínimos cuadrados para mezcla abierta.	81
Figura 16. Curva granulométrica mezcla abierta.....	82
Figura 17. Curva granulométrica mezcla cerrada.....	84
Figura 18. Curva de Estabilidad vs Porcentaje de asfalto.	86
Figura 19. Curva de Peso específico bulk vs Contenido de asfalto.	86
Figura 20. Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de asfalto.....	87
Figura 21. VFA vs Porcentaje de asfalto.	88
Figura 22. VMA vs Porcentaje de asfalto.	88
Figura 23. Flujo vs Porcentaje de asfalto.	89
Figura 24. Estabilidad y Flujo de mezcla cerrada.....	94
Figura 25. Estabilidad y Flujo de mezcla abierta.	95
Figura 26. Estabilidad y Flujo de mezcla de planta.	95
Figura 27. Resultados de estabilidad.....	96
Figura 28. Resultados de flujo.	97
Figura 29. Resultados de la gravedad específica neta o bulk en las tres diferentes granulometrías.....	98
Figura 30. Resultados del porcentaje de vacíos en la mezcla en las tres diferentes granulometrías.....	99

Figura 31. Resultados del porcentaje de vacíos en el agregado mineral en las tres diferentes granulometrías.	100
Figura 32. Resultados del porcentaje de vacíos rellenos de asfalto en las tres diferentes granulometrías.....	102
Figura 33. Resultados de la relación filler / betún en las tres diferentes granulometrías.	103
Figura 34 Ensayos Marshall primera parte.....	109
Figura 35 Ensayos Marshall segunda parte.....	110
Figura 36 Ensayos Marshall tercera parte.....	111
Figura 37 Ensayos de betún asfáltico	112

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS:
COMPARATIVA ENTRE EL DISEÑO
PARA PRODUCCIÓN EN UNA
PLANTA DEL AUSTRO
ECUATORIANO Y VARIACIONES
EN LA GRANULOMETRÍA

Autores:

ING. ALEXANDER MAURICIO CAICEDO TILLAGUANGO

ING. CARLOS MAURICIO CALDERÓN BERNAL

Resumen

El presente proyecto analiza el desempeño de mezclas asfálticas mediante una comparación entre el diseño granulométrico utilizado para la producción en una planta del Austro ecuatoriano y variaciones controladas en la granulometría de los agregados, donde se realiza una mezcla asfáltica con una granulometría abierta y otra cerrada.

Por otra parte, el estudio demuestra que las variaciones en la granulometría influyen de manera directa en el comportamiento Marshall y volumétrico de las mezclas asfálticas. La granulometría cerrada favorece una estructura más densa y cohesionada, con mayor estabilidad (3408 lb), menor contenido de vacíos ($V_a = 3,70\%$) y VFA elevado (75,69%), mientras que la granulometría abierta genera una mezcla más permeable y deformable, caracterizada por mayor V_a (5,39%), VMA alto (17,38%), menor VFA (69,01%), relación filler/betún fuera de rango (0,60), menor estabilidad (3180 lb) y mayor flujo (16,9). Estos resultados confirman que la distribución granulométrica es un factor determinante en el desempeño de la mezcla y que las granulometrías abiertas presentan un comportamiento estructural distinto al de las mezclas densas tradicionales evaluadas mediante el método Marshall.

La investigación se desarrolló a partir de la caracterización de los materiales constituyentes, incluyendo ensayos de laboratorio en agregados pétreos y betún asfáltico, conforme a normas ASTM, AASHTO y MOP-001-F. Posteriormente, se diseñaron mezclas asfálticas mediante el método Marshall, determinando el contenido óptimo de asfalto y evaluando parámetros como estabilidad, flujo, gravedad específica bulk, porcentaje de vacíos en la mezcla (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos rellenos de asfalto (VFA). Se compararon tres escenarios: la mezcla producida en planta, una mezcla con granulometría cerrada y otra con granulometría abierta.

Los resultados evidenciaron que las variaciones en la granulometría influyen de manera significativa en el comportamiento volumétrico y mecánico de las mezclas asfálticas.

Finalmente, el estudio concluye que un adecuado control granulométrico durante el proceso de producción es determinante para garantizar mezclas asfálticas de calidad, y se proponen recomendaciones técnicas orientadas a optimizar el control de mezclas asfálticas.

Palabras clave: mezclas asfálticas, granulometría, método Marshall, desempeño mecánico, producción en planta

Abstract

This project analyzes the performance of asphalt mixtures through a comparison between the gradation design used for production in an asphalt plant located in the Ecuadorian Austro region and controlled variations in aggregate gradation, consisting of one asphalt mixture with open gradation and another with dense gradation.

Furthermore, the study demonstrates that variations in aggregate gradation have a direct influence on the Marshall and volumetric behavior of asphalt mixtures. The dense-graded mixture promotes a more compact and cohesive structure, with higher stability (3408 lb), lower air void content ($V_a = 3.70\%$), and a high voids filled with asphalt (VFA = 75.69%). In contrast, the open-graded mixture results in a more permeable and deformable structure, characterized by higher air voids ($V_a = 5.39\%$), higher VMA (17.38%), lower VFA (69.01%), an out-of-range filler-to-binder ratio (0.60), lower stability (3180 lb), and higher flow (16.9). These results confirm that aggregate gradation is a determining factor in mixture performance and that open-graded mixtures exhibit a structural behavior distinct from traditional dense-graded mixtures evaluated using the Marshall method.

The research was carried out through the characterization of the constituent materials, including laboratory testing of aggregates and asphalt binder in accordance with ASTM, AASHTO, and MOP-001-F standards. Subsequently, asphalt mixtures were designed using the Marshall method, determining the optimum asphalt content and evaluating parameters such as stability, flow, bulk specific gravity, air voids in the mixture (V_a), voids in the mineral aggregate (VMA), and voids filled with asphalt (VFA). Three scenarios were analyzed: the plant-produced mixture, the dense-graded mixture, and the open-graded mixture.

The results evidenced that variations in aggregate gradation significantly affect the volumetric and mechanical behavior of asphalt mixtures.

Finally, the study concludes that proper gradation control during the production process is essential to ensure high-quality asphalt mixtures, and technical recommendations are proposed to optimize asphalt mixture control.

Keywords: asphalt mixtures, aggregate gradation, Marshall method, mechanical performance, plant production.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El comportamiento mecánico de los pavimentos asfálticos está fuertemente condicionado por la forma en que se combinan y producen sus materiales constitutivos. En vías expuestas a solicitaciones variables de tránsito y a ambientes climáticos drásticos, la distribución granulométrica de los agregados y el control del proceso de fabricación en planta influyen directamente en la capacidad del pavimento para resistir deformaciones. Alteraciones en estas variables pueden afectar la estabilidad y la respuesta frente a cargas repetidas, incrementando el riesgo de deformación permanente y reduciendo el desempeño funcional a lo largo del tiempo (Li et al., 2022).

Bojorque et al. (2019) analizaron el uso de los parámetros Marshall en el control de calidad de mezclas asfálticas en caliente (HMA), un método clave para evaluar propiedades mecánicas y de durabilidad en carreteras de alto tránsito. Se enfoca en la influencia de las distribuciones granulométricas en el diseño y producción de estas mezclas, considerando su impacto en la resistencia al ahuellamiento y la estabilidad frente a deformaciones. Así mismo, investigaciones previas han demostrado que ajustar la granulometría puede mejorar el desempeño bajo cargas repetitivas, pero sigue siendo necesario un análisis más detallado para optimizar los parámetros de diseño y producción en planta (Sangsefidi et al., 2016).

Además, comprender la influencia de la granulometría en las mezclas asfálticas resulta fundamental, ya que este parámetro controla directamente la estructura interna del esqueleto mineral y, por tanto, las propiedades resistentes de la mezcla. Como señala Balbo (2015), el desempeño de las mezclas asfálticas depende en gran medida del correcto diseño y selección de los materiales

componentes, los cuales deben integrarse en proporciones que garanticen trabajabilidad, estabilidad frente a cargas estáticas y dinámicas, y baja susceptibilidad ante las condiciones ambientales. Bajo esta perspectiva, analizar variaciones granulométricas no solo permite verificar el cumplimiento de requisitos mecánicos, como la resistencia, durabilidad, flexibilidad y estabilidad volumétrica, sino también identificar cómo pequeñas modificaciones en la distribución de tamaños de partícula pueden alterar el comportamiento estructural de la mezcla compactada. Por lo tanto, aquí la importancia de profundizar en análisis comparativos entre diseños teóricos y producciones en planta, ya que cualquier desviación en la granulometría puede comprometer parámetros críticos como el ahuellamiento, la rigidez, la cohesión y la respuesta ante cargas repetitivas, afectando finalmente la vida útil del pavimento y su desempeño en condiciones reales de servicio.

2. Determinación del Problema

2.1. Justificación

El diseño de la mezcla asfáltica debe garantizar pavimentos duraderos que puedan soportar cargas dinámicas y condiciones climáticas adversas. Dado que los factores de producción tienen un impacto sustancial en la estabilidad, resistencia y deformabilidad de las mezclas, este estudio examina la variabilidad en la distribución del tamaño de las partículas de los agregados. Estas diferencias pueden poner en peligro la longevidad y la seguridad del pavimento, lo que se traduce en mayores gastos de mantenimiento y rehabilitación. Con el fin de mejorar el rendimiento del pavimento y reducir la frecuencia de deformaciones prematuras, este estudio tiene como objetivo evaluar y optimizar estas variables. Esto permitirá crear una infraestructura vial más eficaz y sostenible.

Los principales beneficiarios de esta investigación son las entidades responsables de la planificación y mantenimiento de carreteras, como municipios, gobiernos locales y empresas constructoras, así como los usuarios de las vías. Una mezcla asfáltica adecuada garantiza una mayor vida útil del pavimento, reduciendo costos de mantenimiento y mejorando la seguridad vial. Además, comunidades y sectores con alto tráfico vehicular se beneficiarán de una infraestructura más resistente, minimizando riesgos y asegurando una movilidad eficiente y segura.

La investigación es factible gracias a la disponibilidad de un registro de los parámetros mecánicos que lleva a cabo el control de calidad la empresa TitaniumRoad de una planta de asfalto del Austro ecuatoriano, así como al acceso a ensayos de laboratorio para evaluar propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas, tales como estabilidad, flujo, densidad y

granulometría. Además, se aplicarán métodos reconocidos por normativas internacionales como AASHTO y ASTM, lo que garantiza la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos en este proyecto.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Evaluar el desempeño de mezclas asfálticas mediante la comparación entre el diseño estándar para producción en planta y las variaciones en la granulometría, con el fin de determinar su influencia en la resistencia, durabilidad y calidad de la mezcla asfáltica.

2.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar ensayos de laboratorio siguiendo normativas locales e internacionales para caracterizar las propiedades de los agregados y el betún asfáltico.
- Determinar y verificar el contenido óptimo de betún asfáltico correspondiente a la granulometría empleada para producción en planta, siguiendo el método propuesto por la National Asphalt Pavement Association (NAPA).
- Analizar el impacto de las variaciones en la granulometría sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas en términos de estabilidad, flujo, volumen de vacíos, volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA), volumen de vacíos rellenos de asfalto (VFA) y peso específico Bulk.

2.3. Alcance

El alcance de esta propuesta no se limita únicamente al análisis comparativo de mezclas asfálticas entre diseño para producción y diseño con variaciones en la granulometría, sino que también busca generar recomendaciones técnicas que

puedan servir como insumo para actualizar especificaciones nacionales o desarrollar procedimientos de control de calidad más adaptados a la realidad en el proceso de producción. Este trabajo será útil para posteriores estudios sobre la influencia de los parámetros de diseño, con el objetivo de una mejora continua en la construcción de pavimentos.

2.4. Organización del trabajo de titulación

El trabajo de titulación se estructura en siete capítulos, organizados de la siguiente manera: introducción, determinación del problema, marco teórico referencial, materiales y metodología, resultados y discusión, conclusiones y recomendaciones, bibliografía, y anexos. A continuación, se presenta una descripción general de cada uno de estos capítulos.

Capítulo 1, Introducción: Se establece los antecedentes del proyecto de titulación;

Capítulo 2, Determinación del problema: Contiene la justificación del proyecto, en el mismo se incluye la importancia del trabajo, también contiene los objetivos que se propone lograr y el alcance;

Capítulo 3, Marco teórico referencial: Comprende los conceptos y principios fundamentales de las mezclas asfálticas, profundizando en aspectos como la granulometría de los agregados, las temperaturas de producción, así como las propiedades del ligante y su interacción con los demás componentes. Seguidamente, se exploran los métodos de diseño más comunes, Marshall y SUPERPAVE, centrados en sus criterios de aceptación y ámbitos de aplicación. A continuación, se describe el proceso de producción de la mezcla, tanto en planta como en laboratorio. Para concluir, se detallan los ensayos de laboratorio por el método Marshall y las pruebas adicionales que resultan necesarias para evaluar el desempeño mecánico y funcional de la mezcla asfáltica en condiciones de servicio;

Capítulo 4, Materiales y metodología: Incluye la selección de la granulometría óptima a partir de curvas normalizadas que aseguran una adecuada compactación

y distribución de los agregados. A continuación, se aplica el método Marshall para el diseño de la mezcla, definiendo los puntos de contenido de ligante y las condiciones de compactación en laboratorio. Para la caracterización y validación se determinan los parámetros NAPA: densidad aparente (bulk), flujo y estabilidad Marshall, porcentaje de vacíos totales en la mezcla (VTM o V_a), vacíos en los agregados minerales (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA);

Capítulo 5, Resultados y discusión: Se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados para cada granulometría evaluada. Se examinan los parámetros volumétricos y mecánicos derivados del método Marshall, los cuales son: estabilidad, flujo, V_a , VMA, VFA y relación filler/betún, y se discute su comportamiento frente a los criterios normativos vigentes. Asimismo, se realiza una comparación entre la mezcla diseñada para producción en planta y las variaciones granulométricas propuestas, identificando cómo estas diferencias afectan el desempeño de la mezcla;

Capítulo 6, Conclusiones: Contiene de manera resumida los principales hallazgos del estudio, destacando el impacto de las variaciones granulométricas en el comportamiento volumétrico y mecánico de las mezclas asfálticas. Se establecen conclusiones respecto al desempeño comparativo entre la granulometría de diseño para planta y las alternativas evaluadas en laboratorio. Además, se plantean recomendaciones prácticas para optimizar el diseño de mezclas, mejorar el control de calidad en planta y orientar futuras investigaciones relacionadas con el desempeño de mezclas bajo diferentes condiciones de servicio;

Capítulo 7, Bibliografía: Incluye todas las fuentes consultadas y citadas para desarrollar el proyecto de titulación;

Como sección adicional, se incorpora los anexos, los cuales contienen la documentación complementaria que respalda el trabajo realizado.

3. Marco teórico referencial

3.1. Mezclas asfálticas

La mezcla asfáltica, también denominado hormigón asfáltico, es un material combinado principalmente por agregados minerales y un ligante bituminoso (cemento asfáltico), cuya función principal es cohesionar las partículas sólidas y aportar impermeabilidad y flexibilidad al material compuesto. Los agregados, que pueden ser gravas, arena y polvo mineral, constituyen normalmente entre el 92 % y el 96 % de la masa total de la mezcla y proporcionan resistencia a la aplicación de cargas repetidas. Por su parte, el cemento asfáltico, obtenido mediante la destilación de petróleo, representa del 4 % al 8 % en peso y debe cumplir con especificaciones entre las más importantes de susceptibilidad a temperatura, viscosidad y envejecimiento (Garnica et al., 2005).

Las proporciones relativas entre los agregados minerales y el cemento asfáltico influyen de manera determinante en las propiedades físicas de la mezcla, tales como la densidad, estabilidad, y contenido de vacíos. Estas características, a su vez, condicionan directamente el desempeño funcional del pavimento en servicio, incluyendo su resistencia estructural, durabilidad y respuesta ante cargas repetidas (Cepeda, 2002).

Existen diversos tipos de mezclas asfálticas, se pueden clasificarse de distintas maneras según las características de fabricación y composición: la temperatura de fabricación y colocación (en caliente o en frío), la granulometría de los agregados (densa, abierta o semicerrada), la conformación de ciertos agregados minerales, el tipo de ligante asfáltico utilizado (convencional o modificado), así como la presencia de aditivos o polímeros que mejoran su desempeño. Algunos de estos tipos serán descritos en los siguientes apartados.

3.2. Agregados minerales

Los agregados minerales son el componente más abundante en el hormigón asfáltico y constituyen la columna vertebral de la mezcla. Además de ser necesarios para dotar a la mezcla de resistencia y estabilidad, estos áridos pueden utilizarse en la producción de cemento Portland y hormigón asfáltico, así como en las capas de subbase y base de estructuras de pavimento rígidas y flexibles (Pavement Tools Consortium, s/f).

Estos materiales pueden ser naturales, triturados o sintéticos. Los agregados naturales provenientes de depósitos fluviales o glaciares sin procesar; los triturados obtenidos mediante trituración del árido explotado en canteras; y los sintéticos como escoria de alto horno, y pueden aprovechar las características físicas y mecánicas. Además, la forma y textura de los agregados influyen en el comportamiento mecánico de la mezcla: los agregados angulares y de textura rugosa generan una mayor resistencia al corte y una masa más compacta en comparación con los redondeados y lisos, que tienden a deslizarse entre sí, provocando deformaciones permanentes cuando se superan las tensiones internas en la mezcla (Garnica et al., 2005).

3.3. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico es un material de naturaleza bituminosa, caracterizado por su color oscuro y elevada viscosidad, que puede presentarse en estado sólido o semisólido. Se encuentra constituido principalmente por betún y compuestos minerales, y su obtención se realiza, de forma general, como subproducto del proceso de destilación del petróleo. Adicionalmente, puede encontrarse en yacimientos naturales donde la separación de los componentes se ha producido de manera natural (Pavement Tools Consortium, s/f).

El cemento asfáltico posee una propiedad denominada termoplasticidad, que le permite cambiar su estado físico con la temperatura. Al elevarse la temperatura, su

consistencia disminuye y se torna más fluido debido a la reducción de su viscosidad. Por el contrario, al descender la temperatura, el material se vuelve sólido y aumenta su módulo de rigidez. Este comportamiento se conoce como susceptibilidad térmica, la cual debe ser lo más baja posible para asegurar un buen desempeño del pavimento frente a las variaciones climáticas (Kraemer et al., 2004).

3.4. Propiedades de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas deben satisfacer determinados requisitos de desempeño según su aplicación, lo cual exige una adecuada selección de los materiales y la definición de proporciones óptimas, considerando la influencia de cada componente en el comportamiento estructural y funcional del pavimento (Cepeda, 2002). Entre las principales propiedades de las mezclas asfálticas en caliente se destacan las señaladas por (Garnica et al., 2005):

- Estabilidad
- Durabilidad
- Flexibilidad
- Resistencia a la fatiga
- Resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas
- Resistencia al daño por humedad
- Resistencia al deslizamiento
- Trabajabilidad

3.4.1. Estabilidad

La estabilidad de la mezcla asfáltica corresponde a la capacidad máxima del material para resistir deformaciones plásticas permanentes cuando es sometido a cargas de tránsito continuas o repetidas. Desde el enfoque de la mecánica de materiales, esta propiedad se origina por la interacción de dos factores principales: la fricción interna entre los agregados pétreos y la cohesión aportada por el ligante asfáltico. Una estabilidad deficiente favorece el desplazamiento lateral de la mezcla bajo la acción de las ruedas, dando lugar a la formación de ahuellamientos y

corrugaciones que afectan negativamente la seguridad y el confort del usuario. No obstante, valores excesivamente elevados de estabilidad, alcanzados mediante una reducción excesiva del contenido de asfalto, pueden generar mezclas demasiado rígidas y frágiles (Garnica et al., 2005).

3.4.2. Durabilidad

La durabilidad de la mezcla asfáltica se refiere a su capacidad para resistir la acción conjunta del tránsito y de los agentes ambientales, como el aire, el agua y las variaciones de temperatura, sin presentar deterioro significativo. Estos factores aceleran el envejecimiento del cemento asfáltico y favorecen la pérdida de adherencia de la película de ligante que recubre los agregados. Esta característica se encuentra directamente vinculada al contenido de vacíos de la mezcla, puesto que un porcentaje elevado de vacíos facilita los procesos de oxidación y la penetración de agentes externos, lo que conduce a una disminución de la vida útil del pavimento (Garnica et al., 2005).

3.4.3. Flexibilidad

La flexibilidad de la mezcla asfáltica se define como la aptitud del material para deformarse sin que se produzcan fisuras, agrietamientos ni asentamientos asociados a las capas estructurales subyacentes a la carpeta asfáltica. No obstante, el aumento de esta propiedad puede afectar negativamente la estabilidad de la mezcla, ya que una mayor capacidad de deformación suele implicar una reducción de la rigidez y de la resistencia al desplazamiento cuando la mezcla es sometida a cargas. (Garnica et al., 2005).

3.4.4. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica es la capacidad para resistir la aplicación repetida de cargas sin presentar fallas, incluso cuando los esfuerzos generados se mantienen por debajo de la resistencia última a tracción del material. Este comportamiento está influenciado por el contenido de ligante asfáltico, ya que

mayores proporciones favorecen una mayor capacidad de deformación. No obstante, la respuesta frente a la fatiga también está condicionada por el espesor de la capa asfáltica y la magnitud de las cargas actuantes (Garnica et al., 2005).

3.4.5. Resistencia al agrietamiento por baja temperatura

La resistencia al agrietamiento de la mezcla asfáltica es la capacidad que tiene para evitar el agrietamiento o fisuras, debido a tensiones de tracción generadas por la contracción térmica del material cuando la temperatura desciende drásticamente. Esta propiedad está relacionada con la rigidez del asfalto en bajas temperaturas, ya que una mezcla excesivamente rígida pierde su capacidad de deformarse sin fracturarse, lo que incrementa el riesgo de agrietamiento térmico (Garnica et al., 2005).

3.4.6. Resistencia al daño por humedad

La resistencia al daño por humedad en la mezcla asfáltica corresponde a la capacidad para resistir el deterioro progresivo causado por la presencia de agua o vapor de agua en su estructura interna. El mecanismo de falla principal es el desprendimiento (stripping), que ocurre cuando el agua rompe la unión adhesiva entre el cemento asfáltico y la superficie del agregado pétreo, o bien debilita la cohesión interna de la matriz asfáltica. Este fenómeno reduce drásticamente la capacidad estructural del pavimento, llevándolo a una falla prematura mediante baches y desintegración. La química de la interfaz agregado–cemento asfáltico (ácida o básica) juega un rol importante en esta propiedad (AASHTO T283, 2014).

3.4.7. Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento en la mezcla asfáltica se refiere a la capacidad de la superficie para generar suficiente fricción o agarre a los neumáticos de los vehículos, garantizando la seguridad en maniobras de frenado y giro, especialmente bajo condiciones húmedas. Esta propiedad depende de dos escalas de textura superficial: la macro textura, proporcionada por la gradación y los vacíos

entre los agregados gruesos (que facilita la evacuación del agua para evitar el hidropilaje), y la micro textura, que es la rugosidad propia de las partículas individuales de agregado (que genera la fricción a nivel microscópico) (Hall et al., 2009).

3.4.8. Trabajabilidad

La trabajabilidad de la mezcla asfáltica se refiere a la facilidad con la que esta puede ser manejada, colocada y compactada en obra hasta alcanzar la densidad especificada. Una adecuada trabajabilidad favorece una distribución homogénea de los materiales y un correcto acomodo de las partículas, sin demandar esfuerzos excesivos de compactación y reduciendo la probabilidad de segregación. Este comportamiento depende principalmente de la viscosidad del ligante a la temperatura de compactación, así como de la forma, textura de los agregados y la incorporación de aditivos (Asphalt Institute, 2014).

3.5. Clasificación de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas pueden agruparse en diferentes categorías, cuya clasificación se establece en función de diversos parámetros y características técnicas, sin embargo, las más comunes son: según las fracciones de árido empleado, temperatura de producción, vacíos en la mezcla, y granulometría (Kraemer et al., 2004).

3.5.1. Según las fracciones de árido empleadas

Este criterio parte de la proporción y tipo de partículas minerales utilizadas en la mezcla:

- **Masilla asfáltica:** combinación de polvo mineral con ligante asfáltico. Tiene alta cohesión y se usa como base de otras mezclas.
- **Mortero asfáltico:** incluye árido fino y masilla. Se usa en capas delgadas de rodadura y sellos.

- **Hormigón asfáltico:** mezcla de árido grueso con mortero. Es el tipo más común en capas estructurales.
- **Macadam asfáltico:** árido grueso mezclado directamente con ligante, sin fracción fina intermedia.

3.5.2. Según la temperatura de producción

La temperatura influye directamente en la trabajabilidad y la compactación:

- **Mezclas en caliente:** fabricadas a temperaturas elevadas (~150 °C), tanto el cemento asfáltico como los agregados minerales. Usan cemento asfáltico convencional. Tienen mayor desempeño estructural.
- **Mezclas en frío:** emplean emulsiones o asfaltos fluidificados; los agregados se mantienen a temperatura ambiente, aunque el ligante puede requerir calentamiento. Son ideales para bacheo o vías de bajo tránsito.

3.5.3. Según los vacíos en la mezcla

La cantidad de vacíos afecta la durabilidad, resistencia al agua y comportamiento frente a cargas:

- **Mezclas densas o cerradas:** contienen menos del 6 % de vacíos. Son compactas, impermeables y estructuralmente resistentes.
- **Mezclas semicerradas:** vacíos entre 6 % y 12 %. Permiten cierto drenaje, pero tienen menor cohesión interna.
- **Mezclas abiertas:** más del 12 % de vacíos. Su objetivo principal es el drenaje superficial.

3.5.4. Según la granulometría del árido (curva granulométrica)

Este criterio se basa en la distribución (gradación) partículas minerales:

- **Granulometría continua:** es aquella en la que todos los tamaños de árido están bien representados, permitiendo una mezcla densa y de alta compactación.

- **Granulometría discontinua:** es aquella en la que faltan ciertos tamaños intermedios de árido, generando mezclas con más vacíos y menor compactación.

3.6. Mezclas asfálticas densas

Son mezclas conformadas por agregados con granulometría continua, es decir, que incluyen proporciones adecuadas de partículas de todos los tamaños, desde agregado grueso hasta finos pasante del tamiz #200 (filler). Esta distribución permite lograr una mezcla densa con bajo contenido de vacíos, lo que le confiere alta resistencia friccional, baja permeabilidad y buena durabilidad (Kraemer et al., 2004).

Las partículas más grandes de este tipo de mezcla están incrustadas en una matriz de masilla compuesta por material fino y cemento asfáltico. Estas combinaciones proporcionan un buen rendimiento estructural y un grado suficiente de impermeabilidad cuando se diseñan y aplican correctamente (Kraemer et al., 2004). Estas mezclas son adecuadas para todas las capas del pavimento (subbase, base y rodadura) y para cualquier condición de tráfico, siendo ampliamente empleadas bajo el método Marshall (Padilla, 2004).

3.7. Mezclas asfálticas abiertas

Estas mezclas se caracterizan por una baja proporción de agregados finos, lo que genera una estructura con gran cantidad de vacíos interconectados. Están compuestas principalmente por agregados gruesos uniformes y una mínima cantidad de filler, formando una red de contacto grueso que permite el drenaje del agua a través del pavimento (McAsphalt, 2019).

Según Senior (2013), estas mezclas permiten un rápido drenaje del agua superficial gracias a su alto contenido de huecos interconectados, lo que reduce la formación de charcos en la superficie de la carretera. Esto es importante para reducir el riesgo de hidroplaneo y mejorar la adherencia de los neumáticos al pavimento en

condiciones de lluvia. Su aplicación como capa de rodadura permeable contribuye a una conducción más segura, siempre que se coloquen sobre capas base impermeables que garanticen una evacuación del agua hacia los sistemas de drenaje lateral.

No son aptas para funciones estructurales, y requieren un contenido de asfalto más alto o modificado para garantizar la cohesión de la mezcla. Su diseño suele seguir métodos especiales diferentes al Marshall convencional (McAsphalt, 2019).

3.8. Producción en planta

Las mezclas asfálticas mezcladas en planta se indican en: Normativa del MTOP - ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES, MOP - 001-F 2002, sección 405-5. "Hormigón Asfáltico Mezclado en Planta". Se indican a continuación las especificaciones que deben cumplir (MOP - 001 - F, 2002).

3.8.1. Plantas Mezcladoras

La producción de la mezcla asfáltica se lleva a cabo en plantas mezcladoras, ya sean de tipo continuo o discontinuo (por paradas), las cuales deben garantizar el estricto control de temperaturas y dosificación. Estas instalaciones integran sistemas esenciales como tanques con calentamiento para el asfalto, hornos rotativos para el secado de áridos, cribas de clasificación y colectores de polvo para control ambiental. Un componente crítico es el sistema de dosificación, que varía según la tipología: las plantas discontinuas emplean balanzas de alta precisión y mezcladoras de paletas dobles, mientras que las continuas utilizan una dosificación sincronizada de áridos y betún con paletas reversibles. Todo el proceso debe estar respaldado por medidas de seguridad industrial y un laboratorio de campo para la verificación inmediata de la calidad de los materiales (MOP - 001 - F, 2002).

Una vez producida, la mezcla es trasladada en camiones de volteo con cajones metálicos cubiertos para preservar la temperatura hasta el sitio de obra. La

distribución del material se realiza mediante terminadoras autopropulsadas que, a través de tolvas y tornillos sinfín, aseguran la colocación uniforme respetando el espesor, alineación y pendiente del diseño, permitiendo ajustes menores con rastrillos manuales. Para alcanzar la densidad especificada, se utilizan equipos de compactación conformados por rodillos lisos de acero, vibratorios y neumáticos, los mismos actúan sobre la carpeta asfáltica mientras esta mantiene condiciones adecuadas de temperatura y trabajabilidad (MOP - 001 - F, 2002).

3.8.2. Procedimiento de trabajo

Fórmula maestra de Obra

Previo al inicio de la producción del hormigón asfáltico, el Contratista deberá poner en consideración del Fiscalizador la fórmula de trabajo, elaborada a partir de los ensayos de caracterización de los materiales que se emplearán en la mezcla. Dicha fórmula será objeto de revisión y verificación por parte del Fiscalizador, quien autorizará su aplicación para la producción del material (MOP - 001 - F, 2002).

La elaboración de la mezcla se efectuará conforme a esta fórmula, respetando las tolerancias establecidas en la Sección 3.13.3, sin embargo, cuando se presenten variaciones en las características de los materiales, la fórmula podrá ser ajustada previa aprobación del Fiscalizador.

La fórmula establecerá:

1. Las proporciones correspondientes a cada fracción de los agregados;
2. El contenido de ligante asfáltico, expresado como porcentaje respecto al peso total de los agregados, incluyendo filler mineral y aditivos, en caso de emplearse;
3. La temperatura de la mezcla a la salida de la planta o mezcladora, y
4. La temperatura requerida para su colocación en obra.

Almacenamiento de los agregados

Los agregados para la producción se almacenan de forma independiente en tolvas frías, separadas por fracciones granulométricas previamente definidas. El sistema de acopio, transporte interno y alimentación hacia el secador debe minimizar cualquier riesgo de segregación o degradación de los materiales (MOP - 001 - F, 2002).

Secado de los agregados

El secado de los agregados se realizará en el horno secador hasta alcanzar un contenido máximo de humedad del 1 %. El proceso de calentamiento deberá efectuarse de manera uniforme y controlada, a fin de prevenir cualquier daño en los materiales. Posteriormente, los agregados serán conducidos a las tolvas de recepción de la planta asfáltica, donde se dosificarán conforme a la fórmula de trabajo autorizada para su incorporación en la mezcladora (MOP - 001 - F, 2002).

Dosificación

La dosificación de los agregados se realiza de acuerdo con las proporciones establecidas en la Fórmula Maestra de Obra. Para el tipo de planta utilizada, de operación continua, la alimentación se controla mediante dispositivos calibrados que regulan el caudal de cada material. En caso de requerir el uso de relleno mineral, este se almacena en compartimientos cerrados y se incorpora a la mezcla de forma independiente, mediante alimentadores continuos (MOP - 001 - F, 2002).

Mezclado

La elaboración de la mezcla se efectuará en una planta central, de operación continua. Tanto los agregados como el ligante asfáltico podrán dosificarse por peso o por volumen. En caso de identificarse zonas dentro de la mezcladora donde no se logre una adecuada homogeneización, deberá reducirse la cantidad de material procesado por cada ciclo de mezclado (MOP - 001 - F, 2002).

La temperatura del cemento asfáltico al momento de su incorporación a la mezcla deberá mantenerse entre 135 °C y 160 °C, mientras que la temperatura de los

agregados al recibir el ligante estará comprendida entre 120 °C y 160 °C. En ningún caso la temperatura de los agregados superará en más de 10 °C a la del asfalto al momento del mezclado (MOP - 001 - F, 2002).

En plantas de mezcla continua, los agregados y el relleno mineral, cuando corresponda, se incorporarán mediante sistemas de alimentación continua de tipo mecánico o eléctrico. El cemento asfáltico se introducirá a la mezcladora a través de una bomba equipada con dispositivos de calibración y control de flujo. Este procedimiento se lo realiza hasta obtener una mezcla homogénea, en donde todos los agregados quedan completamente envueltos por el ligante asfáltico (MOP - 001 - F, 2002).

La temperatura de la mezcla se determinará a partir de la curva temperatura–viscosidad correspondiente al cemento asfáltico utilizado. Para mezclas densas o semicerradas, la temperatura de mezclado será aquella en la que la viscosidad del ligante se encuentre entre 1,5 y 3,0 poises, mientras que para mezclas abiertas la viscosidad deberá situarse entre 3,0 y 10,0 poises (MOP - 001 - F, 2002).

Control de calidad en planta

Durante la producción en planta, se debe verificar de manera continua la uniformidad de la mezcla, el cumplimiento de las temperaturas especificadas y la correcta dosificación de los materiales. Cualquier mezcla que presente signos de sobrecalentamiento, humedad, falta de recubrimiento o una no homogeneidad debe ser rechazada (MOP - 001 - F, 2002).

La mezcla asfáltica producida debe salir de la planta con las características térmicas y volumétricas necesarias para garantizar su adecuada colocación y compactación en obra.

3.9. Producción en laboratorio

La producción de mezclas asfálticas en laboratorio reduce la variabilidad de agentes ambientales y operatividad de lo que es la producción en planta. Al disponer de

pequeños volúmenes es más preciso la dosificación y asegurar homogeneidad en la mezcla. Proporciona una representación en condiciones ideales y su compactación es controlada.

La producción de mezclas asfálticas en laboratorio permite trabajar bajo condiciones más controladas, lo que reduce significativamente la variabilidad asociada a factores ambientales y operativos propios de la producción en planta. Al disponer de volúmenes pequeños, es posible dosificar con mayor precisión los componentes, agregados minerales y cemento asfáltico, y asegurar una mezcla homogénea.

Esta condición idealizada permite obtener propiedades representativas del diseño teórico, especialmente en lo que respecta a la densidad, contenido de vacíos y estabilidad volumétrica. Además, la compactación en laboratorio se realiza mediante métodos estandarizados como el ensayo Marshall o el compactador giratorio SUPERPAVE, lo cual proporciona mayor repetibilidad y comparabilidad entre mezclas (Montejo Fonseca, 2002).

3.10. Método Marshall

Es el método de dosificación más conocido para el diseño de mezclas asfálticas, aplicable inicialmente solo a hormigones asfálticos de tamaño máximo del agregado de 20 mm. Desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos y posteriormente por el Instituto de Asfalto (Asphalt Institute) (Kraemer et al., 2004).

El método Marshall se basa en la fabricación de briquetas de aproximadamente 2 ½ pulgadas de alto y 4 pulgadas de diámetro. El desempeño mecánico de las briquetas se evalúa variando la cantidad de cemento asfáltico que contienen. La prueba Marshall se utiliza para medir aspectos como la fluidez (deformación plástica bajo tensión) y la estabilidad (capacidad para soportar cargas sin deformarse). Estos resultados, junto con pruebas complementarias como la gravedad específica

aparente (ensayo Bulk) y la gravedad específica máxima teórica (ensayo Rice), permiten calcular las propiedades volumétricas de la mezcla y, en última instancia, determinar el contenido ideal de asfalto que cumple los requisitos de diseño de las normas.

3.11. Método SUPERPAVE

El método SUPERPAVE (SUperior PERforming Asphalt PAVement) constituye un sistema integral para la selección y diseño de mezclas asfálticas, que incorpora de forma explícita el comportamiento reológico del cemento asfáltico y sus interacciones con los agregados minerales bajo diferentes condiciones de carga y temperatura.

Este enfoque reconoce que el asfalto es un material viscoelástico, cuyo comportamiento varía significativamente en función del tiempo de aplicación de la carga y la temperatura (Montejo Fonseca, 2002):

- A altas temperaturas o bajo cargas sostenidas (como el paso lento de vehículos pesados), el asfalto tiende a comportarse como un fluido viscoso, siendo más susceptible a fenómenos de deformación permanente como el ahuellamiento.
- A bajas temperaturas o ante cargas de corta duración (como vehículos a alta velocidad), el material se comporta como un sólido elástico, lo que lo hace más vulnerable a agrietamientos térmicos.

Además, SUPERPAVE considera los efectos del envejecimiento del asfalto asociados a dos procesos principales (Montejo Fonseca, 2002):

- Oxidación, que implica la reacción de los componentes orgánicos del ligante con el oxígeno atmosférico, alterando su estructura química y aumentando su rigidez.
- Volatilización, que se refiere a la pérdida de fracciones ligeras del ligante debido a la evaporación, especialmente en condiciones de mezcla y compactación.

Ambos procesos afectan negativamente la flexibilidad del ligante, incrementando su susceptibilidad al agrietamiento con el paso del tiempo, especialmente en climas cálidos.

La caracterización del asfalto en el método SUPERPAVE no se basa únicamente en propiedades tradicionales como la viscosidad o penetración, sino que incluye parámetros reológicos medidos con equipos especializados, como el reómetro de corte dinámico (DSR) y el reómetro de flexión (BBR), permitiendo una evaluación más precisa del desempeño esperado del pavimento a lo largo de su vida útil (Montejo Fonseca, 2002).

3.12. Combinación de agregados

La combinación de agregados es un proceso en el diseño de mezclas asfálticas, que consiste en determinar las proporciones óptimas de cada tipo de agregado mineral disponible, una vez caracterizados individualmente mediante su análisis granulométrico. Este proceso tiene como objetivo obtener una curva granulométrica combinada que se ajuste a los rangos establecidos por la normativa vigente.

En el contexto nacional, la caracterización y especificación de los agregados se rige por la norma MOP-001-F 2002, la cual establece los límites granulométricos permitidos para mezclas asfálticas en función del tipo de capa y su aplicación estructural (MOP - 001 - F, 2002).

Se recomienda que la curva granulométrica resultante de la combinación se sitúe cercana al promedio entre los límites superior e inferior de las especificaciones normativas, con el fin de garantizar una mezcla bien graduada que ofrezca buenas propiedades de trabajabilidad, estabilidad y durabilidad.

Para lograr una combinación adecuada de agregados, se pueden emplear diversos métodos, como lo son: método de mínimos cuadrados, sistema de ecuaciones lineales y/o método de tanteo (prueba y error).

3.13. Ensayos de laboratorio

3.13.1. Ensayos de laboratorio en agregados

Para la caracterización de los materiales granulares es necesario realizar una serie de ensayos de laboratorio. Entre los más importantes se encuentran: el análisis granulométrico (ASTM International (2025)), el equivalente de arena (ASTM D2419), la resistencia al desgaste (ASTM C131), el peso específico y la absorción (ASTM C127 / ASTM C128), la detección de materiales deletéreos (ASTM C142), el desprendimiento del ligante (ASTM D1664), la resistencia al sulfato de sodio (ASTM C88), así como la determinación del contenido de partículas alargadas, aplanadas y fracturadas (ASTM D4791 / ASTM D5821).

Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se refiere al ensayo por el cual el agregado pasa por una serie de tamices normalizados, para lo cual se determina la distribución de los tamaños de las partículas que componen dicho agregado. Este procedimiento es importante dado que influye en la deformación permanente de las mezclas asfálticas, con lo que es deseable trabajar con mezclas con granulometrías densas para mitigar estos efectos (Delgado et al., 2006).

La granulometría afecta directamente tanto la calidad como los costos de las mezclas asfálticas, ya que para unir los agregados en una unidad sólida se requiere que cada partícula esté completamente cubierta por el cemento asfáltico. Una gradación adecuada proporciona menos espacio entre partículas, más agregado por unidad cúbica y mayor durabilidad de la mezcla (Gómez, 2022).

Los agregados destinados a la elaboración de la mezcla asfáltica deberán cumplir con una de las granulometrías especificadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, verificadas conforme a los procedimientos establecidos en la Norma INEN 696. La comprobación granulométrica se realizará mediante ensayos ejecutados sobre muestras obtenidas de forma periódica en los acopios,

en las tolvas de recepción en caliente y directamente de la mezcla asfáltica producida.

*Tabla 1. Requisitos de granulometría de agregados.
(MOP - 001 - F, 2002) [Tabla 405-5.1]*

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25,4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19,0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12,7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9,50 mm.)	56 - 80		90 - 100	100
Nº 4 (4,75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2,36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1,18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0,60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0,30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0,15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0,075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Los agregados deberán cumplir con los requisitos de calidad indicados en la sección 811.2 de MOP-001-F, 2002, para agregados tipo A, B o C, el cual indica que, los agregados estarán compuestos de partículas de piedra triturada, grava triturada, grava o piedra natural, arena, etc., de tal manera que cumplan los requisitos de graduación que se establecen en la Tabla 405-5.1. Estos se clasifican en (MOP - 001 - F, 2002):

- Agregados tipo A: El agregado grueso se produce mediante procesos de trituración. El agregado fino puede provenir de arena natural o de material triturado, y es posible incorporar un relleno mineral. Dicho relleno mineral puede incluir incluso cemento Portland, siempre que así se especifique para la obra.
- Agregados tipo B: Al menos el 50 % del agregado grueso se obtiene mediante trituración. El agregado fino y el relleno mineral pueden ser de origen triturado o proceder de yacimientos naturales.

- Agregados tipo C: Los agregados pueden provenir de depósitos naturales o de procesos de trituración, siempre y cuando se haya comprobado que la estabilidad, determinada mediante el ensayo Marshall, se encuentre dentro de los límites establecidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Los agregados deberán ser fragmentos limpios, duros y resistentes, exentos de materia vegetal, así como de un contenido excesivo de partículas planas, alargadas, blandas o disgregables, y libres de material mineral recubierto de arcilla u otras sustancias perjudiciales. Para agregados que pasan el tamiz INEN 0.425 mm. (Nº 40), deberá tener un índice de plasticidad menor a 4, según Normas INEN 691 y 692 (MOP - 001 - F, 2002).

La desintegración o pérdida total del agregado máximo del 12%, cuando se lo someta a 5 ciclos de inmersión y lavado con sulfato de sodio, en la prueba de durabilidad, según la Norma INEN 863, salvo que las especificaciones especiales indiquen otra cosa (MOP - 001 - F, 2002).

Los agregados gruesos retenidos en el tamiz INEN 4.75 mm. deben tener cierta angularidad. El 85% de agregado grueso deberá tener por lo menos una cara fracturada y el 80% del agregado grueso por lo menos dos caras fracturadas, según la Norma ASTM D5821 (MOP - 001 - F, 2002).

Adicionalmente, el relleno mineral deberá cumplir con las especificaciones establecidas en la Norma AASHTO M 17. El porcentaje mínimo de vacíos en los agregados finos será del 45%, determinado conforme al método de ensayo ASTM C1252. Asimismo, el porcentaje máximo permitido de partículas alargadas y achatadas no deberá exceder el 10% en peso, de acuerdo con lo establecido en ASTM D4791 (MOP - 001 - F, 2002).

Equivalente de arena

El equivalente de arena es un ensayo que determina la proporción relativa de materiales indeseables, como arcillas, finos plásticos y polvos, presentes en suelos

granulares y agregados finos que pasan por la malla N.º 4 (4,75 mm). Este parámetro es crucial para evaluar la calidad y limpieza de los agregados destinados a mezclas asfálticas (ASTM International, 2022).

El equivalente de arena realizado en los agregados pasantes el tamiz 4.75 mm según AASHTO T 176 (ASTM D2419), deberán tener los valores mínimos recomendados presentes en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (MOP - 001 - F, 2002).

*Tabla 2. Equivalente de arena.
(MOP - 001 - F, 2002) [Sección 811.2.02a]*

	Equivalente de Arena	
	Tráfico Liviano y Mediano	Tráfico Pesado
Base	35	40
Capa de Rodadura	45	50

Resistencia al desgaste

La resistencia al desgaste de los agregados se evalúa mediante el ensayo de abrasión Los Ángeles, el cual determina su capacidad para resistir la rotura, desintegración o fragmentación bajo condiciones que simulan la acción del tráfico. Este ensayo, caracterizado por su simplicidad y eficacia, ha sido ampliamente adoptado en especificaciones técnicas a nivel mundial para el control de calidad de agregados destinados a mezclas asfálticas (ASTM International, 2020).

El desgaste máximo de los agregados gruesos será del 40% luego de 500 revoluciones de la máquina de Los Ángeles, según el ensayo de abrasión de la norma INEN 860 (MOP - 001 - F, 2002).

Peso específico aparente y absorción

Estas propiedades son esenciales para los cálculos volumétricos en el diseño de mezclas asfálticas y para el control de calidad. Se distinguen dos tipos de peso específico:

Peso específico aparente (Gsa): Relación entre la masa en aire de una unidad de volumen de material impermeable y la masa de un volumen igual de agua destilada.

Peso específico bulk (Gsb): Considera tanto los vacíos permeables como los impermeables presentes en el material.

La absorción del agregado está estrechamente vinculada con su porosidad, lo cual incide directamente en la cantidad de asfalto requerida para alcanzar el contenido óptimo de diseño. Estos valores se obtienen mediante el ensayo de densidad y densidad relativa, conforme a las normas vigentes y según el tipo de agregado. (MOP - 001 - F, 2002).

Deletéreos

Los materiales deletéreos son partículas dañinas que pueden afectar negativamente el desempeño de las mezclas asfálticas. Incluyen:

- Terrones de arcilla: Partículas que se desintegran fácilmente y generan finos plásticos.
- Partículas desmenuzables: Materiales que se fracturan bajo compactación o carga de tráfico.
- Materia orgánica: Componentes que pueden afectar la adherencia del ligante asfáltico.
- Partículas blandas: Elementos que no resisten las cargas de servicio.

En las mezclas asfálticas en caliente no se recomienda el uso de agregados que contengan sustancias deletéreas, salvo que su presencia pueda reducirse mediante lavado u otros métodos de tratamiento (Manual de Laboratorio).

El máximo porcentaje de materiales deletéreos en los agregados es de 1% en peso según la Norma ASTM C142 (MOP - 001 - F, 2002).

Desprendimiento del ligante

El stripping (desprendimiento de ligante) se define como la pérdida de adherencia entre la película de asfalto y la superficie del agregado debido a la acción del agua.

El desprendimiento ocurre por varios mecanismos:

- Desplazamiento: Penetración de agua en la superficie de agregados a través de rupturas en la película asfáltica

- Desprendimiento: Por suciedad, humedad o incompatibilidad mineralógica
- Emulsificación espontánea: Formación de emulsión invertida agua-asfalto.

Los agregados al ser impregnados con material bituminoso, más de un 95% de este material permanecerá, después del ensayo de resistencia a la peladura, según la Norma AASHTO T 182 (MOP - 001 - F, 2002).

3.13.2. Ensayos de laboratorio en el betún asfáltico

Penetración

Mediante el uso del equipo de penetración, se introduce la aguja estándar en el espécimen de cemento asfáltico AC-20, bajo condiciones controladas de peso, tiempo y temperatura, conforme a lo establecido en las normas NTE INEN 917 y ASTM D5. Este ensayo permite determinar la consistencia del betún a través de la medida de penetración. En este contexto, a menor valor de penetración, mayor es la dureza y consistencia del material, lo que indica un betún más rígido y resistente a las deformaciones.

Punto de ablandamiento

De acuerdo con las normas NTE INEN 920 y ASTM D36, se empleó el método del anillo y bola para determinar la temperatura de ablandamiento del asfalto AC-20. Este ensayo permite identificar la temperatura a la cual el material cambia de un estado sólido a uno blando, constituyendo un indicador de la temperatura máxima de servicio a la que pueden ser utilizadas las mezclas asfálticas sin perder estabilidad.

Punto de inflamación

De acuerdo con las normas NTE INEN 0808 y ASTM D92, se emplea el método de la copa abierta Cleveland para determinar el punto de ignición mínimo de un asfalto. Este ensayo permite establecer la temperatura mínima a la cual el material emite suficientes vapores para formar una mezcla inflamable en presencia de una fuente de ignición externa. Este parámetro constituye un indicador de seguridad y estabilidad térmica, útil

para evaluar el comportamiento del asfalto durante su calentamiento, transporte y aplicación.

Peso específico del betún

De acuerdo con las normas NTE INEN 923 y ASTM D70, se determina el peso específico del betún asfáltico mediante la medición de la relación entre la masa y el volumen del material a una temperatura controlada. Este ensayo permite establecer la densidad real del asfalto, la cual es un parámetro esencial para el control de calidad, la identificación de variaciones en el refinamiento y la dosificación precisa de mezclas asfálticas.

Viscosidad a 60 °C

De acuerdo con la norma ASTM D4402, se determinó la viscosidad dinámica del betún asfáltico AC-20 a una temperatura de 60 °C, utilizando un viscosímetro rotacional Brookfield.

Este ensayo permite evaluar la resistencia al flujo del asfalto bajo condiciones controladas de temperatura y esfuerzo de corte, expresando los resultados en centipoises (cP) o Pa·s. El valor obtenido representa la viscosidad absoluta del ligante, parámetro fundamental para estimar su comportamiento reológico y su respuesta frente a deformaciones permanentes a temperaturas intermedias de servicio.

Viscosidad cinemática a 135 °C

De acuerdo con la norma ASTM D2170, se determina la viscosidad cinemática del betún asfáltico a una temperatura elevada de 135 °C, utilizando un viscosímetro capilar tipo Saybolt-Furol o Cannon-Fenske.

La viscosidad cinemática se define como la razón entre la viscosidad dinámica y la densidad del asfalto, y se expresa en centistokes (cSt). Este valor indica la fluidez del betún durante su manipulación, bombeo y mezclado con los agregados, siendo un parámetro fundamental para el control de temperatura en las plantas de mezcla asfáltica.

Pérdida de masa

De acuerdo con la norma NTE INEN 919 (equivalente a ASTM D6), se determina la pérdida de masa del betún asfáltico AC-20 mediante calentamiento controlado en horno.

El ensayo consiste en someter una muestra del ligante asfáltico a una temperatura de 163 °C durante un período de cinco horas, en un recipiente abierto, bajo condiciones controladas de tiempo, temperatura y circulación de aire.

Ductilidad a 25 °C

De acuerdo con las normas NTE INEN 916 y ASTM D113, se determina la ductilidad del betún asfáltico AC-20, mediante la elongación de una muestra a una velocidad constante y a una temperatura de 25 °C.

El ensayo consiste en medir la distancia, en centímetros, que puede estirarse el betún antes de romperse, lo que permite evaluar su capacidad de deformación y su comportamiento cohesivo.

3.13.3. Ensayos de laboratorio en la mezcla asfáltica

Los ensayos que deben aplicarse a la mezcla asfáltica deberán verificar el cumplimiento de los parámetros establecidos para la relación Filler/Betún, así como de las relaciones y criterios definidos por el método Marshall para el diseño y control de la mezcla.

Relación Filler/Betún

Para vías de tráfico pesado y muy pesado deberán cumplir que la relación entre el porcentaje en peso del agregado pasante del tamiz INEN 75 micras (N° 200) y el contenido de asfalto en porcentaje en peso del total de la mezcla (relación filler/betún), sea mayor o igual a 0,8 y nunca superior a 1,2 (MOP - 001 - F, 2002).

Ensayo método Marshall

Las muestras de hormigón asfáltico serán tomadas de la mezcla preparada de acuerdo con la fórmula maestra de obra, y sometidas a los ensayos según el método Marshall, y deberán cumplir los requisitos indicados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (MOP - 001 - F, 2002).

Tabla 3. Parámetros del método Marshall.
(MOP - 001 - F, 2002) [Tabla 405-5.4].

TIPO DE TRAFICO	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Marshall								
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (libras)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (pulgada/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacíos en mezcla								
- Capa de Rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
- Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
- Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9
% Vacíos agregados	VER TABLA 405-5.5							
Relación filler/betún	0,8	1,2	0,8	1,2				
% Estabilidad retenida luego 7 días en agua temperatura ambiente								
- Capa de Rodadura	70	----	70	----				
- Intermedia o base	60	----	60	----				

NOTAS:

1.- Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60 °C, se consideran satisfactorias si cumplen con los criterios cuando se ensayan a 38 °C, y se colocan 100mm por debajo de la superficie.

2.- Clasificación del tráfico. Es función de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDP) esperada por el carril de diseño en el momento de poner en funcionamiento la vía, luego de su construcción o de su rehabilitación. Los vehículos pesados no comprenden autos, camionetas ni tractores sin remolque.

TRAFICO	IMDP
Liviano	Menos de 50
Medio	50 a 200
Pesado	200 a 1000
Muy pesado	Más de 1000

Los porcentajes mínimos de vacíos en el agregado mineral (VMA), según el tipo de mezcla, requeridos para el diseño se establecen en la (MOP - 001 - F, 2002).

*Tabla 4. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).
(MOP - 001 - F, 2002) [Tabla 405-5.5]-*

Tipo de Mezcla	VMA, Mínimo (%)
A	16
B	15
C, D	14
E	13

Nota. Las mezclas abiertas se excluyen de esta comprobación.

Debido a que en la norma MOP-001-F-2002 no se explicita con suficiente claridad la correspondencia entre el tipo de mezcla (A-E) y el tamaño máximo nominal del agregado para la determinación del VMA mínimo, se adopta como referencia inicial la Tabla 405-5.5, en la cual los tipos C y D exigen un VMA mínimo de 14%. No obstante, con el fin de sustentar el criterio de selección del VMA en función del tamaño máximo nominal (TMN) y del porcentaje de vacíos de diseño (V_a), se emplea la guía del Asphalt Institute (2014), que presenta de forma directa los valores mínimos de VMA en función de dichas variables.

*Tabla 5. Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto (VFA).
(Asphalt Institute, 2014).*

TIPO DE TRAFICO	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Criterios Marshall								
% Vacíos agregados mineral (VMA)	Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.							
% Vacíos rellenos de asfalto (VFA)	65	75	65	75	65	78	70	80

En consecuencia, el parámetro VFA se determina conforme a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, mientras que el parámetro VMA se define considerando el TMN y el V_a de diseño, según se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla 6. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral según el TMN (VMA).
(Asphalt Institute, 2014).

Tamaño máximo nominal (TMN) de partícula		VMA mínimo		
		% de diseño de vacíos totales (Va)		
[mm]	[pulg]	3,0	4,0	5,0
1,18	No. 16	21,5	22,5	23,5
2,36	No. 8	19	20	21
4,75	No. 4	16	17	18
9,5	3/8"	14	15	16
12,5	1/2"	13	14	15
19	3/4"	12	13	14
25	1,0"	11	12	13
37,5	1,5"	10	11	12
50	2,0"	9,5	10,5	11,5
63	2,5"	9	10	11

Ensayo Wheel Tracking

El ensayo de Wheel Tracking, o Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT), evalúa la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación permanente (ahuellamiento) y al daño por humedad bajo cargas repetidas. Según la norma AASHTO T324-19, el ensayo consiste en colocar a las probetas compactadas en una cámara climatizada para mantener la temperatura de ensayo recomendada según el tipo de asfalto, luego, con el equipo se aplica el paso cíclico de una rueda sobre la probeta, reproduciendo el efecto del tránsito vehicular en condiciones controladas, el equipo para este ensayo se puede observar en la Figura 1.

La prueba permite identificar mezclas susceptibles a fallas tempranas provocadas por estructura granular débil, rigidez insuficiente del ligante, daño por humedad o mala adherencia entre el agregado y el asfalto (Rahman & Mustaque, 2014).

Desarrollada en Alemania en los años 70 y adoptada en EE. UU. en los 90, esta metodología ha demostrado alta correlación entre los resultados de laboratorio y el desempeño real en campo, según Aschenbrenner y Currier (1993), siendo sensible a

factores como temperatura de ensayo, calidad del agregado, rigidez del asfalto, envejecimiento y aditivos anti-desprendimiento.



Figura 1. Equipo de rueda de carga – Wheel Tracking.
Fuente: (Flores et al., 2018)

Ensayo de flexión en viga de cuatro puntos

El ensayo de flexión en viga de cuatro puntos es uno de los métodos más utilizados para evaluar la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas, debido a su capacidad para reproducir el estado tensional crítico que ocurre en la fibra inferior de la mezcla asfáltica sometido a cargas repetidas del tránsito (Nosetti et al., 2020). En esta configuración, la probeta prismática se apoya en dos puntos exteriores mientras dos cargas internas aplican flexión pura en la zona central, como se puede apreciar en la Figura 2. Esta disposición permite generar una región amplia sometida a un momento flector constante, evitando concentraciones de esfuerzo y permitiendo estudiar el comportamiento real de propagación de grietas bajo tensiones de tracción controladas (Asphalt Institute, s/f).

Durante el ensayo, la probeta se coloca dentro de una cámara climática que mantiene constante la temperatura especificada, ya que la respuesta mecánica del asfalto es altamente dependiente de las condiciones térmicas. La carga aplicada es sinusoidal y repetitiva, normalmente en rangos de 0 a 10 Hz, lo que reproduce el tránsito vehicular en campo. Según la norma AASHTO T321-17, el ensayo puede ejecutarse bajo control de deformación o control de carga. En control de deformación, el más usado para

efectos de fatiga, la deformación se mantiene constante y el esfuerzo disminuye conforme el material pierde rigidez por acumulación de daño.

El criterio de falla más utilizado consiste en determinar el número de ciclos necesarios para que el módulo de rigidez de la mezcla se reduzca al 50% de su valor inicial, lo cual representa un deterioro significativo de la estructura interna del material. Este enfoque permite correlacionar la capacidad de una mezcla para resistir la repetición de cargas con su desempeño en campo, identificando su susceptibilidad a la fisuración por fatiga (Nosetti et al., 2020).



*Figura 2. Equipo de resistencia a fatiga en 4 puntos.
Fuente: (Nosetti et al., 2020)*

El Instituto de Asfalto (Asphalt Institute, s/f), describe además varios ensayos de desempeño que permiten predecir el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo carga y comparar diferentes variables de diseño. Entre ellos destacan el ensayo de rendimiento de mezcla acelerada (AMPT), que determina el módulo dinámico y la susceptibilidad al ahuellamiento; el ensayo de tensión compacta en disco [DC(t)], orientado a evaluar la energía de fractura en probetas cilíndricas; y el ensayo de tensión indirecta (IDT), utilizado para medir resistencia y deformaciones a bajas temperaturas. También se incluyen métodos especializados como el SUPERPAVE Shear Test (SST), que analiza la respuesta al corte, así como pruebas como el Resilient Modulus y el Asphalt Pavement Analyzer (APA), que valoran la resistencia a deformaciones y al daño

acumulado. En su mayoría, estos ensayos son destructivos y permiten caracterizar propiedades mecánicas críticas para el diseño y comportamiento de mezclas asfálticas.

4. Materiales y metodología

En el presente proyecto de tesis se elaboran dos tipos de mezclas asfálticas, una de granulometría abierta y otra de granulometría cerrada. Ambas serán comparadas a partir del diseño de mezcla asfáltica empleado en la planta de producción, con el fin de analizar su comportamiento y determinar las variaciones en el desempeño en función de la distribución granulométrica.

Para asegurar la calidad y el comportamiento estructural de las mezclas asfálticas, es fundamental realizar una caracterización completa de los áridos mediante ensayos normalizados. En esta etapa del estudio, se aplicarán diferentes pruebas conforme a estándares ASTM para evaluar las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los agregados, tanto gruesos como finos. La metodología a seguir para el presente estudio tiene un enfoque experimental, complementado con la revisión de información técnica disponible. El análisis se realizará mediante la elaboración de mezclas asfálticas con diferentes combinaciones granulométricas, utilizando materiales suministrados por una planta de producción. Estas combinaciones serán diseñadas conforme a las especificaciones establecidas en la normativa nacional vigente, garantizando el cumplimiento de los requisitos técnicos. Las mezclas serán sometidas a evaluaciones que permitan determinar sus características volumétricas, asegurando la obtención de resultados confiables, comparables y representativos.

4.1 Caracterización de áridos

En esta sección se detallan los ensayos necesarios para la caracterización de los áridos empleados en la elaboración de mezclas asfálticas, a continuación, se presenta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la cual se detallan los ensayos a seguir:

Tabla 7. Ensayos utilizados para la caracterización de áridos.
Elaboración propia.

ENSAYO	NORMA
Análisis granulométrico	ASTM D6913
Equivalente de arena	ASTM D2419
Resistencia al desgaste	ASTM C131
Peso específico aparente / Absorción agregado grueso	ASTM C127
Peso específico aparente / Absorción agregado fino	ASTM C128
Deletéreos	ASTM C142

4.1.1. Análisis granulométrico

Agregado de 3/4":

En el ensayo de análisis granulométrico por lavado, realizado conforme a la norma ASTM D 422, se utilizó una muestra inicial de 2508 g de material triturado de 3/4" proveniente de la cantera de VIPESA. En la Figura 3 se presenta los tamices utilizados para el agregado de 3/4":



Figura 3. Granulometría.
Elaboración propia.

Para este análisis granulométrico se utilizó la faja granulométrica indicada en la

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:

Tabla 8 Tamices utilizados para análisis granulométrico agregado de 3/4''.

Fuente: ASTM

Tamiz	Abertura (mm)
3"	76,20
2½"	63,50
2"	50,80
1½"	38,10
1"	25,40
¾"	19,00
½"	12,70
⅜"	9,53
Nº4	4,75
PASA No. 4	

Una vez completado el tamizado, se registra el peso retenido en cada tamiz y se calcula el porcentaje retenido y acumulado, así como el porcentaje que pasa. A continuación, se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** dicho análisis granulométrico para el agregado de ¾.

Tabla 9. Análisis granulométrico agregado de ¾.

Elaboración propia.

Tamiz	Abertura (mm)	Retenido Parcial (g)	Retenido Acumulado (g)	% Que Pasa (%)	% Que Pasa
3"	76,20	-	-	-	100
2½"	63,50	-	-	-	100
2"	50,80	-	-	-	100
1½"	38,10	-	-	-	100
1"	25,40	-	-	-	100
¾"	19,00	-	-	-	100
½"	12,70	1451,00	1451,00	57,85	42
⅜"	9,53	750,00	2201,00	87,76	12,2
Nº4	4,75	301,00	2502,00	99,76	0,2
PASA No. 4		6,00			

Por último, una vez realizado el análisis granulométrico se grafica su respectiva curva granulométrica indicada en la Figura 4:

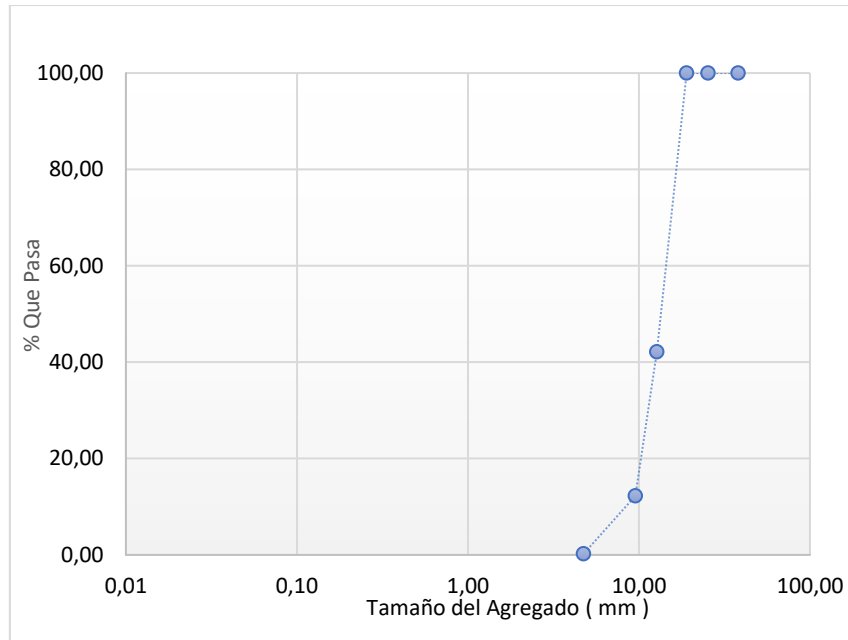


Figura 4. Curva granulométrica agregado de 3/4.
Elaboración propia.

Agregado de 3/8:

Para este agregado se utilizó el mismo procedimiento indicado en el numeral

Agregado de 3/4:

A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se indica la faja de trabajo:

Tabla 10. Tamices utilizados para análisis granulométrico agregado de 3/8''.

Fuente: ASTM International (2025).

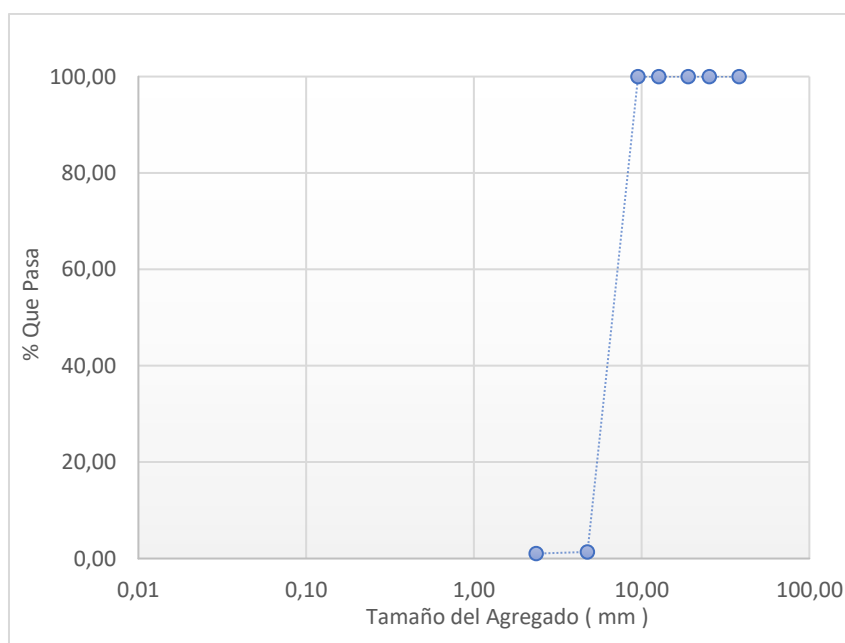
Tamiz	Abertura (mm)
3"	76,20
2½"	63,50
2"	50,80
1½"	38,10
1"	25,40
¾"	19,00
½"	12,70
3/8"	9,53
N°4	4,75
N°8	2,36

Así mismo a continuación en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el análisis granulométrico del agregado de 3/8.

*Tabla 11. Análisis granulométrico agregado de 3/8.
Elaboración propia.*

Tamiz	Abertura (mm)	Ret. Parcial (gr.)	Ret Acumulado (gr.)	% Que Pasa (%)
3"	76,20	-	-	100
2½"	63,50	-	-	100
2"	50,80	-	-	100
1½"	38,10	-	-	100
1"	25,40	-	-	100
¾"	19,00	-	-	100
½"	12,70	-	-	100
3/8"	9,53	-	-	100
N°4	4,75	2903,00	2903,00	98,64
N°8	2,36	10,00	2913,00	98,98
PASA No. 8		30,00		

Igualmente, a continuación, en la Figura 5 se presenta la curva granulométrica para el agregado de 3/8.



*Figura 5. Curva granulométrica agregado de 3/8.
Elaboración propia.*

Fino triturado (polvo más arena):

A continuación, se indica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** faja de trabajo:

*Tabla 12. Tamice utilizados para análisis granulométrico del fino triturado.
Fuente: (ASTM International, 2025).*

Tamiz	Abertura (mm)
3"	76,20
2½"	63,50
2"	50,80
1½"	38,10
1"	25,40
¾"	19,00
½"	12,70
3/8"	9,53
N°4	4,75
PASA N°4	
N°8	2,36
N°50	0,30
N°200	0,075

Así mismo se presenta su respectivo análisis granulométrico en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para el fino triturado:

*Tabla 13. Análisis granulométrico agregado de fino triturado.
Elaboración propia.*

Tamiz	Abertura (mm)	Ret. Parcial (gr.)	Ret Acumulado (gr.)	Ret Acumulado (%)	% Que Pasa
3"	76,20				100
2½"	63,50				100
2"	50,80				100
1½"	38,10				100
1"	25,40				100
¾"	19,00				100
½"	12,70				100
3/8"	9,53				100
N°4	4,75	2,80	2,80	0,30	100
PASA N°4					
N°8	2,36	211,30	214,10	23,07	77
N°50	0,30	522,80	736,90	79,41	21
N°200	0,075	125,20	862,10	92,90	7,1
PASA 200		3,60			

Ya obtenidos los datos de análisis granulométrico se presenta la curva granulométrica en la Figura 6.

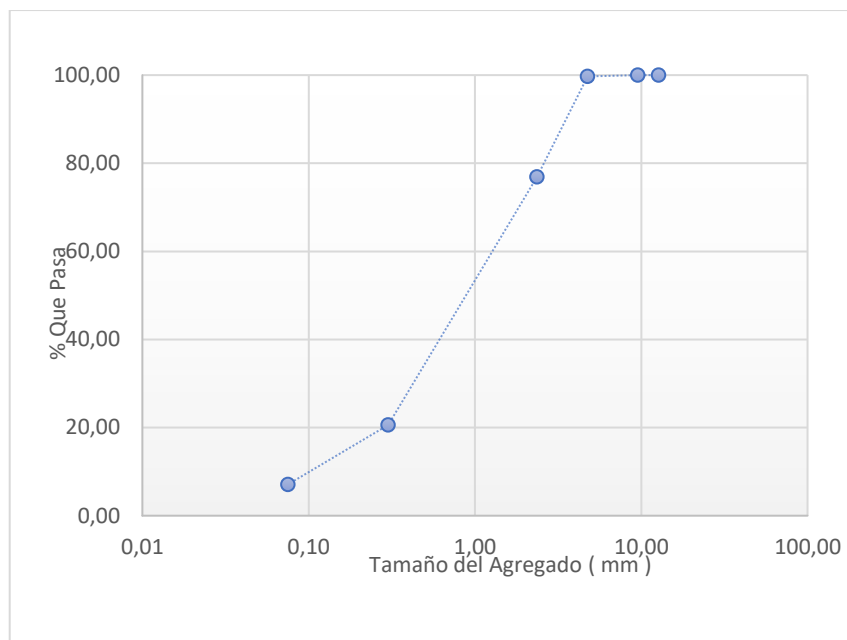


Figura 6. Curva granulométrica fino triturado.
Elaboración propia.

4.1.2. Equivalente de arena

Aplicando la normativa ASTM D2419, se procedió a calcular el equivalente de arena a continuación se hace un pequeño resumen del ensayo:

Preparación de la muestra:

- Se tamizó la muestra para obtener el material que pasa por el tamiz N° 4 (4,75 mm).
- Pesar $85 \pm 0,5$ g de muestra seca.

Llenado del cilindro:

- Colocar la muestra en el cilindro graduado de 1000 mL
- Añadir solución estándar (cloruro de calcio + glicerina + formalina) hasta alcanzar la marca de 381 mm.

Agitación:

- Tapar el cilindro y agitar vigorosamente de 30 a 60 segundos (con agitador mecánico o manual con 90 ciclos en 30 segundos) para dispersar las partículas.

Sedimentación:

- Colocar el cilindro en posición vertical y dejar reposar 20 minutos sin mover ni golpear.

Lectura de nivel de arcilla:

- Leer y registrar la altura de la parte superior de la suspensión de arcillas (en cm).

Lectura del nivel de arena:

- Insertar la varilla de medición en el cilindro hasta que toque en sedimento de arena.
- Girar suavemente para asentarla y leer la altura superior del sedimento de arena (en cm).

A continuación, se presenta una imagen del ensayo de equivalente de arena en la Figura 7:



*Figura 7. Equivalente de arena.
Elaboración propia.*

Cálculo del Equivalente de Arena (EA):

El procedimiento anteriormente explicado se realizó una vez y posteriormente se repitió dos veces más, obteniendo así tres lecturas en total. A continuación, en la Ecuación 1, se presenta la fórmula de aplicación para las tres lecturas realizadas:

$$EA = \frac{\text{Altura del sedimento de arena}}{\text{Altura de la suspensión de arcilla}} \times 100$$

Ecuación 1

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el resumen de las tres lecturas:

*Tabla 14. Lecturas de equivalente de arena.
Elaboración propia.*

	LECTURA 1 [cm]	LECTURA 2 [cm]	LECTURA 3 [cm]
Lectura en el nivel superior de la arcilla	16,1	16,0	16,0
Lectura en el nivel superior de la arena	9,0	9,1	9,0

Con estos valores se procedió a calcular el promedio correspondiente, el cual se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

*Tabla 15. Promedio de lecturas de equivalente de arena.
Elaboración propia.*

	RESULTADO 1	RESULTADO 2	RESULTADO 3
Equivalente de arena	56%	57%	56%
Media de equivalente de arena	56,34%		

4.1.3. Resistencia al desgaste

Para la aplicación de este ensayo según la normativa ASTM C131, se ocuparon los siguientes datos mostrados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

*Tabla 16. Datos para ensayo de abrasión para material de 3/8.
Elaboración propia.*

MATERIAL 3/8				
Método	A	B	C	D
Diámetro	CANTIDAD DE MATERIAL (gramos)			

Pasa el tamiz	Retenido en Tamiz				
1 1/2"	1"	(1250±25)			
1"	3/4"	(1250±25)			
3/4"	1/2"	(1250±10)	(2500±10)		
1/2"	3/8"	(1250±10)	(2500±10)		
3/8"	1/4"	(2500±10)			
		2500			
1/4"	Nº 4	(2500±10)			
		2500			
Nº 4	Nº 8	(5000±10)			
PESO TOTAL		(5000±10)	(5000±10)	(5000±10)	(5000±10)
		2500			
Nº de Esferas		12	11	8	6
Nº de Revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación (minutos)		15	15	15	15

Tabla 17. Datos para ensayo de abrasión para material de 3/4.
Elaboración propia.

MATERIAL 3/4					
Método		A	B	C	D
Diámetro		CANTIDAD DE MATERIAL (gramos)			
Pasa el tamiz	Retenido en Tamiz				
1 1/2"	1"	(1250±25)			
1"	3/4"	(1250±25)			
3/4"	1/2"	(1250±10)	(2500±10)		
		2500			
1/2"	3/8"	(1250±10)	(2500±10)		
		2500			
3/8"	1/4"	(2500±10)			
1/4"	Nº 4	(2500±10)			
Nº 4	Nº 8	(5000±10)			
PESO TOTAL		(5000±10)	(5000±10)	(5000±10)	(5000±10)
		5000			
Nº de Esferas		12	11	8	6
Nº de Revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación (minutos)		15	15	15	15

Ya con los datos a continuación se presenta un pequeño resumen de la aplicación del ensayo:

Secado de la muestra:

- Secar el agregado grueso al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta masa constante.

Selección de la muestra:

- Escoger la fracción granulométrica correspondiente al grado especificado (A, B, C, etc.), conforme a la norma ASTM C131. Pesar la muestra con una precisión de ± 10 g.

Carga de la muestra en la máquina:

- Introducir la muestra seca en la máquina de Los Ángeles, junto con el número prescrito de esferas de acero (masa total de $4,54 \pm 0,02$ kg).

Rotación del tambor:

- Hacer girar el tambor de la máquina a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto, durante un total de 500 revoluciones.

Descarga y tamizado:

- Al finalizar, descargar el contenido de la máquina. Tamizar la muestra con el tamiz No. 12 (1,70 mm) para separar el material desgastado.

Secado del material retenido:

- Lavar el material retenido en el tamiz, secarlo nuevamente a 110 ± 5 °C hasta masa constante.

Pesaje final:

- Pesar el material retenido en el tamiz No. 12. Calcular la pérdida de masa como porcentaje respecto a la masa inicial de la muestra.

$$\text{Pérdida por abrasión (\%)} = \left(\frac{A - B}{A} \right) \times 100$$

Ecuación 2

Donde:

A = masa inicial de la muestra (en gramos)

B = masa final del material retenido en el tamiz No. 12 (1.70 mm), luego del ensayo (en gramos)

A continuación, se presenta los resultados obtenidos para el agregado de 3/8:

- La masa inicial de la muestra fue de 5000 gramos
- La masa final del material retenido en el tamiz No. 12 fue de 4371 gramos
- Aplicando la Ecuación 2 se obtuvo una pérdida por abrasión del **12,58%**.

Igualmente, ya aplicado al ensayo se presenta los resultados obtenidos para el agregado de 3/4:

- La masa inicial de la muestra fue de 5000 gramos
- La masa final del material retenido en el tamiz No. 12 fue de 4412 gramos
- Aplicando la Ecuación 2 se obtuvo una pérdida por abrasión del **11,76%**.

4.1.4. Peso específico aparente / Absorción agregado grueso

A continuación, se presenta un resumen de la aplicación del ensayo:

Secado inicial:

- Secar el agregado en horno a 110 ± 5 °C hasta masa constante.
Dejar enfriar a temperatura ambiente.

Pesado seco (C):

- Pesar el agregado seco al aire.

Saturación:

- Sumergir el agregado en agua por 24 ± 4 horas.

Estado SSS (B):

- Retirar el agregado del agua, escurrir, secar superficialmente con toalla hasta eliminar el brillo de agua, y pesar.

Pesado sumergido (A):

- Colocar el agregado en una canasta sumergida en agua y pesar bajo el agua.

Cálculos:

- Determinar peso específico seco, SSS, aparente y absorción usando las masas obtenidas.

$$\text{Peso específico seco: } \frac{C}{B - A}$$

Ecuación 3

$$\text{Peso específico SSS: } \frac{B}{B - A}$$

Ecuación 4

$$\text{Peso específico aparente: } \frac{C}{C - A}$$

Ecuación 5

$$\text{Absorción: } \frac{B - C}{C}$$

Ecuación 6

Donde:

A: masa del agregado sumergido en agua

B: masa del agregado en estado SSS

C: masa del agregado seco al horno

Una vez ejecutado el ensayo se presenta los resultados del agregado de 3/4 en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

*Tabla 18. Peso específico del agregado de 3/4.
Elaboración propia.*

A	Masa del agregado en condición sumergida	763,20
B	Masa del agregado saturado con superficie seca	1214,30
C	Masa del agregado en estado seco	1198,00
1)	Densidad relativa a granel (Gravedad específica Bulk)	2,66
2)	Densidad relativa saturada con superficie seca (SSS)	2,69
3)	Densidad relativa aparente	2,76
4)	Capacidad de absorción de agua del agregado	1,36%

Igualmente, se presenta los datos y valores obtenidos para el agregado de 3/8 en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

*Tabla 19. Peso específico del agregado de 3/8.
Elaboración propia.*

A	Masa del agregado en condición sumergida	765,50
B	Masa del agregado saturado con superficie seca	1215,30
C	Masa del agregado en estado seco	1198,60
1)	Densidad relativa a granel (Gravedad específica Bulk)	2,66
2)	Densidad relativa saturada con superficie seca (SSS)	2,70
3)	Densidad relativa aparente	2,77
4)	Capacidad de absorción de agua del agregado	1,39%

4.1.5. Peso específico aparente / Absorción agregado fino

Saturación inicial:

- Sumergir el agregado fino en agua por al menos 24 horas.

Estado SSS:

- Escurrir y secar hasta que el agregado esté saturado superficialmente seco (sin brillo, forma cono al compactar).

Picnómetro con agregado (D):

- Llenar el picnómetro parcialmente con agua, añadir el agregado SSS, completar con agua, eliminar burbujas y pesar.

Picnómetro con agua (B):

- Vaciar, lavar el agregado, llenar solo con agua y pesar.

Secado y pesado seco (C):

- Secar el agregado en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante y pesar.

Picnómetro vacío (A):

- Pesar el picnómetro vacío.

Cálculos:

- Con los valores de masa, calcular peso específico seco, SSS, aparente y absorción.

$$\text{Peso específico seco: } \frac{C}{D - B}$$

Ecuación 7

$$\text{Peso específico seco: } \frac{C}{C + B - D}$$

Ecuación 8

$$\text{Peso específico seco: } \frac{C}{D - (D - B)}$$

Ecuación 9

$$\text{Peso específico seco: } \left(\frac{B - C}{C} \right) \times 100$$

Ecuación 10

Al igual que el agregado fino triturado una vez ejecutado el ensayo se presenta los resultados del agregado de 3/4 en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

*Tabla 20. Peso específico del agregado fino triturado.
Elaboración propia.*

A	Masa del agregado en condición saturada y superficialmente seca	500,00
B	Masa del picnómetro con agua y agregado	1612,30
C	Masa del picnómetro lleno únicamente con agua	1301,90
D	Masa del agregado en estado seco	492,30
1)	Gravedad específica a granel (Bulk)	2,60
2)	Gravedad específica saturada superficialmente seca (SSS)	2,64
3)	Gravedad específica aparente	2,71
4)	Porcentaje de absorción del agregado	1,56%

4.1.6. Deletéreos

Preparación de la muestra:

- Seleccionar una cantidad representativa de agregado fino o grueso (según el tipo a ensayar) en este caso para el agregado grueso se utilizó 2000 gramos y para el fino 100 gramos.
- Lavar para eliminar polvo y partículas sueltas.
- Secar al estado seco al aire o SSS según el método aplicado.

Separación por flotación:

- Colocar el agregado en una solución líquida de densidad conocida (típicamente una mezcla de cloruro de zinc o bromoformo, con densidad de ~2,0 a 2,2 g/cm³).
- Remover suavemente para liberar partículas adheridas.

Identificación de partículas flotantes:

- Las partículas que flotan en la solución son consideradas deletéreas (ej.: lignito, carbón, madera, etc.)
- Recoger cuidadosamente estas partículas usando pinzas o una cuchara pequeña.

Lavado y secado:

- Lavar las partículas flotantes con agua destilada para eliminar residuos de la solución pesada.
- Secarlas en horno a 110 ± 5 °C hasta masa constante.

Pesaje:

- Pesar las partículas deletéreas secas.
- También se debe conocer la masa total del agregado sometido al ensayo.

$$\text{Porcentaje de partículas deletéreas} = \left(\frac{W_d}{W_t} \right) \times 100$$

Ecuación 11

Donde:

W_d : masa seca de las partículas deletéreas recuperadas (g)

W_t : masa total de la muestra de agregado analizada (g)

A continuación, se presentan los datos obtenidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** tras la ejecución del ensayo de partículas deletéreas, el cual tiene como finalidad determinar la pérdida de masa y la resistencia de los agregados a la acción mecánica o abrasiva:

*Tabla 21. Resumen de ensayo de deletéreos agregado fino y grueso.
Elaboración propia.*

Tamiz	Peso Inicial (gramos)	Peso Final (gramos)	% de Pérdida
Pasa 3/4 - Retenido 1/2	2000	1998,5	0,08%

Tamiz	Peso Inicial (gramos)	Peso Final (gramos)	% de Pérdida
-------	--------------------------	------------------------	--------------

Pasa 3/8 - Retenido No4	2000	1996,9	0,15%
Tamiz	Peso Inicial	Peso Final	% de Pérdida
	(gramos)	(gramos)	
Fino triturado - Retenido #10	100	99,4	0,60%

4.2. Caracterización del betún asfáltico

La caracterización del betún asfáltico es una etapa esencial dentro del proceso de diseño de mezclas asfálticas, ya que sus propiedades físicas y reológicas inciden directamente en el comportamiento mecánico y la durabilidad del pavimento. En esta investigación, se evaluó un cemento asfáltico de grado penetración 60-70, el cual fue sometido a una serie de ensayos normalizados para verificar su conformidad con las especificaciones establecidas en la normativa ASTM y en el MOP - 001 - F (2002).

El propósito de estos ensayos fue determinar la adecuación del ligante para su uso en mezclas asfálticas en caliente sometidas a condiciones de tráfico pesado. Para ello, se analizaron propiedades fundamentales como la consistencia, temperatura de ablandamiento, punto de inflamación, viscosidad a distintas temperaturas, pérdida de masa por calentamiento y peso específico. Estas propiedades permiten establecer el rango óptimo de trabajabilidad del ligante, así como su resistencia a la oxidación, fluencia y degradación térmica.

La correcta ejecución de estos procedimientos garantiza que el ligante cumpla con los parámetros de calidad exigidos para asegurar la estabilidad, cohesión y resistencia a la deformación permanente en la mezcla final. A continuación, se presenta una serie de ensayos del betún asfáltico, los cuales se ocuparán en el presente proyecto, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

*Tabla 22. Ensayos de betún asfáltico.
Elaboración propia.*

Ensayo	Norma	Especificación
Penetración a 25°C (0.1 mm)	ASTM D5	60-70
Punto de ablandamiento	ASTM D36	48-57 °C
Punto de inflamación	ASTM D92	> 232 °C
Peso específico del betún	ASTM D70	

Viscosidad cinemática a 135°C	ASTM D2170	> 300 cSt
----------------------------------	---------------	-----------

4.2.1. Penetración a 25°C

Procedimiento:

- Se fundió una muestra 100g de asfalto y se vertió en un recipiente de ensayo.
- Después se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente y luego acondicionarla a $25 \pm 0,1$ °C por al menos 1,5 horas.
- Se colocó la aguja (carga de 100 g) en contacto con la superficie del asfalto.
- Permitir que la aguja penetre durante 5 segundos.
- Registrar la profundidad de penetración en décimas de milímetro.
- Realizar al menos tres determinaciones y promediar los resultados.

A continuación, en la Figura 8 se muestra el ensayo de penetración:



*Figura 8. Ensayo de Penetración.
Elaboración propia.*

Una vez hecho el ensayo los resultados se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

*Tabla 23. Resultados de ensayo de penetración.
Elaboración propia.*

Ensayo	Penetración (décimas de mm)	Penetración (mm)
Ensayo 1	6,68	0,668
Ensayo 2	6,23	0,623
Ensayo 3	6,38	0,638
Promedio	6,43	0,643

4.2.2. Punto de ablandamiento

Procedimiento:

- Se lleno dos anillos metálicos con betún fundido y dejar enfriar.
- Se coloco los anillos con el betún en una base con placas metálicas y bolas estándar.
- Después se sumergió el sistema en agua o glicerina.
- Se calentó el medio a razón de $5 \pm 0,5$ °C por minuto.
- Por consiguiente, se midió la temperatura cuando las bolas descenden 25 milímetros.
- Por último, se promedió de ambas temperaturas es el punto de ablandamiento.

A continuación, en la Figura 9 se muestra el ensayo de ablandamiento:



*Figura 9. Punto de ablandamiento.
Elaboración propia.*

Una vez realizado el ensayo de punto de ablandamiento continuación en la
¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:

*Tabla 24. Resultados de punto de ablandamiento.
Elaboración propia.*

Ensayo	Temperatura de Ablandamiento (°C)
Ensayo 1	52,8
Ensayo 2	52,6
Promedio	52,7

4.2.3. Punto de inflamación

Preparación de la muestra:

- Fundir el betún asfáltico lentamente hasta alcanzar una condición fluida homogénea.
- Verter la muestra cuidadosamente en la copa abierta Cleveland hasta la marca de llenado, sin formar burbujas.
- Evitar sobrecalentamiento o inclusión de aire.

Montaje del equipo:

- Colocar la copa sobre la base calefactora del equipo COC.
- Insertar el termómetro en la posición indicada, de manera que no toque las paredes de la copa ni la superficie del asfalto.
- Asegurar que el sistema esté nivelado.

Calentamiento de la muestra:

- Comenzar a calentar la muestra desde temperatura ambiente.
- Ajustar el ritmo de calentamiento para mantener un incremento constante de 5 a 6 °C por minuto (no exceder los 9 °C/min).
- Observar visualmente el comportamiento de la superficie.

Aplicación de la llama:

- A intervalos regulares de cada 2 °C (cuando se aproxime a los 200 °C), se hace pasar cuidadosamente una llama piloto sobre la superficie de la muestra, siguiendo una trayectoria semicircular.

- La llama debe tocar brevemente la superficie sin perturbar el líquido.

Registro del punto de inflamación:

- El punto de inflamación se alcanza cuando se observa una ignición momentánea (flash) en la superficie de la muestra al aplicar la llama.
- En ese instante, registrar la temperatura indicada por el termómetro.

Criterio de aceptación:

- Para betunes 60-70, el punto de inflamación debe ser mayor a 232 °C, conforme a especificaciones del MOP (2002) y prácticas internacionales.

En la Figura 10 se muestra el ensayo de punto de inflamación:



Figura 10. Ensayo de punto de inflamación.
Elaboración propia.

El ensayo de punto de inflamación realizado al betún asfáltico arrojó un valor de 287 °C, lo cual cumple con los requerimientos establecidos para asfaltos destinados a mezclas en caliente. Este parámetro es fundamental, ya que representa la temperatura mínima a la cual los vapores desprendidos por el

material son capaces de inflamarse momentáneamente al entrar en contacto con una fuente externa de ignición. Un punto de inflamación elevado, como el obtenido, es indicador de una adecuada estabilidad térmica del ligante, reduciendo riesgos durante su calentamiento, manejo y producción en planta. Además, este resultado contribuye a garantizar condiciones seguras durante las operaciones de mezclado y tendido, asegurando que el betún pueda ser manipulado sin comprometer la integridad del personal ni la calidad del proceso constructivo.

4.2.4. Peso específico del betún

Procedimiento:

- Llenar un picnómetro calibrado con la muestra de asfalto fundido.
- Pesar el picnómetro lleno y vacío.
- Repetir el procedimiento usando agua destilada a 25 °C.
- Calcular el peso específico mediante la fórmula:

$$\text{Peso específico} = \frac{\text{Masa de betún}}{\text{Masa de igual volumen de agua}}$$

Ecuación 12

Una vez hecho el procedimiento correspondiente al método del picnómetro para determinar el peso específico del betún asfáltico, se registró una masa del picnómetro con betún de 48,362 g, mientras que la masa del picnómetro con agua destilada —equivalente al mismo volumen desplazado— fue de 47,040 g. Con estos valores obtenidos bajo condiciones controladas de temperatura, se calculó un peso específico del ligante **de 1,028 g/cm³**, el cual representa la relación entre la masa del material y el volumen efectivo ocupado en el picnómetro.

4.2.5. Viscosidad cinemática a 135 °C

Procedimiento:

- Fundir y homogeneizar la muestra de betún.

- Llenar un viscosímetro capilar (tipo Cannon-Fenske, Ubbelohde, etc.) con la muestra.
- Colocar el viscosímetro dentro de un baño termostatado a $135 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y esperar a que la muestra alcance el equilibrio térmico.
- Aspirar o dejar fluir la muestra hasta la marca inicial del viscosímetro.
- Medir con cronómetro el tiempo de flujo que tarda el betún en descender entre las dos marcas calibradas del tubo.
- Repetir la medición al menos dos veces y verificar que la diferencia entre lecturas esté dentro del límite permitido.
- Calcular la viscosidad cinemática aplicando la Ecuación 13:

$$v = c \times t$$

Ecuación 13

donde:

v = viscosidad cinemática (mm^2/s o centistokes, cSt)

C = constante de calibración del viscosímetro ($\text{mm}^2/\text{s} \cdot \text{s}^{-1}$)

t = tiempo de flujo de la muestra (s)

En la Figura 11 se muestra el ensayo de viscosidad cinemática:



*Figura 11. Viscosidad del betún asfáltico.
Elaboración propia.*

La viscosidad cinemática del ligante asfáltico se determinó a una temperatura de ensayo de 135 °C, empleando un viscosímetro digital calibrado que entrega directamente la lectura en unidades de centistokes (cSt). Como se observa en la figura correspondiente, el equipo registró un valor de 309,4 cSt, reflejando la resistencia interna del betún al flujo bajo condiciones térmicas controladas. Este resultado se considera representativo del comportamiento reológico del material durante las etapas de mezclado, transporte y compactación de la mezcla asfáltica, proporcionando un parámetro fundamental para evaluar su desempeño en procesos de producción y colocación en obra.

4.3. Combinación de áridos

La correcta combinación de áridos es un aspecto fundamental en el diseño de mezclas asfálticas, dado que determina la granulometría, la resistencia mecánica, la durabilidad y el comportamiento frente a cargas de tránsito. De acuerdo con la normativa ecuatoriana (MOP - 001 - F, 2002), los agregados empleados en el hormigón asfáltico deben cumplir con estrictos requisitos de calidad, granulometría y resistencia, a fin de garantizar el desempeño de la mezcla en servicio.

En la presente sección se describe la clasificación de los agregados, los requisitos que deben cumplir y la manera en que se combinan para conformar mezclas con granulometrías abiertas, intermedias y cerradas, en concordancia con el objetivo de esta investigación.

4.3.1. Requisitos de los áridos

Los áridos deben ser limpios, resistentes y durables, cumpliendo con parámetros mencionados a continuación:

- Desgaste Los Ángeles: $\leq 40\%$ (resistencia al desgaste).
- Durabilidad (sulfato de sodio): pérdida $\leq 12\%$.
- Plasticidad de finos: índice < 4 .

- Adhesión con asfalto: $\geq 95\%$ de cobertura (ensayo de peladura).
- Angularidad: gruesos con caras fracturadas ($\geq 85\%$ una cara y $\geq 80\%$ dos caras); finos con vacíos $\geq 45\%$.
- Equivalente de arena: mínimo 35–50, según tránsito y capa.
- Partículas alargadas/achatadas: $\leq 10\%$.
- Materiales deletéreos: $\leq 1\%$.

4.3.2. Granulometría de diseño

Granulometría de mezcla de planta:

La granulometría de diseño de planta corresponde a la combinación óptima de agregados triturados 3/4", 3/8" y fino triturado, dosificados en proporciones de 15 %, 25 % y 60 % respectivamente recalcando que estos porcentajes son los que maneja la planta los cuales van a ser comparados con los porcentajes propuestos más adelante, con el objetivo de obtener una curva granulométrica continua y estable para la producción de mezclas asfálticas en caliente. Esta combinación presenta una distribución adecuada de tamaños, logrando un material bien graduado que se mantiene dentro de los rangos establecidos por la normativa MOP - 001 - F (2002), y dentro de la faja de trabajo definida para el proyecto. La curva resultante muestra altos porcentajes de material grueso retenido en los tamices superiores, con 100 % pasando el tamiz de 19 mm y 91 % pasando el tamiz de 12.7 mm, lo cual refleja una estructura pétreo robusta. Hacia los tamices intermedios (4.75 y 2.36 mm) se observa una transición gradual con 60 % y 46 % de material pasando, respectivamente, garantizando una adecuada interconexión de partículas. Finalmente, los finos mantienen valores controlados, con 12 % pasando el tamiz N°50 y solo 4 % pasando el tamiz N°200, lo cual asegura un nivel adecuado de vacíos minerales y evita el exceso de finos que podría afectar la estabilidad de la mezcla. En conjunto, esta granulometría de diseño de planta constituye la referencia base para comparar el comportamiento frente a mezclas

de tipo **cerrado** y **abierto**, permitiendo evaluar el impacto técnico de modificar la estructura granulométrica en las propiedades mecánicas del concreto asfáltico.

A continuación, se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** resumen del análisis granulométrico de la mezcla de planta:

Tabla 25. Análisis granulométrico de mezcla en planta.
Elaboración propia

Abertura (mm)	Tamiz	% Pasa Diseño de Planta (Ajuste Granulométrico)
19,00	3/4"	100
12,70	1/2"	91
4,75	Nº 4	60
2,36	Nº 8	46
0,30	Nº 50	12
0,075	Nº 200	4

En cuanto a los tamaños característicos del agregado, la mezcla presenta un tamaño máximo (TM) de $\frac{3}{4}$ " y un tamaño máximo nominal (TMN) de $\frac{1}{2}$ ", equivalente a una abertura de tamiz de 12,7 mm.

Así mismo se presenta su curva granulométrica en la Figura 12:

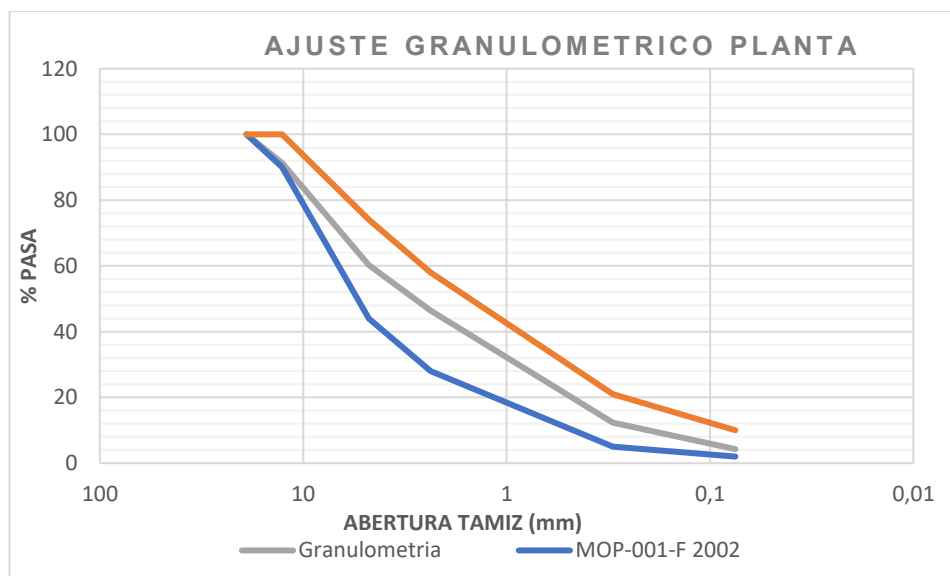


Figura 12. Combinación de áridos mezcla de planta.
Elaboración propia.

La verificación granulométrica mediante el método Power 0.45 evidencia que la mezcla de diseño de planta presenta una distribución continua y estable de tamaños, con una curva real próxima a la curva teórica de máxima densidad.

Este comportamiento confirma una adecuada estructura pétreo, una transición gradual en los tamices intermedios y un contenido controlado de finos, lo que favorece la generación de vacíos minerales adecuados y una buena estabilidad de la mezcla. En consecuencia, la granulometría de planta constituye una referencia base técnicamente válida para el análisis comparativo con mezclas de tipo cerrado y abierto.

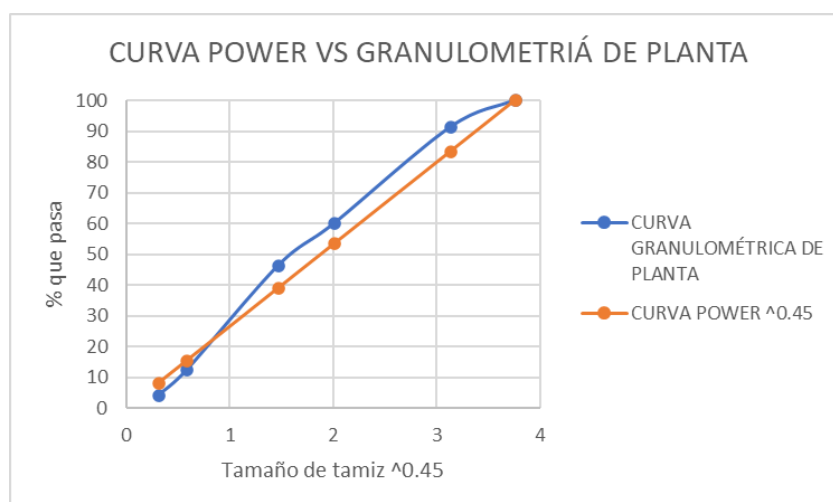


Figura 13. Curva $power^{0.45}$ vs Granulometría de planta.
Elaboración propia.

Análisis de granulometría para mezcla abierta y cerrada:

Para la determinación de las proporciones de cada fracción granulométrica en las mezclas analizadas, se empleó un procedimiento de ajuste iterativo basado en el criterio de mínimos cuadrados. Este método permite obtener la curva resultante de la mezcla como la suma ponderada de las curvas individuales de los agregados, minimizando la diferencia entre la curva objetivo y la curva combinada.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta la composición granulométrica de una mezcla asfáltica definida mediante el método de mínimos cuadrados, partiendo de la imposición previa de una granulometría objetivo.

Tabla 26. Mínimos cuadrados para mezcla abierta.
Elaboración propia.

US mm	US	3/4	15%	3/8	45%	FINO	40%	Min	Max	OBJETVO
19	3/4"	100	10	100	30	100	60	100	100	100
12,5	1/2"	42,15	4,215	100	30	100	60	90	100	90
4,75	#4	0,24	0,024	1,36	0,408	100	60	44	74	44
2,36	#8	0	0	1,02	0,306	76	45,6	28	58	28
0,3	#50	0	0	0	0	21	12,6	5	21	5
0,075	#200	0	0	0	0	13	7,8	2	10	2

Luego de imponer la granulometría objetivo de cada fracción de agregado en la mezcla (agregado 3/4", agregado 3/8" y agregado fino), se procedió a calcular sistemáticamente todos los coeficientes que conforman la matriz del sistema normal de mínimos cuadrados, es decir, las sumatorias de los productos y cuadrados de las variables que se muestran en la Figura 14, donde el coeficiente A es el agregado de 3/4, B es el agregado de 3/8 y C el agregado fino.

$$\begin{bmatrix} \sum A^2 & \sum AB & \sum AC & \dots \\ \sum BA & \sum B^2 & \sum BC & \dots \\ \sum CA & \sum CB & \sum C^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

Figura 14. Coeficientes para mínimos cuadrados.
Elaboración propia

Finalmente, como resultado de la aplicación del método de mínimos cuadrados y de la resolución del sistema matricial mediante la matriz inversa, en la se obtuvieron los porcentajes corregidos de participación de cada fracción de agregado, los cuales se presentan en la tabla mostrada. Estos valores representan el ajuste óptimo de la mezcla granulométrica, garantizando la mejor aproximación a la curva objetivo previamente definida.

Tabla 27. Corrección de porcentajes de agregados por el método de mínimos cuadrados.
Elaboración propia

CORRECCIÓN		
0,15	15	%
0,45	45	%
0,40	40	%
	100	%

Haciendo la comprobación del primer ajuste granulométrico se verifico que la curva se sale un poco de los límites establecidos como se muestra en la Figura 15.

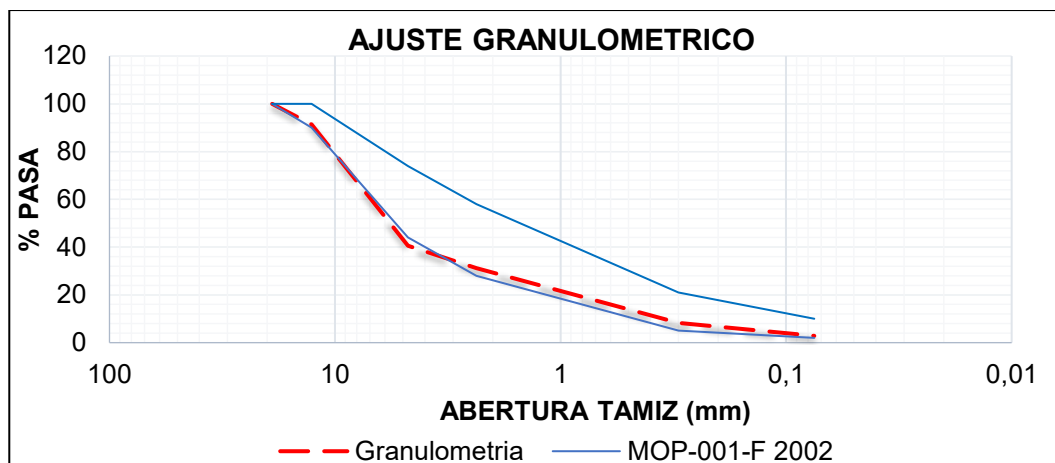


Figura 15. Ajuste granulométrico 1 del método de mínimos cuadrados para mezcla abierta.
Elaboración propia

Debido a que los primeros porcentajes obtenidos mediante la aplicación inicial del método de mínimos cuadrados presentaron ligeras desviaciones respecto a los límites granulométricos superiores e inferiores establecidos por el Ministerio de Obras Públicas, se procedió a realizar iteraciones sucesivas del modelo, ajustando progresivamente los coeficientes de participación de cada fracción de agregado. Obteniendo así los porcentajes de agregados para la granulometría final de la mezcla abierta que se acerquen lo más posible al límite inferior los cuales se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 28. Porcentaje de agregados mezcla abierta.
Elaboración propia.

Fracción	Porcentaje (%)
Árido 3/4"	18
Árido 3/8"	38
Fino triturado	44
Total	100 %

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la granulometría para la mezcla abierta con los porcentajes de agrados ya definidos.

Tabla 29. Ajuate granulométrico mezcla abierta.
Elaboración propia.

ABERTURA (mm)	TAMIZ	ARIDO 3/4		ARIDO 3/8		FINO TRITURADO		AJUSTE GRANULOMETRICO
		% PASA 18,0 %	% PASA 18,0 %	% PASA 38,0 %	% PASA 38,0 %	% PASA 44,0 %	% PASA 44,0 %	
19,00	3/4"	100	18	100	38	100	44	100
12,70	1/2"	42	8	100	38	100	44	90
4,75	Nº 4	0	0	1	1	100	44	44
2,36	Nº 8	0	0	1	0	77	34	34
0,30	Nº 50	0	0	0	0	21	9	9
0,075	Nº 200	0	0	0	0	7	3	3

Como se aprecia, la granulometría de la mezcla abierta se aproxima, en la mayoría de los puntos, al límite inferior del ajuste granulométrico especificado. En cuanto a los tamaños característicos del agregado, la mezcla presenta un tamaño máximo (TM) de $\frac{3}{4}$ " y un tamaño máximo nominal (TMN) de $\frac{1}{2}$ ", equivalente a una abertura de tamiz de 12,7 mm.

Igualmente se muestra en la Figura 16 en la su curva granulométrica y se verifica que se acerca y cumple con el límite inferior.

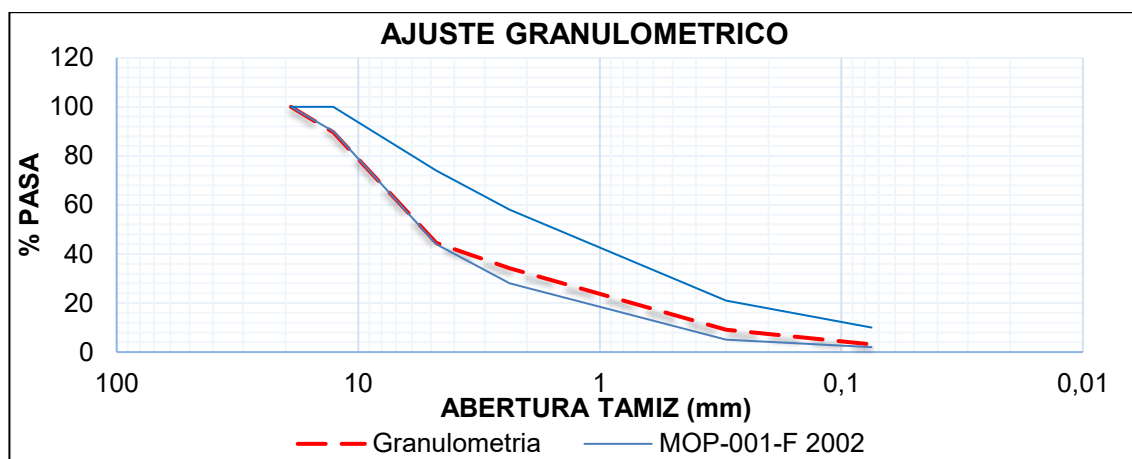


Figura 16. Curva granulométrica mezcla abierta.
Elaboración propia.

Granulometría de mezcla cerrada (densa):

La mezcla cerrada se definió igualmente mediante el método iterativo de mínimos cuadrados, donde se hizo el mismo procedimiento hasta llegar a los

porcentajes de agregados indicados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

*Tabla 30. Porcentaje de agregados mezcla cerrada.
Elaboración propia.*

Fracción	Porcentaje (%)
Árido 3/4"	7
Árido 3/8"	20
Fino triturado	73
Total	100 %

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la granulometría para la mezcla cerrada con los porcentajes de agregados ya definidos.

*Tabla 31. Ajuste granulométrico mezcla cerrada.
Elaboración propia.*

ABERTURA (mm)	TAMIZ	ARIDO 3/4		ARIDO 3/8		FINO TRITURADO		AJUSTE GRANULOMETRICO
		% PASA	7,0 %	% PASA	20,0 %	% PASA	73,0 %	
19,00	3/4"	100	7	100	20	100	73	100
12,70	1/2"	42	3	100	20	100	73	96
4,75	Nº 4	0	0	1	0	100	73	73
2,36	Nº 8	0	0	1	0	77	56	56
0,30	Nº 50	0	0	0	0	21	15	15
0,075	Nº 200	0	0	0	0	7	5	5

Como se aprecia, la granulometría de la mezcla cerrada se aproxima, en la mayoría de los puntos, al límite superior del ajuste granulométrico especificado. En cuanto a los tamaños característicos del agregado, la mezcla presenta un tamaño máximo (TM) de 3/4" y un tamaño máximo nominal (TMN) de 1/2", equivalente a una abertura de tamiz de 12,7 mm.

Igualmente se muestra en la Figura 17 en la su curva granulométrica y se verifica que se acerca y cumple con el límite superior.

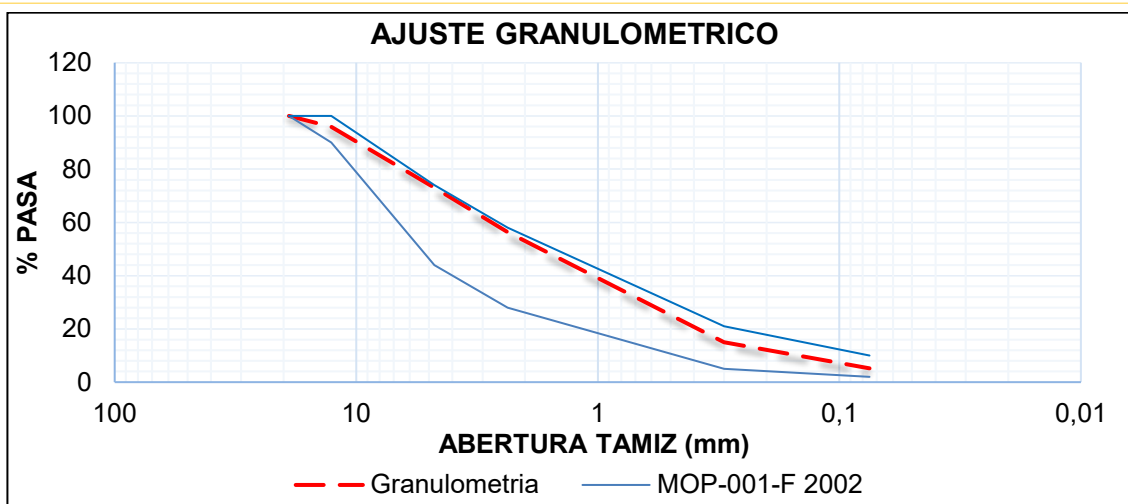


Figura 17. Curva granulométrica mezcla cerrada.
Elaboración propia.

4.4. Diseño de mezcla asfáltica

Para el desarrollo del estudio, se tomó como punto de partida la granulometría de planta, compuesta por agregados 3/4", 3/8" y fino triturado en proporciones de 15 %, 25 % y 60 %, respectivamente. Esta mezcla sirvió como referencia para establecer las curvas granulométricas alternativas del estudio comparativo.

Con base en esta granulometría inicial, se procedió a generar una mezcla de tipo abierta. Para ello, se aumentó la participación de los agregados gruesos y se redujo la fracción de finos, con el fin de obtener una curva más tendida y con mayor porcentaje de partículas de gran tamaño. Luego de los ajustes realizados mediante la ecuación de combinación granulométrica, la mezcla abierta quedó conformada por 18 % de material 3/4", 38 % de 3/8" y 44 % de finos triturados.

De igual manera, se diseñó una mezcla cerrada modificando la distribución granulométrica hacia una mayor concentración de partículas finas. En este caso, se redujo la presencia de los agregados gruesos y se incrementó la fracción fina hasta densificar significativamente la curva. Como resultado, la mezcla cerrada se estableció con 7 % de agregado 3/4", 20 % de 3/8" y 73 % de material fino.

Una vez definidas las tres combinaciones, mezcla de planta, mezcla abierta y mezcla cerrada, se verificó que todas cumplieran con los límites granulométricos establecidos por la normativa aplicable. Con ello se garantizó que las variaciones

introducidas correspondieran únicamente a ajustes en la distribución del tamaño de partículas, manteniendo constantes los demás parámetros de diseño empleados en el método Marshall.

4.4.1. Contenido de asfalto óptimo

En el presente estudio, la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se realizó conforme a los lineamientos del método Marshall, empleando como referencia la granulometría de planta, la cual representa la mezcla utilizada en condiciones reales de producción. Posteriormente, este contenido óptimo fue adoptado para las mezclas granulométricamente modificadas (mezcla abierta y mezcla cerrada), con el objetivo de evaluar exclusivamente el efecto de la variación granulométrica en el comportamiento de la mezcla asfáltica.

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se utilizó la combinación granulométrica de planta, conformada por agregados de tamaños 3/4", 3/8" y fino triturado, en las proporciones definidas en el diseño granulométrico base.

Se elaboraron especímenes Marshall empleando cuatro contenidos de asfalto, seleccionados de manera que permitieran observar el comportamiento de la mezcla en un rango adecuado de ligante. Los porcentajes de asfalto evaluados se indican en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde también se indica las características de cada mezcla con su diferente porcentaje de asfalto.

*Tabla 32. Resumen de porcentajes de asfalto para asfalto óptimo.
Elaboración propia.*

% Asfalto (%)	Gmb (g/cm ³)	Estabilidad (lb)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	Flujo (")
5,5	2,316	2951	5,68	16,34	65,27	9,4
6,0	2,342	3276	4,09	15,80	74,14	11,1
6,5	2,337	3267	3,25	16,36	80,15	13,1
7,0	2,320	3165	2,56	17,36	85,25	16,5

Con los resultados obtenidos de los ensayos se construyeron las curvas características del método Marshall, las cuales relacionan el porcentaje de

asfalto con cada uno de los parámetros evaluados. Las principales curvas analizadas fueron:

Estabilidad versus porcentaje de asfalto indicada en la Figura 18:

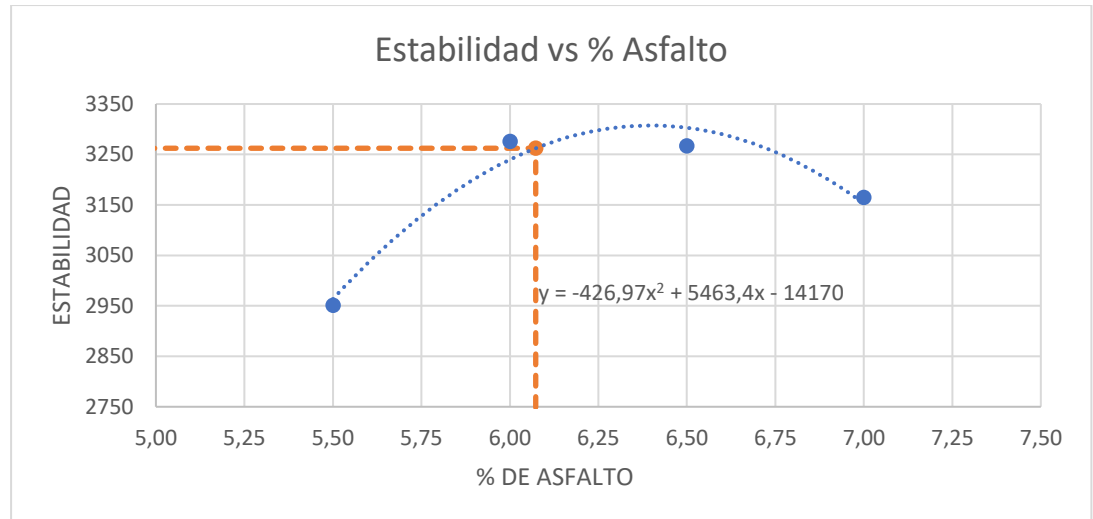


Figura 18. Curva de Estabilidad vs Porcentaje de asfalto.
Elaboración propia

Peso específico bulk versus porcentaje de asfalto indicada en la Figura 19:

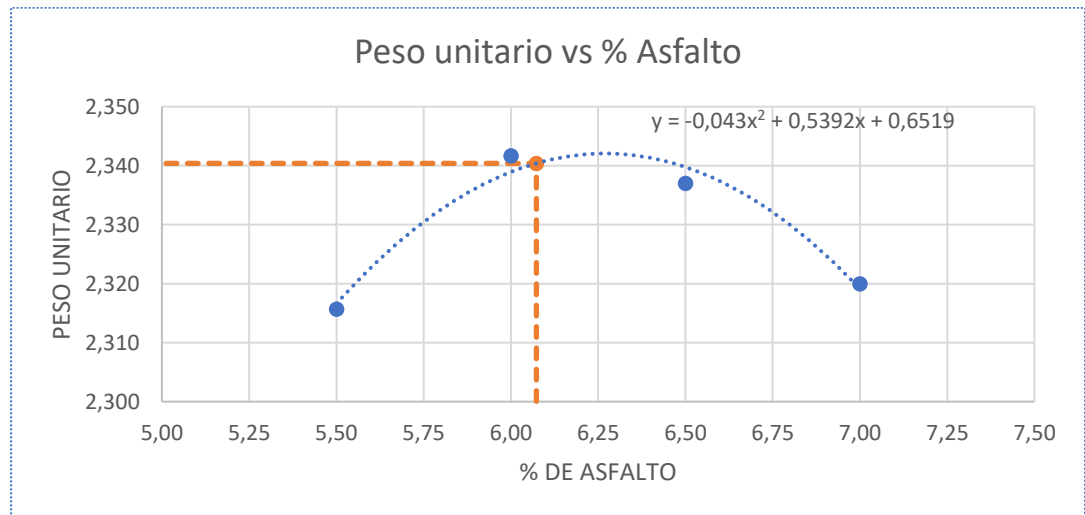


Figura 19. Curva de Peso específico bulk vs Contenido de asfalto.
Elaboración propia

Porcentaje de vacíos vs porcentaje de asfalto indicado en la Figura 20:

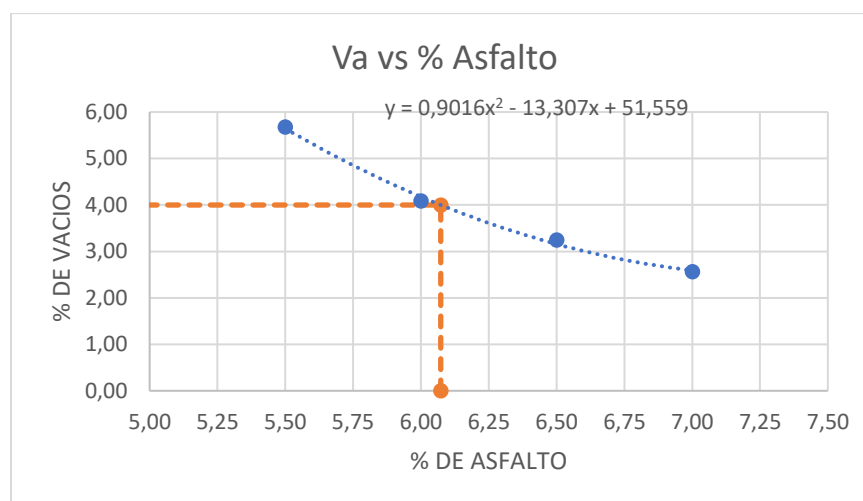


Figura 20. Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de asfalto.
Elaboración propia

El contenido óptimo de asfalto se determinó a partir del criterio del 4 % de vacíos de aire (Va), de acuerdo con el método Marshall y las recomendaciones de la National Asphalt Pavement Association (NAPA).

A partir de la curva vacíos versus porcentaje de asfalto, se determinó el contenido de asfalto correspondiente al 4 % de vacíos, valor considerado óptimo para garantizar una adecuada durabilidad de la mezcla. El contenido de asfalto obtenido fue: $P_b (4 \% Va) = 6,07 \%$.

Tabla 33. Cálculo de asfalto óptimo.
Elaboración propia

Pb óptimo	
Pb (4% vacíos)	6,07

Verificación del contenido óptimo de asfalto:

El contenido óptimo de **6,07 %** fue verificado frente a los criterios establecidos por la normativa MOP-001-F-2002, comprobándose que cumple con:

VFA (vacíos llenos de asfalto) vs porcentaje de asfalto el cual se presenta en la Figura 21:

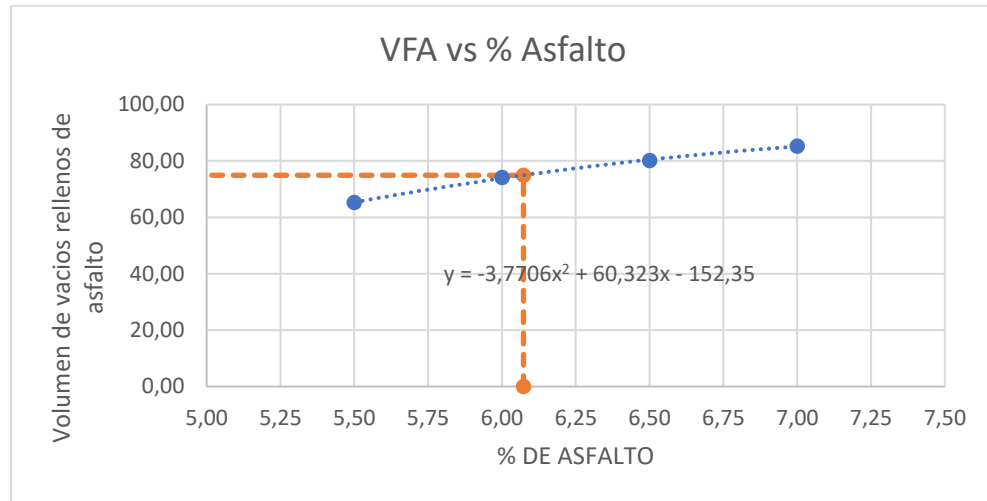


Figura 21. VFA vs Porcentaje de asfalto.
Elaboración propia

VAM (vacíos del agregado mineral) vs porcentaje de asfalto el cual se presenta en la Figura 22:

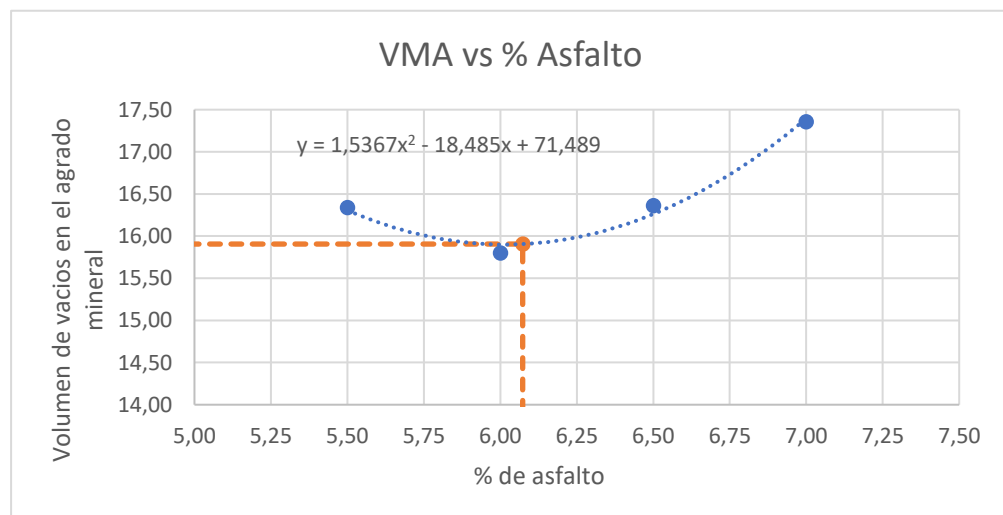


Figura 22. VMA vs Porcentaje de asfalto.
Elaboración propia

Flujo vs porcentaje de asfalto el cual se presenta en la Figura 23.

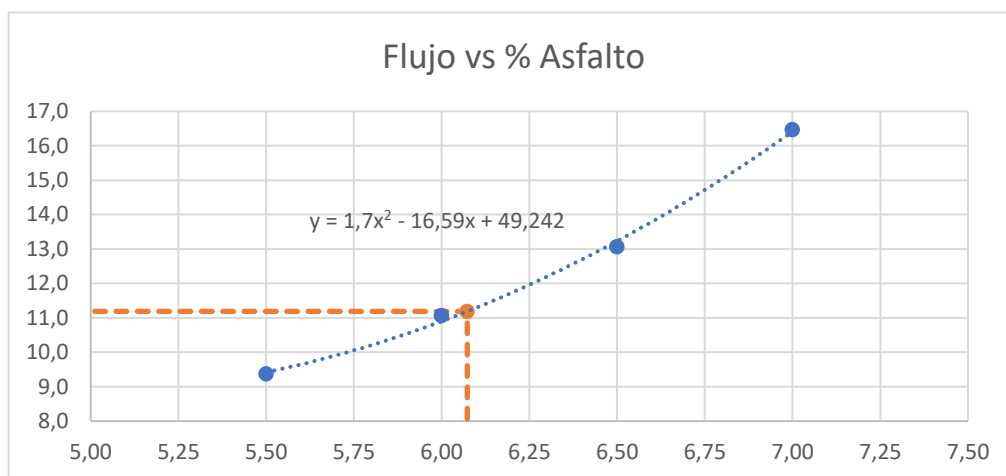


Figura 23. Flujo vs Porcentaje de asfalto.
Elaboración propia

Estos resultados confirman que el contenido de asfalto seleccionado proporciona un adecuado equilibrio entre resistencia estructural, durabilidad y desempeño volumétrico de la mezcla según se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 34. Resultados de verificación de asfalto óptimo.
Elaboración propia.

RESULTADOS ESPERADOS		ESPECIFICACION
		MOP - 001F – 2002 y ASTM
PARAMETRO	VALOR	
Estabilidad (lb)	3262	>2200
Flujo (1/100 pulg)	11.2	8-14
VFA	75.0	65-75
VAM	15.9	>14

5. Resultados y discusión

En el presente capítulo se presenta las relaciones gravimétricas y volumétricas de las mezclas asfálticas, obtenidas mediante los ensayos Rice y Marshall de cada granulometría ensayada, granulometría abierta, de planta y cerrada. A continuación, se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** un resumen de los parámetros determinados.

Tabla 35. Resultados de propiedades volumétricas y gravimétricas obtenidas mediante ensayo Marshall.
Elaboración propia

GRANULOMETRÍA GRUESA (ABIERTA)				GRANULOMETRÍA DE PLANTA (DISEÑO)				GRANULOMETRÍA FINA (CERRADA)			
Áridos				Áridos				Áridos			
Tamaño	% Peso	Gs (Bulk)	Simb	Tamaño	% Peso	Gs (Bulk)	Simb	Tamaño	% Peso	Gs (Bulk)	Simb
3/4	18	2,66	Gs1	3/4	15	2,66	Gs1	3/4	7	2,66	Gs1
3/8	38	2,66	Gs2	3/8	25	2,66	Gs2	3/8	20	2,66	Gs2
Fino triturado	44	2,60	Gs3	Fino triturado	60	2,60	Gs3	Fino triturado	73	2,60	Gs3
Combinación de áridos	100	2,633	Gsb	Combinación de áridos	100	2,624	Gsb	Combinación de áridos	100	2,616	Gsb

Cemento asfáltico				Cemento asfáltico				Cemento asfáltico			
Material	% Peso	Gb (Bulk)	Simb	Material	% Peso	Gb (Bulk)	Simb	Material	% Peso	Gb (Bulk)	Simb
Betún	6,07	1,011	Gb	Betún	6,07	1,011	Gb	Betún	6,07	1,011	Gb

Mezcla asfáltica				Mezcla asfáltica				Mezcla asfáltica			
Material	% Mezcla	Gs (Bulk)	Simb	Material	% Mezcla	Gs (Bulk)	Simb	Material	% Mezcla	Gs (Bulk)	Simb
Betún (Pb)	5,72	1,011	Gb	Betún (Pb)	5,72	1,011	Gb	Betún (Pb)	5,72	1,011	Gb
Áridos (Ps)	94,28	2,633	Gsb	Áridos (Ps)	94,28	2,624	Gsb	Áridos (Ps)	94,28	2,616	Gsb
Mezcla (Pmm)	100,00			Mezcla (Pmm)	100,00			Mezcla (Pmm)	100,00		

RICE				RICE				RICE			
Pesos	Valor	Unidad	Simb	Pesos	Valor	Unidad	Simb	Pesos	Valor	Unidad	Simb
Mezcla	1500	g		Mezcla	1500	g		Mezcla	1500	g	
Picnómetro + agua	6441	g		Picnómetro + agua	6417	g		Picnómetro + agua	6406	g	

Picnómetro + agua + mezcla	7326	g		Picnómetro + agua + mezcla	7301	g		Picnómetro + agua + mezcla	7292	g	
Volumen	615	cm ³		Volumen	616	cm ³		Volumen	614	cm ³	
Gravedad específica teórica máxima	2,439	[--]	Gmm	Gravedad específica teórica máxima	2,437	[--]	Gmm	Gravedad específica teórica máxima	2,443	[--]	Gmm
Gravedad específica efectiva del agregado	2,668	[--]	Gse	Gravedad específica efectiva del agregado	2,670	[--]	Gse	Gravedad específica efectiva del agregado	2,673	[--]	Gse

	MARSHALL			MARSHALL			MARSHALL				
Briqueta	1	2	3	Briqueta	1	2	3	Briqueta	1	2	3
Aire [g]	1235,2	1213,7	1209,4	Aire [g]	1213,4	1201,6	1208,9	Aire [g]	1197,8	1179,7	1212,9
SSS [g]	1235,8	1214,5	1210,3	SSS [g]	1212,9	1202,7	1209,7	SSS [g]	1198,3	1180,6	1213,7
Sumergido [g]	702,3	688	685,2	Sumergido [g]	695,1	689,8	691,5	Sumergido [g]	689,4	678,7	698,4
Estabilidad sin corregir [lb]	3523	3174	3239	Estabilidad sin corregir [lb]	3835	4056	3826	Estabilidad sin corregir [lb]	3269	3309	3383
Volumen [cm ³]	533,5	526,5	525,1	Volumen [cm ³]	517,8	512,9	518,2	Volumen [cm ³]	508,9	501,9	515,3
F.C. briqueta	0,96	0,96	0,96	F.C. briqueta	1,00	1,00	1,00	F.C. briqueta	1,04	1,04	1,00
Estabilidad corregida [lb]	3382	3047	3109	Estabilidad corregida [lb]	3835	4056	3826	Estabilidad corregida [lb]	3400	3441	3383
Flujo [0,01 pulg.]	16,7	17,2	16,9	Flujo [0,01 pulg.]	12,3	12,9	12,8	Flujo [0,01 pulg.]	14,1	13,4	14,2
Gmb [--]	2,315	2,305	2,303	Gmb [--]	2,343	2,343	2,333	Gmb [--]	2,354	2,350	2,354

Promedio		Promedio		Promedio	
Estabilidad corregida [lb]	3180	Estabilidad corregida [lb]	3906	Estabilidad corregida [lb]	3408
Flujo [0,01 pulg.]	16,9	Flujo [0,01 pulg.]	12,7	Flujo [0,01 pulg.]	13,9
Gmb [--]	2,308	Gmb [--]	2,340	Gmb [--]	2,353
Va [%]	5,39	Va [%]	4,00	Va [%]	3,70
VMA [%]	17,38	VMA [%]	15,93	VMA [%]	15,21
VFA [%]	69,01	VFA [%]	75,00	VFA [%]	75,69
Pasa N200 [g]	3,12	Pasa N200 [g]	4,26	Pasa N200 [g]	5,18
Pba [%]	0,50	Pba [%]	0,67	Pba [%]	0,82
Pbe [%]	5,23	Pbe [%]	5,05	Pbe [%]	4,90
Filler/Betún	0,60	Filler/Betún	0,84	Filler/Betún	1,06

5.1. Estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas

Para analizar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas estudiadas, se evaluaron las curvas de Estabilidad vs. Flujo obtenidas mediante el ensayo Marshall para tres condiciones granulométricas: mezcla cerrada, mezcla abierta y mezcla producida en planta. Estas curvas permiten identificar cómo la variación en la estructura interna del agregado influye en la capacidad portante (estabilidad) y en la deformabilidad (flujo) de cada mezcla ensayada.

En la mezcla cerrada, las gráficas muestran valores de estabilidad ubicados entre 3269 y 3383 lb, mientras que el flujo se mantiene alrededor de 13.4 a 14.2 pulg·0.01". Esto indica que la mezcla tiene un comportamiento equilibrado: ofrece buena resistencia y, al mismo tiempo, permite una deformación moderada antes de llegar a su punto máximo de carga. A continuación, en la *Figura 24* se muestra los flujos y estabilidades.

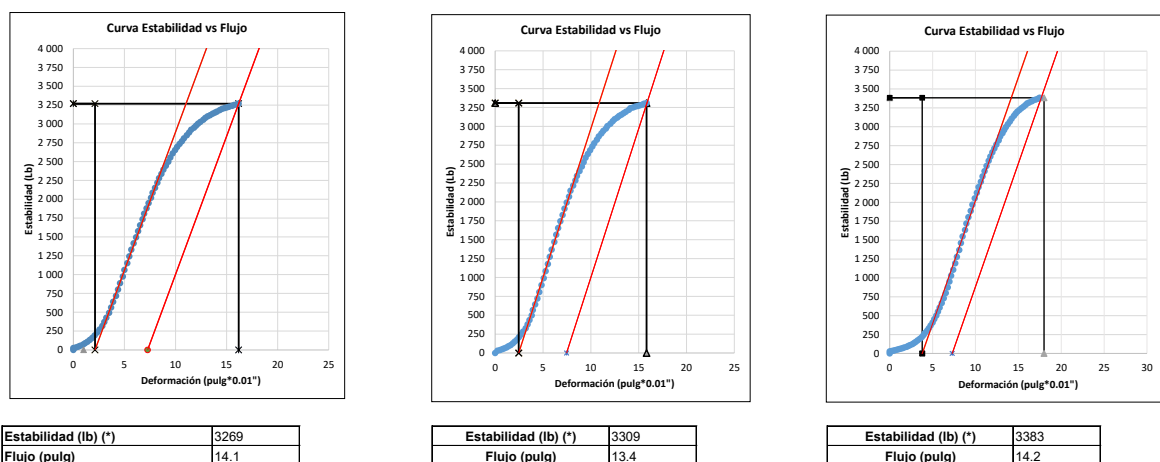


Figura 24. Estabilidad y Flujo de mezcla cerrada. Elaboración propia.

Así mismo, en la mezcla abierta, los valores de flujo son los más altos del conjunto, alcanzando entre 16.7 y 17.2 pulg·0.01", mientras que las estabilidades son un poco menores, ubicándose entre 3174 y 3523 lb. Este comportamiento muestra que la mezcla es más flexible y se deforma más antes de fallar, característica común en mezclas con espacios más amplios entre las partículas, como se muestra en la *Figura 25*.

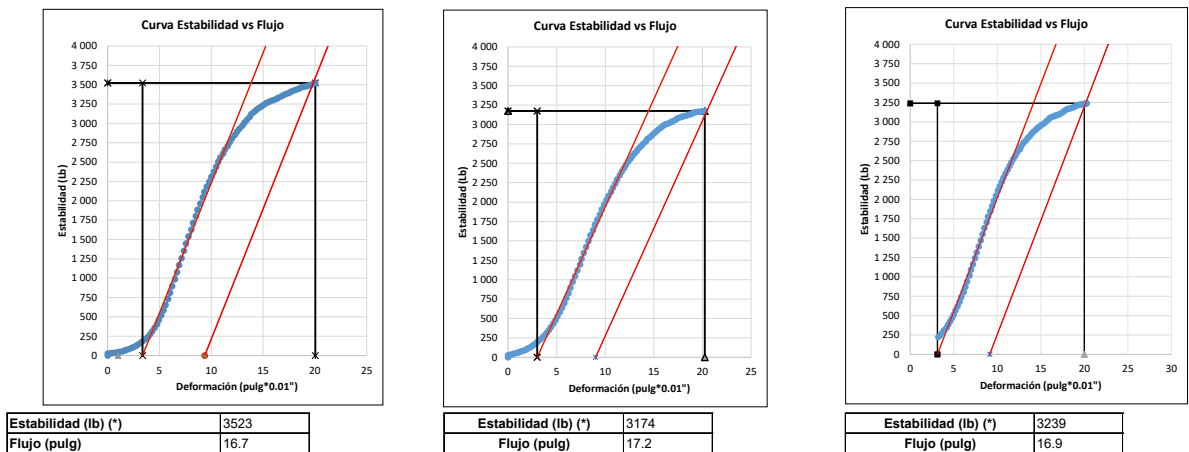


Figura 25. Estabilidad y Flujo de mezcla abierta.
Elaboración propia.

Para la mezcla producida en planta, los valores de estabilidad son los más altos, entre 3826 y 4056 lb, y los valores de flujo son los más bajos, entre 12.3 y 12.9 pulg-0.01". Esto significa que la mezcla es más rígida y soporta mayores cargas sin deformarse demasiado, lo cual puede deberse al control de materiales y compactación durante la producción real como se muestra en la Figura 26.

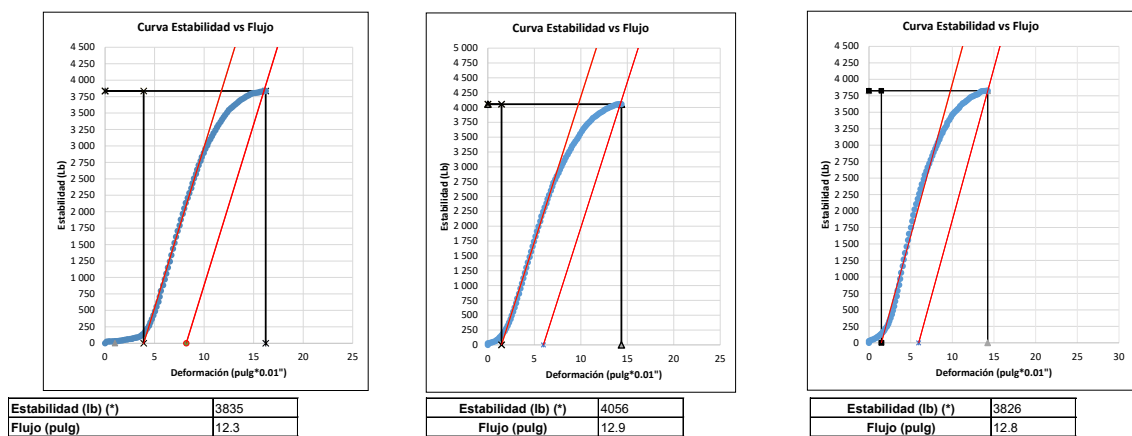
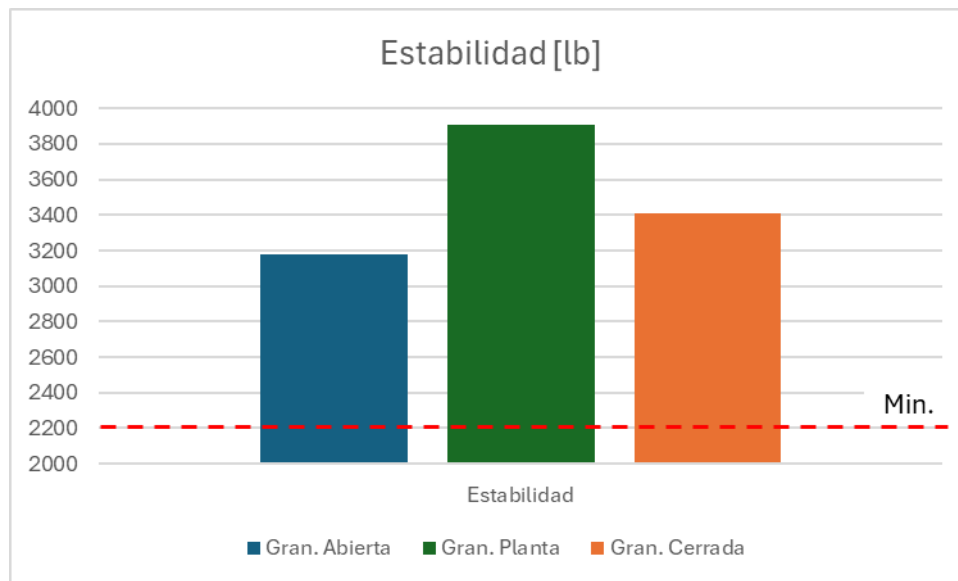


Figura 26. Estabilidad y Flujo de mezcla de planta.
Elaboración propia.

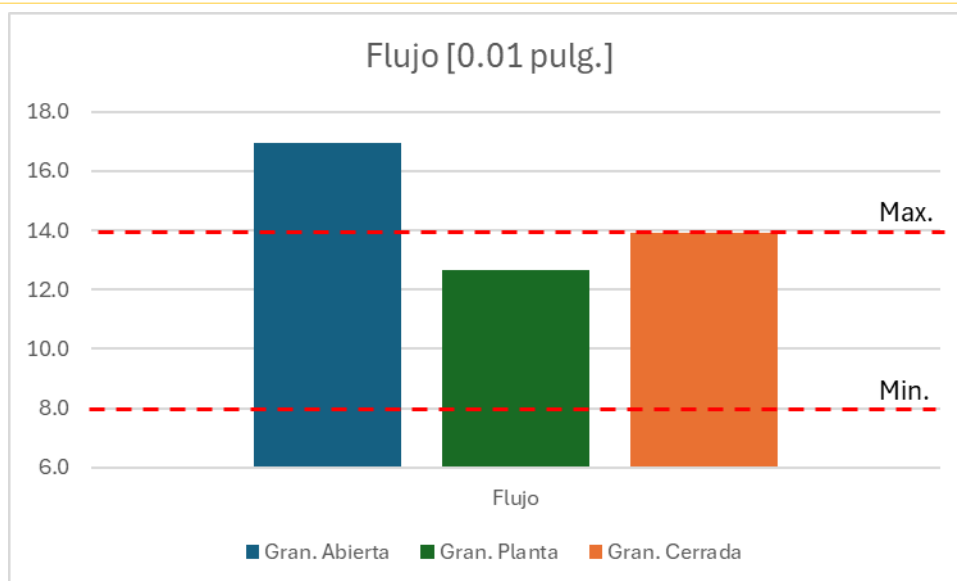
La Figura 27 presenta la comparación de la estabilidad Marshall para las tres granulometrías analizadas: abierta, de planta y cerrada. Se observa que la granulometría correspondiente al diseño de planta alcanza el mayor valor de estabilidad, seguida por la granulometría cerrada, mientras que la granulometría abierta registra el valor más bajo dentro del conjunto evaluado.

Este comportamiento confirma que una gradación balanceada, como la utilizada en la producción en planta, favorece la formación de un esqueleto mineral estable y eficiente en la transmisión de cargas. La menor estabilidad observada en la granulometría abierta se asocia a su estructura más discontinua y a la menor cohesión interna del mortero asfáltico, resultado coherente con su mayor contenido de vacíos y menor proporción de finos.



*Figura 27. Resultados de estabilidad.
Elaboración propia.*

Así mismo, todas las mezclas superan el valor mínimo de referencia de aproximadamente 2200 lb exigido por las especificaciones para tráfico muy pesado, lo que evidencia que, desde el punto de vista de resistencia, las tres mezclas presentan capacidad estructural suficiente bajo el ensayo Marshall. No obstante, este cumplimiento debe interpretarse conjuntamente con los parámetros volumétricos para una evaluación integral del desempeño de la mezcla.



*Figura 28. Resultados de flujo.
Elaboración propia.*

La *Figura 28* incorpora las líneas de especificación mínima y máxima del ensayo Marshall, evidenciando que no todas las mezclas cumplen con el rango permitido de flujo. En particular, la mezcla con granulometría abierta presenta valores que superan el límite máximo establecido, lo que indica una mayor deformación plástica. En contraste, las mezclas de planta y de granulometría cerrada se mantienen dentro de los límites especificados, mostrando un comportamiento más adecuado según los criterios Marshall.

Se observa que la granulometría abierta presenta el valor de flujo más elevado, mientras que la granulometría de planta registra el valor más bajo, ubicándose la granulometría cerrada en un punto intermedio.

5.2. Gravedad específica neta o bulk

Los resultados de gravedad específica neta o bulk (Gmb) obtenidos para las muestras se presentan en la *Figura 29*. Como se aprecia, la mezcla con granulometría abierta registra un Gmb inferior (2,308) respecto al valor de diseño (2,340), mientras que la mezcla con granulometría cerrada evidencia un Gmb superior (2,353) en comparación con el diseño o con la mezcla producida en planta. Esta variación se explica por la distribución de tamaños de partícula: la

granulometría cerrada incorpora un mayor porcentaje de finos y partículas intermedias, lo que reduce los vacíos internos del agregado mineral y permite empaquetar mayor masa dentro del mismo volumen de ensayo. Por el contrario, la granulometría abierta presenta mayor proporción de vacíos debido a su estructura más gruesa y discontinua, resultando en una menor gravedad específica bulk.

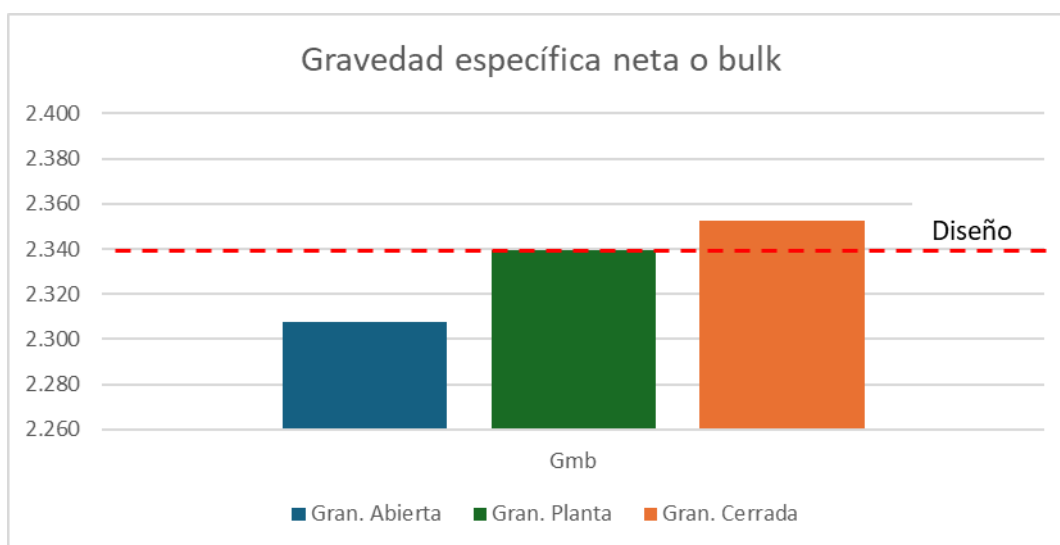


Figura 29. Resultados de la gravedad específica neta o bulk en las tres diferentes granulometrías.
Elaboración propia.

5.3. Porcentaje de vacíos

Los resultados del porcentaje de vacíos (V_a) muestran diferencias significativas entre las granulometrías evaluadas, como se muestra en la Figura 30. La mezcla con granulometría abierta presenta un V_a de 5,39 %, valor superior al rango normativo establecido para mezclas densas bajo el método Marshall (3–5 %), según MOP - 001 - F (2002). Este resultado es consistente con su estructura más gruesa y discontinua, caracterizada por una menor proporción de finos y un mayor volumen de vacíos interconectados.

En contraste, la granulometría cerrada presenta un V_a de 3,70 %, cercano al valor de diseño de planta (4,0 %), lo que refleja un empaquetamiento mineral más denso y una menor presencia de vacíos internos.

Es importante recalcar que el método Marshall está concebido para el diseño y evaluación de mezclas densas; por tanto, la aplicación directa de sus rangos normativos a granulometrías abiertas debe interpretarse únicamente con fines comparativos. En este contexto, el valor de V_a obtenido para la mezcla abierta indica que esta no cumple con los criterios volumétricos del diseño Marshall tradicional, y que su evaluación técnica debería realizarse mediante metodologías específicas para mezclas abiertas o drenantes.

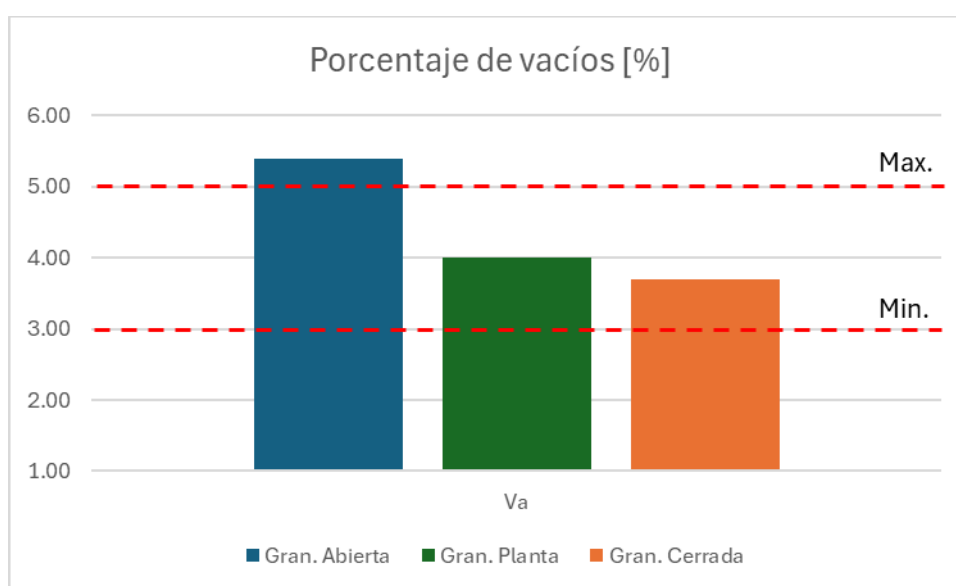


Figura 30. Resultados del porcentaje de vacíos en la mezcla en las tres diferentes granulometrías.
Elaboración propia.

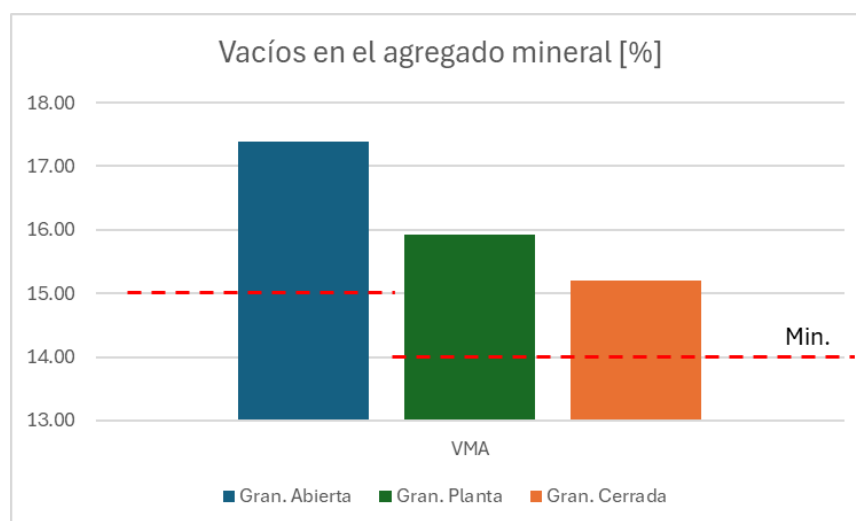
5.4. Vacíos en el agregado mineral

Los resultados del porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) obtenidos para las muestras se presentan en la Figura 31. Se observa que la mezcla con granulometría abierta presenta un VMA superior (17,38 %) en comparación con el valor de diseño de planta (15,93 %). Este comportamiento es consistente con la estructura más gruesa y discontinua de la gradación abierta, que incrementa el volumen de vacíos dentro del esqueleto mineral al no contar con suficiente proporción de finos para rellenar los intersticios. En contraste, la mezcla con granulometría cerrada muestra un VMA menor (15,21 %), lo cual responde a su mayor contenido de agregados finos y partículas intermedias que favorecen un

empaquetamiento más denso y reducen el volumen de vacíos dentro del agregado mineral.

A pesar de las variaciones observadas entre las granulometrías evaluadas, la verificación del VMA mínimo se realiza considerando el tamaño máximo nominal (TMN) y el porcentaje de vacíos en la mezcla (V_a), conforme a los criterios volumétricos establecidos para el diseño Marshall. En este caso, todas las mezclas presentan un TMN de $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm); sin embargo, los valores de V_a difieren entre ellas, lo que condiciona el VMA mínimo exigido.

Para la mezcla abierta, con contenido de vacíos V_a de 5,39 %, el VMA mínimo requerido es 15 %, mientras que, para la mezcla cerrada, con V_a de 3,70 %, y para la mezcla de planta, con V_a de diseño es de 4,0 %, el VMA mínimo exigido es 14 %, según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En consecuencia, los valores de VMA obtenidos para las tres granulometrías cumplen con los mínimos normativos aplicables, lo que confirma que todas las mezclas presentan un esqueleto mineral adecuado, capaz de garantizar una correcta interacción con el ligante asfáltico y un desempeño volumétrico satisfactorio bajo el método Marshall.



*Figura 31. Resultados del porcentaje de vacíos en el agregado mineral en las tres diferentes granulometrías.
Elaboración propia.*

El requisito de un porcentaje mínimo de VMA responde a la necesidad de asegurar que la mezcla asfáltica disponga del espacio suficiente dentro del esqueleto mineral para alojar el ligante asfáltico efectivo. Cuando el VMA es demasiado bajo, el asfalto no puede ocupar adecuadamente los intersticios entre las partículas, reduciéndose la película asfáltica que recubre el agregado y disminuyendo tanto la cohesión interna como la adhesión agregado–ligante. Esto da lugar a mezclas secas y frágiles, altamente susceptibles a agrietamiento por fatiga, desprendimiento y pérdida de durabilidad. Asimismo, un VMA insuficiente indica una gradación excesivamente cerrada, que genera mezclas rígidas, difíciles de compactar y muy sensibles a pequeñas variaciones en el contenido de asfalto.

Por otra parte, contar con un VMA adecuado permite equilibrar correctamente los porcentajes de V_a y de VFA, factores críticos para el comportamiento mecánico de la mezcla. Un VMA demasiado bajo puede causar sobrecarga de ligante, favoreciendo el ahuellamiento, o forzar a reducir el contenido de asfalto hasta niveles que comprometen la durabilidad. El cumplimiento de un VMA mínimo garantiza la formación de un esqueleto mineral estable, capaz de transmitir las cargas vehiculares y mantener su integridad volumétrica a lo largo del tiempo. Por estas razones, las normativas de diseño, como el MOP - 001 - F (2002) y los criterios Marshall (Asphalt Institute, 2014), establecen valores mínimos de VMA para asegurar la estabilidad y el desempeño estructural de las mezclas densas.

5.5. Vacíos rellenos de asfalto

Los resultados del porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) obtenidos para las tres granulometrías se presentan en la Figura 32. La mezcla con granulometría abierta registra un VFA de 69,01 %, valor inferior al de diseño de planta (75,00 %). Este comportamiento responde directamente al mayor volumen

de vacíos presentes en la mezcla abierta, lo que limita la capacidad del ligante asfáltico para ocupar los intersticios del esqueleto mineral y reduce la eficiencia del llenado de la matriz mineral.

Por el contrario, la granulometría cerrada presenta un VFA de 75,69 %, valor que supera ligeramente el límite superior del rango normativo establecido para tráfico muy pesado (65–75 %), según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (Asphalt Institute, 2014). Este resultado evidencia una mayor proporción de vacíos ocupados por asfalto, asociada a una gradación más fina y a un empaquetamiento mineral más cerrado. Sin embargo, la evaluación del desempeño volumétrico de las mezclas no debe realizarse de manera aislada, sino de forma integral, considerando conjuntamente los parámetros V_a , VMA y VFA, a fin de asegurar un equilibrio adecuado entre la estructura mineral y el ligante asfáltico, garantizando así un comportamiento satisfactorio frente a las condiciones de tránsito previstas.

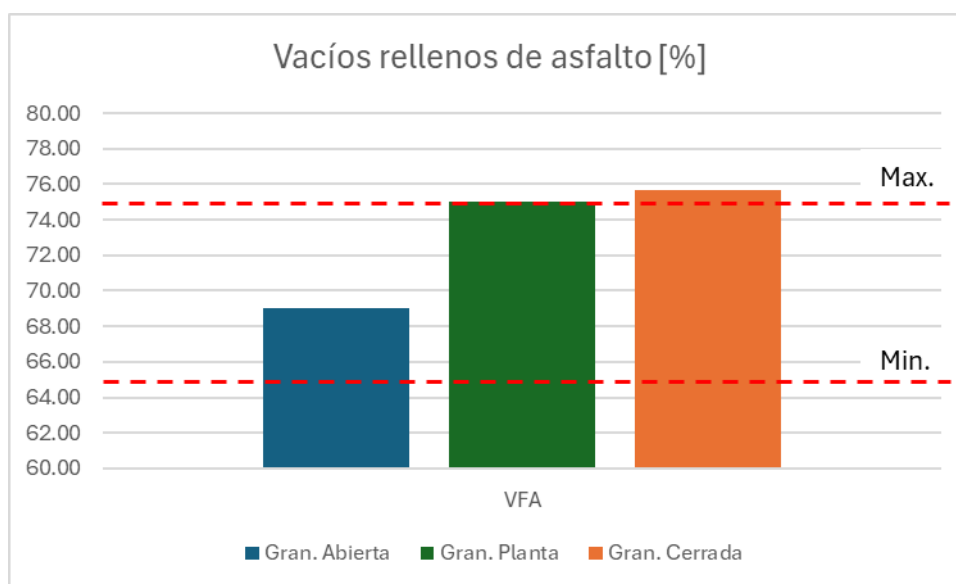


Figura 32. Resultados del porcentaje de vacíos rellenos de asfalto en las tres diferentes granulometrías.
Elaboración propia.

La evaluación conjunta de los parámetros V_a , VMA y VFA permite confirmar que la granulometría abierta se aparta del equilibrio volumétrico característico de las mezclas densas diseñadas bajo el método Marshall, mientras que la mezcla de

planta y la granulometría cerrada presentan un comportamiento coherente con los criterios de diseño volumétrico y estructural previstos.

5.6. Relación filler / betún

Los resultados de la relación Filler/Betún (F/B) obtenidos para las tres granulometrías se presentan en la Figura 33. La granulometría abierta presenta un valor de 0,60, significativamente inferior al rango normativo recomendado (0,8–1,2), lo que indica una deficiencia de material fino en relación con el ligante asfáltico. Esta condición limita la formación de un mortero asfáltico cohesionado y explica de manera consistente los mayores valores de vacíos, el menor VFA y la menor estabilidad relativa observados en esta mezcla.

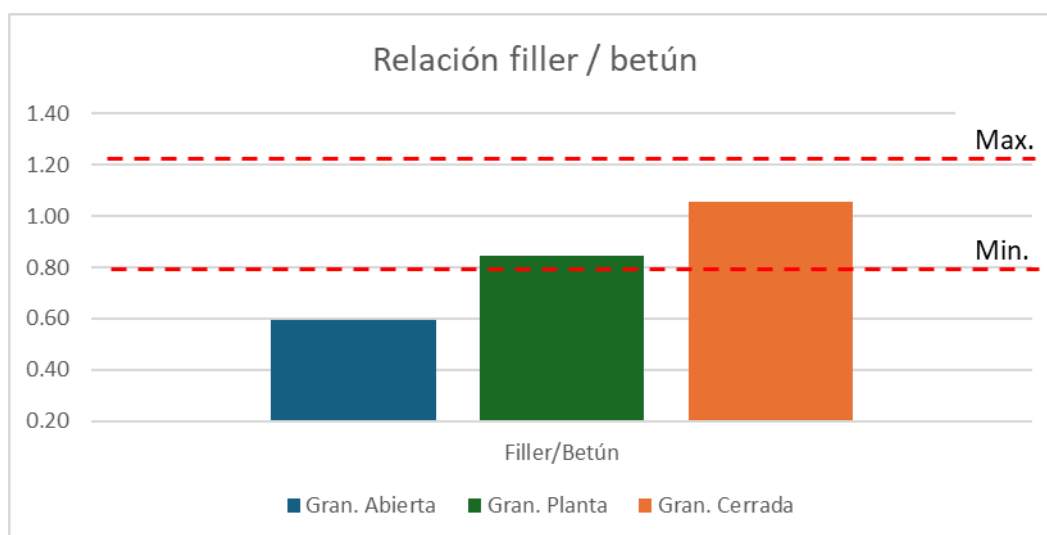


Figura 33. Resultados de la relación filler / betún en las tres diferentes granulometrías. Elaboración propia.

Por el contrario, la mezcla de diseño de planta alcanza una relación filler/betún de 0,84, ubicada dentro del rango permitido, mientras que la granulometría cerrada presenta un valor de 1,06, cercano al centro del intervalo normativo. Estos resultados confirman que las mezclas más densas desarrollan un mortero más estable y cohesionado, reduciendo la susceptibilidad al daño por humedad y mejorando su comportamiento estructural.

En consecuencia, la relación filler/betún ratifica que la granulometría abierta no satisface los criterios volumétricos y de cohesión exigidos para mezclas densas

bajo el método Marshall, reforzando la necesidad de evaluar este tipo de gradaciones mediante enfoques normativos alternativos.

6. Conclusiones y Recomendaciones

La evaluación comparativa entre el diseño estándar de mezcla asfáltica para producción en planta y las variaciones granulométricas permitió comprobar que la granulometría ejerce una influencia determinante sobre el comportamiento mecánico y volumétrico de la mezcla. Los resultados evidencian que la mezcla correspondiente al diseño de planta presenta el mejor equilibrio entre estabilidad, parámetros volumétricos y cohesión interna, mientras que la granulometría cerrada muestra un desempeño estructural favorable con tendencia a una mayor densificación. En contraste, la granulometría abierta se aparta de los criterios clásicos del método Marshall para mezclas densas, confirmando que su comportamiento responde a una lógica estructural distinta, propia de mezclas abiertas o drenantes.

Los ensayos de laboratorio realizados conforme a normativas locales e internacionales permitieron caracterizar de manera confiable las propiedades de los materiales constituyentes de la mezcla asfáltica, proporcionando una base técnica sólida para el análisis comparativo. La consistencia de los resultados obtenidos valida la calidad de los agregados y del betún asfáltico empleados, y garantiza que las diferencias observadas en el desempeño de las mezclas se deben principalmente a las variaciones granulométricas y no a deficiencias de los materiales.

La determinación y verificación del contenido óptimo de betún, aplicada conforme al método propuesto por la NAPA, permitió establecer un diseño de referencia robusto para la producción en planta. Este contenido de ligante aseguró el cumplimiento simultáneo de los requisitos de estabilidad, flujo y parámetros volumétricos en la mezcla de planta, la cual mostró el

comportamiento más equilibrado frente a las variaciones granulométricas evaluadas.

El análisis de los parámetros Marshall y volumétricos confirma que las variaciones en la granulometría modifican de forma significativa la estabilidad, el flujo, el contenido de vacíos (V_a), el VMA, el VFA, el peso específico Bulk y la relación filler/betún. La granulometría cerrada presentó una mayor densificación, reflejada en una estabilidad promedio de 3408 lb, un V_a de 3,70 %, un VMA de 15,21 % y un VFA elevado de 75,69 %, lo que se traduce en una mezcla más cohesionada y estructuralmente estable, aunque cercana al límite superior permitido por la normativa.

Por su parte, la granulometría abierta evidenció un comportamiento distinto, con valores elevados de V_a (5,39 %), un VMA alto (17,38 %), un VFA reducido (69,01 %) y una relación filler/betún de 0,60, fuera del rango recomendado, además de una estabilidad promedio de 3180 lb y un flujo de 16,9 (0,01 pulg). Estos resultados confirman una estructura más permeable y menos cohesionada, ratificando que la granulometría abierta no puede ser evaluada ni optimizada adecuadamente bajo los criterios tradicionales del método Marshall para mezclas densas.

Se recomienda que investigaciones futuras amplíen el análisis realizado en este estudio mediante la incorporación de ensayos de desempeño mecánico, tales como resistencia al ahuellamiento (Wheel Tracking), fatiga a flexión y susceptibilidad a la humedad, con el fin de evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo condiciones más cercanas al servicio real.

Se recomienda mantener una granulometría controlada y consistente, ya que el estudio demostró que cambios en la distribución de los agregados modifican significativamente los parámetros volumétricos y mecánicos de la mezcla asfáltica.

7. Referencias

- AASHTO T283. (2014). *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*.
- Aschenbrener, T., & Currier, G. (1993). *Influence of testing variables on the results from the Hamburg Wheel Tracking Device*.
- Asphalt Institute. (s/f). *Mixture performance testing*. Recuperado el 21 de noviembre de 2025, de <https://www.asphaltinstitute.org/laboratory/testing-services/mixture-performance-testing/>
- Asphalt Institute. (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*.
- ASTM International. (2020). *ASTM C131/C131M: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. https://doi.org/10.1520/C0131_C0131M-20
- ASTM International. (2022). *ASTM D2419: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. <https://doi.org/10.1520/D2419-22>
- ASTM International. (2025). *ASTM D6913/D6913M-17: Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D6913_D6913M-17R25
- Balbo, J. T. (2015). Pavimentação asfáltica - Materiais, Projeto e Restauração. En Oficina de Textos (Ed.), *Pavimentação asfáltica*.
- Bojorque, J., Flores, C., & Vásquez, M. (2019). Marshall parameters for quality control of hot mix asphalt after pavement construction. *Revista de la Construcción*, 18(1), 178–185. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.1.178>

- Cepeda, J. (2002). *Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Delgado, H., Garnica, P., Villatoro, G., & Rodríguez, G. (2006). *Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica*. Instituto Mexicano Del Transporte.
- Flores, M., Delgado, H., & Gómez, J. (2018). Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo. En *Instituto Mexicano del Transporte*.
- Garnica, P., Flores, M., Gómez, J., & Delgado, H. (2005). *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*.
- Gómez, J. (2022). *Combinación granulométrica por fracciones de áridos para el diseño de una mezcla asfáltica elaborada bajo el método de Bruce Marshall*.
- Hall, J. W., Smith, K. L., Titus-Glover, L., Wambold, J. C., Yager, T. J., & Rado, Z. (2009). *Guide for Pavement Friction*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.17226/23038>
- Kraemer, C., Pardillo, J., Rocci, S., Romana, M., Sánchez, V., & Del Val, M. (2004). *Ingeniería de Carreteras: Vol. II (Primera)*.
- Li, W., Cao, W., Ren, X., Lou, S., Liu, S., & Zhang, J. (2022). Impacts of Aggregate Gradation on the Volumetric Parameters and Rutting Performance of Asphalt Concrete Mixtures. *Materials*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/ma15144866>
- McAsphalt. (2019). *Mezclas de clasificación abierta*.
<https://mcasphalt.com/processes/cold-mixed-asphalts/open-graded-mixes/#:~:text=Una%20mezcla%20en%20fr%C3%ADo%20de,permitir%20el%20drenaje%20del%20agua>.
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*.
- MOP - 001 - F. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*.

- Nosetti, R., Bianchetto, H., & Flores, R. (2020). *Evaluación de mezclas asfálticas con ensayos de desempeño: un caso real. XXXIX° Reunión del Asfalto “Dr. Jorge O. Agnusdói”*.
- Padilla, A. (2004). *Capítulo 3 - Mezclas Asfálticas*.
<https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/faca68fd-6fee-44a4-ac04-92d2c660608a/content>
- Pavement Tools Consortium. (s/f). *Aggregate – Pavement Interactive*. Recuperado el 26 de julio de 2025, de <https://pavementinteractive.org/reference-desk/materials/aggregate/>
- Rahman, F., & Mustaque, H. (2014). *Review and Analysis of Hamburg Wheel Tracking Device Test Data*.
- Sangsefidi, E., Ziari, H., & Sangsefidi, M. (2016). The effect of aggregate gradation limits consideration on performance properties and mixture design parameters of hot mix asphalt. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), 385–392.
<https://doi.org/10.1007/s12205-015-0265-8>
- Senior, V. (2013). *Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cemento asfáltico AC 60-70 con Licomont BS-100 para diferentes niveles de precipitación*. Universidad Nacional de Colombia.

8. Anexos

8.1. Anexo 1. Registro fotográfico

A continuación, se presenta la primera parte del registro fotográfico en la Figura 34 donde se muestran los ensayos Marshall realizados para las distintas granulometrías analizadas (fina, de planta y gruesa), incluyendo procedimientos como la fabricación de briquetas, entre otros ensayos de laboratorio.



Figura 34. Ensayos Marshall primera parte.

Así mismo, en la Figura 35 se presenta la segunda parte del registro fotográfico correspondiente a los ensayos de fabricación de briquetas, donde se observan los agregados utilizados, tales como material de tres cuartos (3/4"), tres octavos (3/8"), polvo y arena, así como el asfalto empleado en la mezcla.



Figura 35. Ensayos Marshall segunda parte.

En la Figura 36 se presenta la tercera parte del registro fotográfico correspondiente a los ensayos Marshall, donde se muestra el proceso de rotura

de briquetas para la determinación de la estabilidad y el flujo de las mezclas asfálticas.



Figura 36. Ensayos Marshall tercera parte.

Por último, en la Figura 37 se presentan los ensayos realizados al betún asfáltico empleado, donde se muestran las diferentes pruebas efectuadas para la caracterización de sus propiedades físicas y reológicas, las cuales permiten evaluar su aptitud y comportamiento como material ligante dentro del diseño de la mezcla asfáltica.



Figura 37. Ensayos de betún asfáltico.

8.2. Anexo 2. Contenido de betún asfáltico

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los parámetros geomecánicos de las diferentes mezclas asfálticas, evaluadas mediante el ensayo Marshall, con el fin de determinar el contenido óptimo de asfalto.

Tabla 36. Parámetros geomecánicos del ensayo Marshall, con porcentajes de asfalto de prueba de 5.50% y 6.00%.
Elaboración propia.

Contenido de asfalto de prueba con 5.50%				Contenido de asfalto de prueba con 6.00%			
Áridos				Áridos			
Tamaño	% Peso	Gs (Bulk)	Simb	Tamaño	% Peso	Gs (Bulk)	Simb
3/4	15	2.66	Gs1	3/4	15	2.66	Gs1
3/8	25	2.66	Gs2	3/8	25	2.66	Gs2
Fino triturado	60	2.60	Gs3	Fino triturado	60	2.6	Gs3
Combinación de áridos	100	2.624	Gsb	Combinación de áridos	100	2.624	Gsb

Cemento asfáltico				Cemento asfáltico			
Material	% Peso	Gb (Bulk)	Simb	Material	% Peso	Gb (Bulk)	Simb
Betún	5.5	1.011	Gb	Betún	6.0	1.011	Gb

Mezcla asfáltica				Mezcla asfáltica			
Material	% Mezcla	Gs (Bulk)	Simb	Material	% Mezcla	Gs (Bulk)	Simb
Betún (Pb)	5.21	1.011	Gb	Betún (Pb)	5.66	1.011	Gb
Áridos (Ps)	94.79	2.624	Gsb	Áridos (Ps)	94.34	2.624	Gsb
Mezcla (Pmm)	100.00			Mezcla (Pmm)	100.00		

RICE				RICE			
Pesos	Valor	Unidad	Simb	Pesos	Valor	Unidad	Simb
Mezcla	1500	g		Mezcla	1500	g	
Picnómetro + agua	6408	g		Picnómetro + agua	6427	g	
Picnómetro + agua + mezcla	7297	g		Picnómetro + agua + mezcla	7313	g	
Volumen	611	cm ³		Volumen	614	cm ³	
Gravedad específica teórica máxima	2.455	[--]	Gmm	Gravedad específica teórica máxima	2.441	[--]	Gmm
Gravedad específica efectiva del agregado	2.664	[--]	Gse	Gravedad específica efectiva del agregado	2.668	[--]	Gse

MARSHALL				MARSHALL			
Briqueta	1A	1B	1C	Briqueta	2A	2B	2C
Aire [g]	1110.4	1134.2	1099.7	Aire [g]	1102.2	1121.4	1141.4
SSS [g]	1111.7	1135.5	1101.5	SSS [g]	1103.2	1122.6	1142.4
Sumergido [g]	632.5	645.1	626.9	Sumergido [g]	632.5	643.5	655.0
Estabilidad sin corregir [lb]	2650	2600	2630	Estabilidad sin corregir [lb]	2780	2860	2990
Volumen [cm ³]	479.2	490.4	474.6	Volumen [cm ³]	470.7	479.1	487.4
F.C. briqueta	1.14	1.09	1.14	F.C. briqueta	1.19	1.14	1.09
Estabilidad corregida [lb]	3021	2834	2998	Estabilidad corregida [lb]	3308	3260	3259
Flujo [0.01 pulg.]	9.5	9.7	8.9	Flujo [0.01 pulg.]	11.1	11.1	11.0
Gmb [--]	2.317	2.313	2.317	Gmb [--]	2.342	2.341	2.342
Promedio				Promedio			
Estabilidad corregida [lb]	2951			Estabilidad corregida [lb]	3276		
Flujo [0.01 pulg.]	9.4			Flujo [0.01 pulg.]	11.1		
Gmb [--]	2.316			Gmb [--]	2.342		
Va [%]	5.68			Va [%]	4.09		
VAM [%]	16.34			VAM [%]	15.80		
VFA [%]	65.27			VFA [%]	74.14		

Tabla 37. Parámetros geomecánicos del ensayo Marshall, con porcentajes de asfalto de prueba de 6.50% y 7.00%.
Elaboración propia.

Contenido de asfalto de prueba con 6.50%				Contenido de asfalto de prueba con 7.00%			
Áridos				Áridos			
Tamaño	% Peso	Gs (Bulk)	Simb	Tamaño	% Peso	Gs (Bulk)	Simb
3/4	15	2.66	Gs1	3/4	15	2.66	Gs1
3/8	25	2.66	Gs2	3/8	25	2.66	Gs2
Fino triturado	60	2.6	Gs3	Fino triturado	60	2.6	Gs3
Combinación de áridos	100	2.624	Gsb	Combinación de áridos	100	2.624	Gsb

Cemento asfáltico				Cemento asfáltico			
Material	% Peso	Gb (Bulk)	Simb	Material	% Peso	Gb (Bulk)	Simb
Betún	6.5	1.011	Gb	Betún	7.0	1.011	Gb

Mezcla asfáltica				Mezcla asfáltica			
Material	% Mezcla	Gs (Bulk)	Simb	Material	% Mezcla	Gs (Bulk)	Simb
Betún (Pb)	6.10	1.011	Gb	Betún (Pb)	6.54	1.011	Gb
Áridos (Ps)	93.90	2.624	Gsb	Áridos (Ps)	93.46	2.624	Gsb
Mezcla (Pmm)	100.00			Mezcla (Pmm)	100.00		

RICE				RICE			
Pesos	Valor	Unidad	Simb	Pesos	Valor	Unidad	Simb
Mezcla	1500	g		Mezcla	1500	g	
Picnómetro + agua	6419	g		Picnómetro + agua	6439	g	
Picnómetro + agua + mezcla	7298	g		Picnómetro + agua + mezcla	7309	g	
Volumen	621	cm ³		Volumen	630	cm ³	
Gravedad específica teórica máxima	2.415	[--]	Gmm	Gravedad específica teórica máxima	2.381	[--]	Gmm
Gravedad específica efectiva del agregado	2.655	[--]	Gse	Gravedad específica efectiva del agregado	2.630	[--]	Gse

MARSHALL				MARSHALL			
Briqueta	3A	3B	3C	Briqueta	4A	4B	4C
Aire [g]	1121.8	1144.4	1137.1	Aire [g]	1159.5	1139.6	1141.3
SSS [g]	1122.1	1144.8	1137.4	SSS [g]	1159.7	1139.9	1141.5
Sumergido [g]	642.1	654.9	651.0	Sumergido [g]	660.1	648.9	649.2
Estabilidad sin corregir [lb]	2860	3050	2950	Estabilidad sin corregir [lb]	3050	2900	2900
Volumen [cm ³]	480	489.9	486.4	Volumen [cm ³]	499.6	491	492.3
F.C. briqueta	1.14	1.09	1.09	F.C. briqueta	1.04	1.09	1.09
Estabilidad corregida [lb]	3260	3325	3216	Estabilidad corregida [lb]	3172	3161	3161
Flujo [0.01 pulg.]	13.6	13.6	12.0	Flujo [0.01 pulg.]	16.5	16.4	16.5
Gmb [--]	2.337	2.336	2.338	Gmb [--]	2.321	2.321	2.318
Promedio				Promedio			
Estabilidad corregida [lb]	3267			Estabilidad corregida [lb]	3165		
Flujo [0.01 pulg.]	13.1			Flujo [0.01 pulg.]	16.5		
Gmb [--]	2.337			Gmb [--]	2.320		
Va [%]	3.25			Va [%]	2.56		
VAM [%]	16.36			VAM [%]	17.36		
VFA [%]	80.15			VFA [%]	85.25		