



Universidad **Mariana**

Análisis comparativo del comportamiento tradicional de los agregados utilizados para mezclas asfálticas, generados en las canteras de la ciudad de Pasto-Nariño

Alex Daniel Meneses Andrade
Edwin Denilson Rodríguez Ortega
José Luis Rodríguez Santander
Jermin Santiago Burbano Cuaichar

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
San Juan de Pasto
2023

Análisis comparativo del comportamiento tradicional de los agregados utilizados para mezclas asfálticas, generados en las canteras de la ciudad de Pasto-Nariño

Alex Daniel Meneses Andrade
Edwin Denilson Rodríguez Ortega
José Luis Rodríguez Santander
Jermin Santiago Burbano Cuaichar

Informe de investigación para optar al título de Ingeniero Civil

MSc. José Daniel Muñoz Martínez
Asesor

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
San Juan de Pasto
2023

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007

Universidad Mariana

Contenido

	Pág.
Resumen	12
Abstract	12
Introducción	13
1 Resumen del proyecto	15
1.1 Descripción del problema	15
1.1.1. Formulación del problema.....	16
1.2 Justificación	16
1.3 Objetivos	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	17
1.4 Marco referencial o fundamentos teóricos	17
1.4.1. Antecedentes	18
1.4.2. Marco teórico	19
1.4.3. Marco contextual.....	24
1.4.4. Marco legal	25
1.5. Metodología	26
1.5.1. Método convencional	27
1.5.2. Método Bailey	28
1.5.4. Porcentaje óptimo.....	29
1.5.5. Campo de investigación	30
1.5.6. Tipo de investigación	30
1.5.7. Enfoque de investigación	30
1.5.8. Hipótesis	31
2. Presentación de resultados	32

2.1. Método convencional	32
2.2. Método Bailey	38
2.2.1. Análisis granulométrico	38
2.2.2. Cálculo de densidades	38
2.2.3. Gravedad específica y absorción	40
2.2.4. Granulometría:.....	47
2.2.5. Preparación de la muestra.....	52
2.2.6. Densidad Bulk y gravedad específica	53
2.3. Ensayo deflexión por método convencional y Bailey	54
2.4. Porcentaje óptimo	61
2.4.1. Densidad vs. Contenido de asfalto.	61
2.4.2. Volumen de vacíos vs. Contenido de asfalto.	64
2.4.3. Estabilidad vs. Contenido de asfalto	66
2.4.4. Flujo vs. Contenido de asfalto	69
2.4.5. Vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto.....	71
2.4.6. Vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto.	75
2.4.1. Contenido de asfalto óptimo.....	78
3. Conclusiones	87
4. Recomendaciones	89
Referencias bibliográficas	90

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Intervalos para mezclas gruesas	23
Tabla 2. Intervalos para mezclas SMA	23
Tabla 3. Resumen de aspecto legales	25
Tabla 5. Granulometría método convencional MDC-10.....	33
Tabla 6. Peso en gramos de material seleccionado y capacidad de material en Briqueta.....	34
Tabla 7. Peso parcial y peso total	34
Tabla 8. Porcentajes repartidos para cada briqueta.	34
Tabla 9. Datos de pesos de cada briqueta.....	35
Tabla 10. Densidad Bulk.....	36
Tabla 11. Densidad Bulk agregado grueso.....	39
Tabla 12. Densidad Bulk agregado grueso (compactado).....	39
Tabla 13. Densidad Bulk agregado fino	40
Tabla 14. Gravedad específica y absorción del agregado fino.....	43
Tabla 15. Gravedad específica y absorción del agregado grueso.....	47
Tabla 16. Análisis granulométrico del agregado.....	49
Tabla 17. Porcentajes parciales del agregado a usar	49
Tabla 18. Ajustes del agregado	50
Tabla 19. Diseño y tamiz.....	51
Tabla 20. Peso parcial y total	52
Tabla 21. Porcentajes repartidos para cada briqueta	53
Tabla 22. Elaboración de cilindros.....	53
Tabla 23. Densidad Bulk	54
Tabla 24. Datos de densidad vs contenido de asfalto- método convencional	61
Tabla 25. Datos de densidad vs contenido de asfalto- método Bailey	63
Tabla 26. Datos de contenidos de vacíos vs contenido de asfalto- método convencional	64
Tabla 27. Datos contenidos de vacíos vs contenido de asfalto- método Bailey.....	65
Tabla 28. Datos estabilidad vs contenido de asfalto- método convencional.....	67
Tabla 29. Datos estabilidad vs contenido de asfalto- método Bailey.....	68
Tabla 30. Datos flujo vs Contenido de asfalto – Método convencional.....	69

Tabla 31. Datos flujo vs Contenido de asfalto – Método Bailey	70
Tabla 32. Datos de vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto- Método convencional	73
Tabla 33. Datos de vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto- Método Bailey	74
Tabla 34. Datos Vacíos Llenos de Asfalto vs. Contenido de asfalto- método convencional.....	76
Tabla 35. Datos vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto- método Bailey.....	77

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa político San Juan de Pasto.	24
Figura 2. Asfalto al 5%- briquetas #1	54
Figura 3. Asfalto al 5%- briquetas #2	55
Figura 4. Asfalto al 5.5%- briquetas #1	56
Figura 5. Asfalto al 5.5%- briquetas #2	56
Figura 6. Asfalto al 5.5%- briqueta #3	57
Figura 7. Asfalto al 6%- briquetas #1	58
Figura 8. Asfalto al 6% - briquetas#2	58
Figura 9. Asfalto al 6% - briquetas #3	59
Figura 10. Asfalto al 6.5%- briqueta #1	59
Figura 11. Asfalto al 6.5%- briqueta #2	60
Figura 12. Asfalto al 6.5%- briqueta #3	60
Figura 13. Densidad vs contenido de asfalto- Método convencional	62
Figura 14. Densidad vs contenido de asfalto - Método Bailey	63
Figura 15. Contenido de vacíos vs contenido de asfalto- método convencional	65
Figura 16. Contenido de vacíos vs contenido de asfalto- método Bailey	66
Figura 17. Estabilidad vs contenido de asfalto- método convencional	67
Figura 18. Estabilidad vs contenido de asfalto- método Bailey	68
Figura 19. Flujo vs Contenido de asfalto – Método convencional	70
Figura 20. Flujo vs Contenido de asfalto – Método Bailey	71
Figura 21.	74
Figura 22. vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto- Método Bailey	75
Figura 23. Vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto - método convencional	76
Figura 24. Vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto- método Bailey	77
Figura 25. Contenido de vacíos vs contenido de asfalto – método convencional.....	78
Figura 26. Contenido de vacíos vs contenido de asfalto- método Bailey	79
Figura 27. Estabilidad vs contenido de asfalto – Método convencional.....	80
Figura 28. Estabilidad vs contenido de asfalto- método Bailey	80
Figura 29. Flujo vs contenido de asfalto – Método convencional	81

Figura 30. Flujo vs contenido de asfalto – Método Bailey	81
Figura 31. VMA vs contenido de asfalto- Método convencional	82
Figura 32. VMA vs contenido de asfalto- Método Bailey	83
Figura 33. VFA vs contenido de asfalto- método convencional	83
Figura 34. VFA vs contenido de asfalto- método Bailey	84

Índice de Ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. Tamiz de control primario.....	21
Ecuación 2. Relación de partículas	22
Ecuación 3.Relación arena fina y agregados.....	23
Ecuación 4.Relación Filler	23
Ecuación 5.Densidad Bulk	36
Ecuación 6.Gravedad específica	37
Ecuación 7. Densidad Bulk.....	38
Ecuación 8. Densidad Relativa seca al horno	42
Ecuación 9. Densidad Relativa sat. superficialmente seca.....	42
Ecuación 10. Densidad relativa aparente	42
Ecuación 11.Densidad seca al horno.....	42
Ecuación 12. Densidad saturada superficialmente seca	43
Ecuación 13. Densidad aparente	43
Ecuación 14.Absorción finos	43
Ecuación 15.Densidad Relativa seca al horno	45
Ecuación 16.Densidad Relativa saturada superficialmente seca.....	45
Ecuación 17. Densidad relativa aparente	46
Ecuación 18.Densidad seca al horno.....	46
Ecuación 19.Densidad saturada superficialmente seca	46
Ecuación 20.Densidad aparente	46
Ecuación 21.Absorción gruesos	46
Ecuación 22.Contenido de vacíos	64
Ecuación 23.Contenido de Asfalto % en peso	71
Ecuación 24.Contenido de Asfalto % en volumen.....	72
Ecuación 25.CA absorbido.....	72
Ecuación 26.Contenido de CA efectivo en % de volumen	72
Ecuación 27.Contenido de CA efectivo en % de peso.....	72
Ecuación 28.Contenido de CA absorbido en % de peso	73
Ecuación 29.Vacíos en el agregado mineral	73

Ecuación 30. Vacíos llenos de asfalto	75
Ecuación 31. Espesor promedio	85
Ecuación 32. Espesor de la película	85

Resumen

Como se sabe, las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos firmes, teniendo la función de proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos. El documento a continuación muestra una investigación en donde se evalúa la resistencia de dos mezclas asfálticas; una con agregados pétreos dosificados a partir del método tradicional y otra con agregados dosificados a partir del Método Bailey. Se realizan ensayos de laboratorio de resistencia para las dos mezclas asfálticas, pruebas descritas en las Normas de Ensayo del INVIAS (INVIAS, 2013), y a partir de estos resultados se determina el efecto que tiene la dosificación del agregado en el pavimento y cuál de los dos métodos es más eficiente.

Palabras claves: Mezcla asfáltica, agregado pétreo, método tradicional, método Bailey.

Abstract

Asphalt mixtures are known to be used in the construction of rigid pavements, serving the purpose of providing a comfortable, safe, and economical riding surface for road users, facilitating the movement of vehicles. The following document presents a study that evaluates the strength of two asphalt mixtures: one with aggregates dosed using the traditional method and another with aggregates dosed using the Bailey Method. Laboratory strength tests are conducted on both asphalt mixtures, with tests described in the INVIAS Test Standards (INVIAS, 2013). Based on these results, the effect of aggregate dosing on the pavement is determined, and it is assessed which of the two methods is more efficient.

Keywords: Asphalt mixture, stone aggregate, traditional method, Bailey method.

Introducción

En la industria de la construcción, la selección y evaluación de agregados pétreos son etapas cruciales en la formulación de mezclas de concreto y asfalto que cumplen con los estándares de calidad y rendimiento necesarios para proyectos de infraestructura. Dos métodos ampliamente reconocidos para llevar a cabo esta tarea son el "Método Marshall" y el "Método Bailey". Estas dos técnicas de análisis ofrecen enfoques distintos para evaluar las características y propiedades de los agregados, y su elección puede tener un impacto significativo en la calidad y la durabilidad de las estructuras construidas.

El "Método Marshall", desarrollado en la década de 1940 por Francis H. Marshall ((Marshall, 1942), se ha convertido en una referencia esencial en la evaluación de mezclas asfálticas. Su enfoque se centra en la determinación de las propiedades de compactación y resistencia de las mezclas asfálticas, proporcionando datos fundamentales para el diseño y construcción de pavimentos duraderos y seguros.

Por otro lado, el "Método Bailey", nombrado en honor a su creador RL Bailey (Bailey, 1963), se destaca por su aplicación en el análisis de agregados horribles utilizados en la fabricación de concreto. Este método se concentra en la gradación y las propiedades físicas de los agregados, suministrando información esencial para la formulación de mezclas de concreto con características específicas de resistencia y durabilidad.

La elección entre estos dos métodos de análisis de agregado plantea preguntas importantes para los ingenieros y profesionales de la construcción. ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de cada método? ¿Cómo afecta esta elección al rendimiento de las mezclas y, en última instancia, a la integridad de las estructuras construidas? Estos interrogantes son el motor impulsor de esta tesis, que se propone realizar una comparación exhaustiva entre el "Método Marshall" y el "Método Bailey", desglosando sus fundamentos, procedimientos de prueba y aplicaciones específicas.

En un contexto en el que la construcción de infraestructura se enfrenta a desafíos cada vez más exigentes en términos de sostenibilidad, seguridad y eficiencia, comprender en profundidad estos métodos de análisis de agregado es esencial. Esta investigación aspira a proporcionar una base sólida de conocimiento que permita a los profesionales de la ingeniería tomar decisiones

informadas al seleccionar el método más adecuado para evaluar agregados en función de las necesidades de cada proyecto, contribuyendo así a la construcción de estructuras más resistentes y duraderas. en beneficio de la sociedad. A lo largo de esta tesis, se analizarán detenidamente ambos métodos, se presentarán resultados comparativos y se discutirá su relevancia en el ámbito de la ingeniería civil y la construcción.

1 Resumen del proyecto

1.1 Descripción del problema

Las obras civiles son una de las principales razones de desarrollo en un país, en especial cuando se trata de infraestructura vial, es por eso, que los materiales para la fabricación del pavimento, debe contar con características optimas que permitan incrementar la vida útil del mismo. Así pues, uno de los materiales más usados es la mezcla asfáltica, teniendo una producción a nivel nacional de 272.077 metros cúbicos (DANE,2023), lo que demuestra que la demanda del uso de este producto está vigente.

Tres de los problemas más comunes que se presentan en los pavimentos asfálticos son el fisuramiento por fatiga, el ahuellamiento, y los que corresponden a la adherencia agregado ligante, situación que disminuye la vida útil del pavimento e incrementa los costos de mantenimiento y operación vehicular. Como respuesta a la necesidad de incrementar la competitividad de los pavimentos, y tratando de minimizar los factores que inciden en él, es necesario conocer los diferentes métodos para la realización de esta mezcla, permitiendo determinar cuál es la más optima a usar.

Partiendo del hecho que las franjas granulométricas establecidas en las especificaciones del INVIAS establecen un rango de aceptación para los agregados pétreos, esto implica que existen muchas granulometrías que se pueden aceptar. Esto conlleva el problema que al momento de diseñar la mezcla asfáltica no se obtenga un empaquetamiento adecuado disminuyendo así la resistencia del pavimento. También un inconveniente adicional es que en el método tradicional no se tiene en cuenta la presencia de partículas denominadas “interceptores” las cuales son demasiado grandes para rellenar los huecos del agregado grueso disminuyendo así su cohesión y posteriormente la resistencia de la mezcla asfáltica (Miranda et al., s. f.). Todo esto indica que a pesar del buen criterio de los Ingeniero diseñadores, la utilización de limites granulométricos no es suficiente para la dosificación óptima del agregado pétreo.

De esta manera, en la fabricación de mezclas asfálticas la selección de la granulometría se hace a partir de la selección de las fracciones de material grueso o retenido en el tamiz N°4 (4.75mm); material fino o pasa tamiz N°4 y retenido en el tamiz N°200 (75µm); y llenante mineral o pasa tamiz N°200 (Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 400.2-13). De

manera general la selección del porcentaje correspondiente a cada fracción se determina con un método de prueba y error o con un criterio basado en la experiencia del ingeniero diseñador.

En este sentido, el agregado es aceptado cuando la granulometría seleccionada está dentro de los límites establecidos por las especificaciones del INVIAS para cada uno de los siguientes tipos de mezclas asfálticas: Mezcla densa en frío (EGCC 440.2.1.5), Mezcla abierta en frío (EGCC 441.2.1), Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (EGCC 450.2.1.4), Mezcla abierta en caliente (EGCC 451.2.1), Mezcla discontinua en caliente para capa de rodadura (EGCC 452.2.1.4) y Mezcla drenante (EGCC 453.2.1.4).

Por esta razón, para garantizar la seguridad y estabilidad de las infraestructuras viales, se pretende realizar una comparación que permita al ingeniero, analizar y estudiar los diferentes procesos y características que presentan los diferentes métodos para la realización de mezclas asfálticas óptimas.

1.1.1. Formulación del problema

- ¿Cuál es el método más efectivo para analizar la selección de dosificación de agregados de mezclas asfálticas?

1.2 Justificación

En Colombia es evidente que la Ingeniería Civil está en constante progreso, ha venido cobrando gran dinamismo y aumentando su relevancia en los últimos años. De esta manera, gracias a las nuevas tecnologías y al continuo avance en la investigación, se presentan diferentes métodos para el diseño de mezclas asfálticas, lo que permite evaluar las diferentes características, ventajas y desventajas de cada uno de estos, permitiendo determinar el óptimo para la elaboración de pavimentos, garantizando su vida útil y mejorando las condiciones de movilidad de los usuarios.

Así pues, se presentan dos métodos relevantes como es el método tradicional y el método Bailey; existen muchos estudios con respecto al método Bailey que lo señalan como una alternativa muy eficiente para la dosificación de agregados en mezclas asfálticas, entre ellos está (Ferreira et al., 2020), el cual menciona que una buena dosificación del agregado puede disminuir de manera

significativa el ahuellamiento en los pavimentos. También está el estudio realizado en la Universidad Federal de Campina Grande en Brasil, en el cual con los resultados se concluye que las mezclas realizadas con dosificación de agregados con el método Bailey tuvieron mayor resistencia (Cruz et al., 2022). (Miranda et al., s. f.) menciona que además la utilización del método Bailey puede predecir condiciones del agregado dentro de la mezcla asfáltica antes de realizarla, solo teniendo en cuenta las fracciones granulométricas establecidas por el método Bailey, lo que conlleva un ahorro significativo en tiempo y costo con los ensayos de laboratorio de que se pueden prescindir.

Por tanto, es necesario hacer un análisis correspondiente a la forma de dosificación de agregados y una evaluación de los materiales que aportan las canteras de la ciudad de Pasto y con esto establecer una comparación entre los diferentes métodos para determinar el más óptimo y eficiente.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar comparativamente la selección de dosificación de agregados de mezclas asfálticas por medio del método tradicional y el método de Bailey.

1.3.2. Objetivos específicos

- Dosificar agregados de mezclas asfálticas con método tradicional y método Bailey.
- Diseñar mezclas asfálticas utilizando las dosificaciones por método tradicional y método Bailey
- Evaluar el comportamiento mecánico de los agregados a partir de la selección de dosificaciones con método tradicional y método Bailey con base a la normativa vigente

1.4 Marco referencial o fundamentos teóricos

La teoría presentada en esta investigación hace referencia a conceptos de dosificación de agregados en el método tradicional y método Bailey, para la evaluación del mejor método a usar.

1.4.1. Antecedentes

Todos estos estudios apuntan a la importancia del agregado mineral en la resistencia de la mezcla asfáltica, la insuficiencia de las franjas establecidas por la normativa y al método Bailey como una alternativa innovadora para mejorar el esqueleto mineral en una mezcla asfáltica:

En la dosificación de mezclas asfálticas existen varios métodos para encontrar una resistencia adecuada, pero el método Bailey establece condiciones desde etapas tempranas, es decir cuando aún se está seleccionando el agregado, lo que permite una predicción del comportamiento de la mezcla asfáltica (Miranda et al., s. f.), esto se logra analizando el empaquetamiento de la mezcla teniendo en cuenta la granulometría.

En el estudio mencionado se prevé el volumen de vacíos en agregado, el cual es una propiedad importante a la hora de determinar la resistencia en una mezcla asfáltica, lo que implica que se eviten ensayos posteriores cuando la mezcla asfáltica ya está fabricada. Adicional a esto existen investigaciones que apuntan al mejoramiento de la resistencia de los pavimentos a partir de la dosificación de agregados, este es el caso del trabajo realizado por (GRANADOS, G. A. P.) en el que se concluye que el método Bailey ayuda a predecir cambios volumétricos en la mezcla asfáltica y prevé la presencia de presencia de “espaciadores” que segregan las partículas del agregado, dando una mejor compactación.

Un estudio realizado en la Universidad Nueva Granada que consiste en realizar pruebas de resistencia al ahuellamiento en asfaltos diseñados a partir de las franjas granulométricas establecidas por el INVIAS y el IDU, con granulometrías que varían entre las franjas inferior, media y superior, arrojo que algunas de las granulometrías a pesar de estar dentro de los límites de granulometría establecidos en la normativa, no cumplieron con otros requerimientos como el límite de velocidad de deformación (Reyes-Ortiz & Camacho-Tauta, 2008).

Otro estudio similar realizado en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en el que se realizaron ensayos de deformaciones plásticas a mezclas asfálticas con diferentes granulometrías de agregados obtenidos en canteras cercanas a la ciudad de Tunja, se obtuvo como resultado que dichas deformaciones son diferentes dependiendo si la curva granulométrica se

acerca más a límite inferior o al superior de las franjas de restricción aportadas por el invias, en ese estudio en particular se obtuvo menos deformaciones con agregados más cercanos a la franja inferior (Parra-Bohórquez, L. A. 2015). En su estudio (Swathi et al., 2021) utiliza el método Bailey para disminuir grandes vacíos generados en mezclas asfálticas con agregados de escoria de acero, como resultado se tuvo a pesar de las diferencias de gravedad específica entre agregado fino y grueso, se obtuvo mezclas con vacíos similares a los de una mezcla con agregado natural, además de un mayor modulo resiliente.

1.4.2. Marco teórico

1.4.2.1. Características del agregado mineral. El agregado mineral no es algo que se debe tomar a la ligera en la construcción de una mezcla asfáltica, éste debe cumplir con determinadas características para que tenga un funcionamiento óptimo dentro de la mezcla. A continuación, se muestra las propiedades que se deben tener en cuenta a la hora de la selección de un agregado:

- **Análisis granulométrico:** Es fundamental ya que establece los tamaños de las fracciones de agregado. Agregado grueso (retenido #4), agregado fino (pasa #4 y retenido en tamiz #200) y llenante mineral (pasa #200). Además, esta se presenta en forma detallada en una curva granulométrica que indica los porcentajes de las fracciones de agregado retenido en cada uno de los tamices. (INV E-213/2013)
- **Densidad:** Este es un parámetro muy importante ya que nos permite cuantificar la cantidad de agregado a partir de masa o pesos, también permite una percepción de cuan compacta es una muestra. Se calcula midiendo el volumen de una muestra de peso establecido, utilizando el principio de Arquímedes debido a la irregularidad de la superficie. La razón del peso sobre el volumen corresponde a la densidad. (INV E-217,222 y 223/2013)
- **Dureza:** Esta propiedad es importante porque determina la resistencia propia del agregado. Se mide a partir de tres ensayos diferentes: el primero es el desgaste en la máquina de los ángeles, el segundo es el Micro Deval y por último está el ensayo de 10% de finos. El

primero se mide la resistencia a la fragmentación, el segundo la resistencia al desgaste y el último que mide resistencia mecánica al aplastamiento. (INV E-218, 219, 238 y 224/2013)

- **Durabilidad:** Esta propiedad determina el comportamiento del agregado al soportar la intemperie durante el funcionamiento. Se realiza mediante la inmersión reiterada del agregado en soluciones saturadas de sulfatos de sodio o de magnesio y posterior secado en horno, esto genera una expansión interna que debilita el agregado. (INV E-220/2013)

- **Limpieza:** En este apartado se tienen en cuenta cuatro ensayos diferentes. El primero es el de impurezas en el agregado grueso, el cual consiste en separar por lavado las partículas más pequeñas del agregado, con lo que se determina un coeficiente de limpieza superficial; El segundo es el índice de plasticidad, que se restringen para las fracciones de agregado que pasan el tamiz #40 y consiste en moldear continuamente un rollo del material húmedo hasta que forme grietas; El tercero es el equivalente de arena, el cual se logra calcular con el material sumergido en agua e irrigado con un floculante que ayuda a separar la fracción de arenas de la de arcilla; Por último está el ensayo de azul de metileno, que consiste en añadir pequeñas gotas de este químico al agregado que está en inmersión y posteriormente comprobar la absorción que este tuvo a partir de una prueba de coloración. (INV E-237,125,126,133 y 235/2013)

- 1. **Geometría de las partículas:** para esta característica se tienen tres ensayos. El primero es el de porcentaje de partículas alargadas y aplanadas se mide en las partículas las relaciones de largo/espesor y ancho/espesor y mediante granulometría se determina en que porcentaje están presentes estas partículas en el agregado; el segundo es el de caras fracturadas, el cual es similar al anterior y se hace por inspección de las partículas; y por último, se tiene el ensayo de angularidad para fracciones finas, en este ensayo se pretende encontrar el volumen de vacíos sin compactar, esto se hace a partir de la diferencia entre el volumen de un recipiente prestablecido y el volumen de material fino que se logra separar de la muestra. (INV E-240,227 y 239/2013)

1.4.2.2.Método Bailey. Cumplidos los parámetros de calidad del agregado es necesario establecer un buen sistema para dosificarlo, para este propósito tiene el método de evaluación abordado en esta investigación y el cual es el eje fundamental de la misma, el método Bailey para dosificación de agregados. La Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA) en su comunicado en su comunicación 05 del 2012, presenta un artículo que detalla muy bien este método (Miranda et al., s. f.).

A diferencia del método tradicional, que establece el tamiz #4 como referencia para diferenciar agregado grueso del fino, en el método Bailey el tamiz de frontera se define en función del tamaño máximo nominal (**NMPS** por sus siglas en inglés) mediante la siguiente ecuación:

$$PCS = NMPS * 0.22$$

Ecuación 1. Tamiz de control primario

Donde, **PCS** (*Primary Control Sieve*) es el tamiz de control primario.

Además, define tres tamices más: Tamiz medio **HS** (*Half Sieve*), Tamiz de control secundario **SCS** (*Secondary Control Sieve*) y Tamiz de control terciario **TCS** (*Tertiary Control Sieve*); los cuales se encuentran a partir de las expresiones mostradas a continuación:

$$HS = 0.5 * NMPS$$

$$SCS = 0.22 * PCS$$

$$TCS = 0.22 * SCS$$

Para hacer la dosificación, es necesario como parámetros iniciales la densidad aparente suelta **LUW** (*Loose Unit Weight*) y la densidad aparente compactada **RUW** (*Rodded Unit Weight*) tanto en la fracción gruesa como en la fina. Los procedimientos para encontrar estos parámetros, en Colombia se regulan bajo la norma de ensayo (INV E-217/13) del INVIAS.

Teniendo estas densidades, se puede dosificar una mezcla a partir de la densidad aparente del agregado grueso. Si se trabaja con una densidad seleccionada **CUW** (*Chosen Unit Weight*), se tiene tres condiciones de mezcla.

- Mezcla fina $CUW < LUW * 90\%$, entonces el agregado fino excede los vacíos del agregado grueso, por tanto, no habrá contacto entre partículas del agregado grueso.
- Mezcla gruesa densa $LUW * 95\% < CUW < LUW * 105\%$, hay contacto en el agregado grueso y el agregado fino ocupa los vacíos, cumpliendo la función de densificar la mezcla.
- Mezcla SMA (*Stone Mastic Asphalt*) $RUW * 110\% < CUW < RUW * 125$, es una mezcla muy compacta, discontinua y con bajo contenido de fino.

Calculado las densidades LUW y RUW, y seleccionado el valor de densidad CUW, se procede con el proceso de dosificación del agregado. Primero se calcula el volumen de vacíos en el agregado grueso y a partir de la densidad compactada (RUW) del agregado fino, se calcula la cantidad de agregado fino y se establece los porcentajes las fracciones gruesa y fina. Se calcula el porcentaje de cada material granular que compone la mezcla. Se ajusta la cantidad de filler (pasa N°200) y por último se calcula los porcentajes de cada fracción del agregado y se elabora la curva granulométrica.

Ahora bien, el método proporciona una serie de relaciones que sirven para determinar el desempeño que tendrá esa dosificación de agregados cuando se elabore la mezcla asfáltica, estos vienen dados por las expresiones:

- Relación de partículas pequeñas y grandes del agregado grueso **CA**:

$$CA = \frac{\%HS - \%PCS}{100 - \%HS}$$

Ecuación 2. Relación de partículas

- Relación de arena fina y total de agregado fino **FAc**:

$$FAc = \frac{\%SCS}{\%PCS}$$

Ecuación 3. Relación arena fina y agregados

- Relación de filler y arena fina del agregado fino **FAf**:

$$FAf = \frac{\%TCS}{\%SCS}$$

Ecuación 4. Relación Filler

Existen valores recomendados para estas relaciones, los cuales nos permiten predecir como será el rendimiento del agregado cuando se produzca la mezcla asfáltica, la siguiente figura muestra algunos de ellos.

Tabla 1.

Intervalos para mezclas gruesas

	NMPS, mm					
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75
CA Ratio	0.80-0.95	0.70-0.85	0.60-0.75	0.50-0.65	0.40-0.55	0.30-0.45
FAc Ratio	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50
FA_t Ratio	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50

Tabla 2.

Intervalos para mezclas SMA

	NMPS, mm		
	19.0	12.5	9.5
CA Ratio	0.35-0.50	0.25-0.40	0.15-0.30
FAc Ratio	0.60-0.85	0.60-0.85	0.60-0.85
FA_t Ratio	0.65-0.90	0.60-0.85	0.60-0.85

1.4.3. Marco contextual

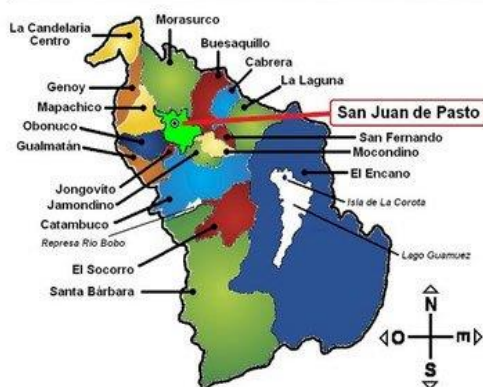
En la actualidad se ha expandido a lo largo de todo el mundo el uso de materiales bituminosos en la pavimentación debido a sus características de flexibilidad y resistencia. El método tradicional para dosificar las fracciones gruesa y fina del agregado se basa en conocimientos empíricos de quien diseña el pavimento, sin embargo, debido al rápido crecimiento de la sociedad es necesario renovar esta forma de trabajo. La revista Science prevé un crecimiento del 60% de las carreteras en el mundo hasta el 2050 (Ibisch et al., 2016), es un aumento significativo en la demanda de la construcción de carreteras, lo que implica que se debe optimizar y mejorar todos los métodos de construcción implementados en la actualidad incluida la dosificación de los agregados. Investigaciones realizadas como (Ferreira et al., 2020) o la que se realizó en la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA) señalan que el método Bailey presenta una ventaja frente al método tradicional de dosificación (Miranda et al., s. f.).

De esta manera, evaluando el contexto donde se elaborará el proyecto, es importante mencionar a la ciudad de San Juan de Pasto, situado en el suroccidente de Colombia, en medio de la cordillera de los Andes en el macizo montañoso denominado nudo de los Pastos y la ciudad está situada en el denominado valle de Atriz, al pie del volcán Galeras y está muy cercana a la línea del ecuador (DGRD, 202354). El territorio municipal tiene en total 1181 km² de superficie, de los cuales el área urbana consta de 14,7 km². Así pues, se realizará el análisis con respecto a las canteras ubicadas en la región.

Figura 1.

Mapa político San Juan de Pasto.

MUNICIPIO DE PASTO



1.4.4. Marco legal

El marco legal proporciona las bases sobre las cuales las instituciones construyen y determinan el alcance y naturaleza de la participación política. Es así como en la siguiente tabla, se presentan los requisitos legales, la cual, está orientada específicamente hacia el uso de agregados pétreos para la construcción de pavimentos flexibles.

Tabla 3.

Resumen de aspecto legales

N°	Tipo de Norma	Año	Entidad emisora	Descripción
INV E-100	Manual de Normas de Ensayo del INVIAS		INVIAS	Presenta los aspectos generales como supervisión, desarrollo, control y aceptación de trabajos
INV E-200	Manual de Normas de Ensayo del INVIAS		INVIAS	Ensayos relacionados con los agregados pétreos

Artículo 450	Manual de Especificaciones de Construcción de Carreteras	2013	INVIAS	Aborda las Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua
INV E-700	Manual de Normas de Ensayo del INVIAS		INVIAS	Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos (Primera parte)

Es importante tener en cuenta las siguientes propiedades y sus respectivos valores reglamentarios:

- Granulometría: cómo se puede observar en la tabla 450-6 de las especificaciones del INVIAS, hay unos rangos que limitan a cada fracción de agregado dependiendo del tipo de mezcla asfáltica a trabajar. Esto implica que no solo existe una, sino que existen varias granulometrías que pueden cumplir con las condiciones que el INVIAS establece.
- Propiedades de la calidad del agregado: estas propiedades se mencionan en marco teórico, no obstante, a continuación, se muestra la tabla 450-3 de las especificaciones del INVIAS en la cual se indican los valores esta entidad recomienda usar a la hora de construir un pavimento flexible.

1.5. Metodología

La presente sección da a conocer los procedimientos requeridos para la investigación en cuanto a la comparación de la dosificación de agregados evaluada por los distintos métodos expuestos, a medida que se tiene en cuenta el alcance de los objetivos propuestos y como estos se llevan a cabo de manera pertinente y eficaz.

De esta manera, la mezcla asfáltica es un material compuesto por partículas de agregado de diferentes tamaños, asfalto y vacíos, cuyo desempeño, en términos de deformación permanente, roturas por fatiga y desgaste, cuando está sometido a las sollicitaciones del tráfico y climáticas, depende de las propiedades y proporciones de cada uno de los materiales que la componen.

El agregado en una mezcla asfáltica puede ser considerado como el esqueleto de la mezcla, debido a que es el responsable de dar la resistencia a las cargas del tráfico. Las propiedades de ese esqueleto están relacionadas, principalmente, con la dureza, la textura superficial, la angularidad, la forma y la distribución granulométrica de los agregados.

1.5.1. Método convencional

El método Marshall es una metodología utilizada en la industria de la construcción para el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente. Este método fue desarrollado por Bruce Marshall en la década de 1930 y es ampliamente utilizado en la actualidad debido a su precisión y fiabilidad en el diseño de mezclas asfálticas de alta calidad.

La metodología del método Marshall para el diseño de pavimentos asfálticos consta de los siguientes pasos:

1.5.1.1. Selección del material y granulometría.

1.5.2.3.1. Selección del material. Se selecciona una muestra representativa de la mezcla asfáltica que se va a utilizar en la construcción del pavimento. Es importante tener en cuenta las características de los materiales de la mezcla, como el tipo y tamaño de los agregados, el tipo de asfalto y su viscosidad

1.5.2.3.2. Granulometría. Se realiza el ensayo de granulometría para determinar las proporciones de agregados y asfalto para las muestras, esto por medio de tamices y análisis.

1.5.1.2. Preparación de la muestra (briquetas). Se realiza la preparación de la muestra, realizando una compactación de la mezcla asfáltica en un molde cilíndrico, sometiéndola a una carga específica y temperatura controlada para evaluar sus propiedades de estabilidad y deformación.

1.5.1.3.Cálculo de densidades y gravedad específica. Después de la elaboración de las briquetas, se realiza el cálculo de densidades y gravedad específica de cada uno de ellos, lo que permitirá obtener un análisis exhaustivo en cuanto a las propiedades que presenta la muestra.

1.5.2. Método Bailey

El Método Bailey de selección granulométrica se relaciona directamente con las características de compactación de cada fracción, con los vacíos en el agregado mineral (VAM) y con los vacíos de la mezcla (Vv). Este selecciona una estructura de agregados de la mezcla buscando una mayor trabazón de los agregados gruesos y puede ser usado con cualquier método de dosificación de mezclas asfálticas (Superpave, Marshal, Hveem, etc.).

Para su desarrollo, se realizará la siguiente metodología:

1.5.2.1.Análisis granulométrico. Se selecciona una muestra representativa de la mezcla asfáltica que se va a utilizar en la construcción del pavimento. Es importante tener en cuenta las características de los materiales de la mezcla, como el tipo y tamaño de los agregados, el tipo de asfalto y su viscosidad. Además, se tiene en cuenta las tres categorías a analizar: Agregado grueso, agregado grueso- fino y agregado fino- fino.

1.5.2.4.Cálculo de densidades. Se procede a realizar un ensayo específico para el agregado grueso y el agregado fino-grueso, el cual se encuentra definido en la Norma INV E 217. Este ensayo tiene como objetivo determinar las densidades de estos agregados. Así pues, se debe obtener una muestra representativa del agregado grueso o fino- grueso que se va a analizar.

1.5.2.5.Gravedad y absorción. Se realiza el cálculo de gravedad y absorción teniendo en cuenta las normas de INV E222 Y INV E 223.

1.5.2.5.1. INV E 222. *Se realizan los cálculos y procedimientos establecidos en la norma, para de esta manera establecer los métodos de prueba para evaluar las propiedades*

del concreto asfáltico utilizado en pavimentos y otras aplicaciones de construcción.

1.5.2.5.2. INVE 223. Se realizan los cálculos y procedimientos establecidos en la norma, para determinar las propiedades de los agregados utilizados en la fabricación de concreto asfáltico, lo que incluye aspectos como la granulometría y la resistencia a la abrasión.

1.5.2.6. Granulometría. La selección granulométrica de mezclas asfálticas se realiza por prueba y error, siendo generalmente utilizadas distribuciones granulométricas que se desenvuelven correctamente durante años según la experiencia

1.5.2.7. Preparación de la muestra. Se realiza la preparación de la muestra, realizando una compactación de la mezcla asfáltica en un molde cilíndrico, sometiéndola a una carga específica y temperatura controlada para evaluar sus propiedades de estabilidad y deformación.

1.5.2.8. Cálculo de densidad bulk y gravedad específica. Después de la elaboración de las briquetas, se realiza el cálculo de densidades y gravedad específica de cada uno de ellos, lo que permitirá obtener un análisis exhaustivo en cuanto a las propiedades que presenta la muestra.

1.5.3. Ensayo deflexión por método convencional y Bailey

Después de obtener las briquetas por medio del diseño de mezcla de ambos métodos, se realiza el ensayo de deflexión, Se aplica una carga axial sobre la muestra compactada y se mide la deformación vertical máxima. La estabilidad de la mezcla se determina a partir de la carga necesaria para producir una deformación vertical específica.

1.5.4. Porcentaje óptimo

Finalmente, después de realizar los ensayos correspondientes al método convencional y método Bailey, se ejecuta el porcentaje óptimo a través de la comparación y análisis de resultados.

1.5.5. Campo de investigación

Dado que la presente investigación se enfoca en la elaboración de y optimización de mezclas asfálticas, se puede afirmar que, según la clasificación de las áreas de conocimiento de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo (OCDE), pertenece al área de Ingeniería y Tecnología, a su vez, a la subárea de Ingeniería Civil, con disciplina de Ingeniería Civil enfocada pavimentos.

1.5.6. Tipo de investigación

El objetivo de esta investigación es establecer diferencias, ventajas y desventajas entre el método tradicional de dosificación de agregados y el método Bailey, es claro que la presente es una Investigación Comparativa.

1.5.7. Enfoque de investigación

El enfoque de investigación de este proyecto es cuantitativo, ya que requiere de la medición de fenómenos para la obtención de datos (en este caso granulometría y resistencia de la mezcla asfáltica), pretende probar una hipótesis establecida, tiene un proceso secuencial, lineal y bien estructurado y se desarrolla manera muy objetiva para obtener un resultado final preciso.

1.5.8. Hipótesis

Identificar las diferencias significativas en rendimiento, durabilidad y factores económicos al comparar los métodos de diseño de mezclas asfálticas Bailey y Marshall, mejorando así la selección de métodos en proyectos de pavimentación.

2. Presentación de resultados

2.1. Método convencional

2.1.1. Selección del material y granulometría.

2.1.1.1. Selección de la muestra. En referencia al Método Convencional, en primer lugar, fue necesario reunir información de los materiales a usar, teniendo en cuenta las normas locales. Para ello, se llevó a cabo una visita a la cantera de la empresa “PANAVIAS”, ubicada a la salida occidente, vía Pasto- Sandoná.

Así pues, fue posible observar que, en esta cantera, se ofrecen dos tipos de agregados; un agregado fino, el cual, es llamado “polvillo” y un agregado grueso, llamado “grava”. De igual manera, se realizó la recolección del asfalto que la cantera utiliza en las obras de pavimentación realizadas en la zona.

Ahora bien, se llevó el material a laboratorio, en donde se procede a realizar la limpieza de este. Para esto, se realizó el lavado del agregado (fino y grueso), teniendo en cuenta que al realizar esto, el agregado fino se desperdiciaba, fue necesario recolectar el agua del lavado y esperar a que el material fino se asiente. Después de esto, se llevó el material al horno por 24 horas, obteniendo de esta manera, un material totalmente seco y libre de impurezas.

2.1.1.2.**Granulometría.** Después de seleccionar el material más óptimo, se procedió a determinar las proporciones adecuadas para la mezcla. Esto implica seleccionar la cantidad óptima de agregado grueso y fino que cumpla con las especificaciones requeridas para el proyecto en cuestión, para ello, es necesario tener en cuenta que la granulometría cumpliera con la norma del método Marshall MDC-10. Por lo tanto, se utilizó una serie de tamices con diferentes diámetros, los cuales, deben cumplir los requisitos de la NTC 32(ASTM E11), estos son ensamblados en una columna desde el mayor hasta el menor. En la parte superior, donde se encuentra el tamiz de mayor diámetro, se agrega el material siendo en este caso agregado grueso; la columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos en una tamizadora mecánica. Luego de 60 segundos, determinados por la norma INV E 213-07, se retiran los tamices y se desensamblan, tomando por separado los pesos de material retenido en cada uno de ellos y que, en su suma, deben corresponder al peso total del material que inicialmente se colocó en la columna de tamices, en este caso siendo 100 kg, lo anterior, se puede evidenciar en la tabla expuesta a continuación

Tabla 4.

Granulometría método convencional MDC-10

#Tamiz	D (In)	MDC-10			
		D (mm)	%pasa	% ret acum	%ret parcial
1	25.400	25	100	0	0
3/4	19.000	19	100	0	0
1/2	12.500	12.5	100	0	0
3/8	9.500	9.5	100	0	0
#4	4.750	4.75	65	35	35
#10	2.000	2	43	57	22
#40	0.425	0.425	16	84	27
#80	0.180	0.18	9	91	7
#200	0.075	0.075	5	95	4
Fondo			0	100	5
Total					100

Una vez realizado la granulometría, se escogió la briqueta con la que se llevó a cabo el trabajo, la cual, tiene una capacidad de 1200 G. Así pues, para el desarrollo de la investigación, se tomó 1150 gramos de agregado y 50 gramos de asfalto.

Tabla 5.

Peso en gramos de material seleccionado y capacidad de material en Briqueta.

Con lo anterior, se procede a realizar el cálculo correspondiente para obtener el peso parcial que se va a necesitar del agregado. De esta manera, se tiene en cuenta el material que se retuvo en cada tamiz, como también el peso total para las 12 briquetas con las que se va a trabajar, lo anterior, se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 6.

Peso parcial y peso total

<i>#Tamiz</i>	<i>Peso parcial (Gr)</i>	<i>Peso Total (Gr)</i>
1	0	0
3/4	0	0
1/2	0	0
3/8	0	0
#4	402.5	4830
#10	253	3036
#40	310.5	3726
#80	80.5	966
#200	46	552
Fondo	57.5	690

Ahora bien, es necesario tener en cuenta el porcentaje con el cual se va a trabajar para cada una de las briquetas, por lo tanto, al realizar 12 briquetas, se dividirán los porcentajes de 5% 5.5% 6% y 6.5% obteniendo tres briquetas de cada porcentaje. Después, se realizó el cálculo del porcentaje de agregado y el porcentaje de asfalto que lleva cada briqueta.

Tabla 7.

Porcentajes repartidos para cada briqueta.

Peso en gramos		
Briqueta	Asfalto	Agregados
1200	50	1150

2.1.2. Preparación de la muestra.

Con base a lo anterior, se procede a realizar la elaboración de cilindros de mezclas asfálticas, para ello, en primer lugar, se mezcló cada porcentaje de agregado retenido en cada tamiz, el cual, fue sometido a calor en estufa hasta alcanzar una temperatura de 140 °C; del mismo modo, se lleva el asfalto al horno hasta alcanzar la temperatura de 160°C. Así pues, una vez estén a esta temperatura, se mezclan hasta lograr que el asfalto se disperse totalmente sobre el agregado. Se continúa con la preparación de las briquetas, las cuales, deben permanecer en un ambiente cálido; se llenan las briquetas y se lleva a la máquina de compactación, para lograr una densidad óptima en la muestra. Posteriormente se configura la máquina a 75 golpes por cada cara de la biqueta, luego, se saca las briquetas de la máquina y se retira el molde, finalmente, se deja enfriar las briquetas durante 24 horas, para proceder obtener los pesos de cada biqueta y determinar la densidad bulk.

Los datos de cada cilindro se presentan en la siguiente tabla

Tabla 8.

Datos de pesos de cada biqueta

Marshall													
Pb	5.0			5.5			6.0			6.5			
Agregados	1150			1150			1150			1150			
Asfalto	57.5			63.25			69			74.75			
Briqueta	1207.5			1213.25			1219			1224.75			
		Cilindro 5%			Cilindro 5.5%			Cilindro 6%			Cilindro 6.5%		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Altura (mm)	68	61.4	67.8	63.8	65	68.2	64.6	69.5	67.3	66.8	65.46	66.2	2
Diámetro (mm)	101.1	101.8	101.9	102	101.6	101.5	101.5	101.1	101.3	99.9	100.5	4	100.97
Peso (gr) MA	1157.6	1119.65	1170.59	1161.02	1145.27	1163.21	1128.85	1204.73	1175.52	1166.66	1179.20	1169	

Peso sumergido (gr)	617	599	638	622	609	639	613	651	636	627	642	633
Peso superficialmente seco	1163	1121	1174	1163	1149	1165	1135	1209	1178	1169	1181	1174

2.1.3. Cálculo de densidades y gravedad específica.

La densidad Bulk se refiere a la masa de una unidad de volumen de una mezcla asfáltica compactada. Este cálculo, permite realizar la evaluación de la compactación, es decir, determinar cuan bien se ha compactado la muestra asfáltica, de esta manera, se puede garantizar la durabilidad del pavimento, ya que una compactación deficiente puede dar como resultado un pavimento más susceptible a daños y deformaciones.

Para determinar la densidad de bulk, se procede a realizar la siguiente ecuación:

$$Densidad\ Bulk = \frac{Peso\ MA}{Peso\ superficialmente\ seco} - Peso\ sumergido$$

Ecuación 5. Densidad Bulk

Reemplazando los valores correspondientes, a continuación, se obtiene la densidad obtenida para cada cilindro.

Tabla 9.

Densidad Bulk

	Cilindro 5%			Cilindro 5.5%			Cilindro 6%			Cilindro 6.5%		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Densidad BULK	2.120	2.145	2.180	2.144	2.121	2.208	2.161	2.157	2.172	2.153	2.191	2.161

Ahora bien, después de obtener las cargas con sus respectivas deflexiones, es de vital importancia obtener la gravedad específica para ello, se hará uso de la siguiente ecuación.

$$G = \frac{A}{A + D - E}$$

Ecuación 6. Gravedad específica

Donde:

G: Gravedad específica de la mezcla

A: Masa en el aire de la muestra seca (g)

D: Masa de la tapa más el picnómetro lleno con agua a 25°C (g)

E: Masa del picnómetro con la tapa, el agua y la muestra a 25°C(g)

Reemplazando los valores, se obtiene:

$$G = \frac{1182.78}{1182.78 + 7401.57 - 8065}$$

$$G = 2.277$$

2.2.Método Bailey

2.2.1. Análisis granulométrico

El Método Bailey se basa en un análisis granulométrico que tiene por objetivo la separación de los agregados en tres categorías: agregado grueso, agregado fino-grueso y agregado fino-fino. Para llevar a cabo este proceso, se utilizan tamices de números 8, 200 y fondo de acuerdo con la normatividad vigente.

- El agregado retenido en el tamiz número 8 se clasifica como agregado grueso.
- El agregado retenido en el tamiz número 200 se clasifica como agregado fino grueso.
- El agregado que pasa por el tamiz número 200 y se retiene en el fondo se clasifica como agregado fino- fino.

2.2.2. Cálculo de densidades

Una vez completado el análisis granulométrico, se procede a realizar un ensayo específico para el agregado grueso y el agregado fino-grueso, el cual se encuentra definido en la Norma INV E 217. Este ensayo tiene como objetivo determinar las densidades de estos agregados de acuerdo con el procedimiento detallado en dicha norma.

El procedimiento a seguir para este ensayo se encuentra especificado en la Norma INV E 217 y debe ser seguido de manera rigurosa para garantizar la precisión de las mediciones y la conformidad con las regulaciones establecidas.

Así pues, se debe obtener una muestra representativa del agregado grueso o fino- grueso que se va a analizar. Esta muestra debe ser representativa del lote o la fuente de agregado, para preparar la muestra, esta debe ser secada en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar una masa constante. Después, se procede a realizar el cálculo de la densidad bulk con la siguiente ecuación:

$$M = \frac{G - T}{V}$$

Ecuación 7. Densidad Bulk

Donde:

M: Densidad Bulk del agregado (kg/m^3)

G: Masa del agregado más el recipiente de medida (kg)

T: Masa del recipiente de medida (kg)

V: Volumen del recipiente de medida (m^3)

F: Factor de medida ($1/\text{m}^3$)

Reemplazando los valores correspondientes, se obtiene:

Tabla 10.

Densidad Bulk agregado grueso

DENSIDAD BULK	
AGREGADO GRUESO	
radio recipiente (m)	0.0975
Altura recipiente (m)	0.179
G (kg)	10.4
T (kg)	3.507
V (m^3)	0.005345805
M (kg/m^3)	1289.422154

Tabla 11.

Densidad Bulk agregado grueso (compactado)

DENSIDAD BULK	
AGREGADO GRUESO (COMPACTADA)	
radio recipiente (m)	0.0975
Altura recipiente (m)	0.179
G (kg)	9.849
T (kg)	3.507
V (m^3)	0.005345805
M (kg/m^3)	1186.35069

Tabla 12.*Densidad Bulk agregado fino*

DENSIDAD BULK	
AGREGADO FINO	
radio recipiente (m)	0.0975
Altura recipiente (m)	0.179
G (kg)	10.68
T (kg)	3.507
V (m³)	0.005345805
M (kg/ m³)	1341.799668

De acuerdo con la norma INV E 217 y las consideraciones específicas para el agregado fino, se determinó que no era necesario realizar el ensayo con la mezcla compactada. Esto se debe a que, dado que el agregado fino tiene un tamaño de partícula pequeño, se espera que tenga un mínimo de vacíos, y las diferencias entre la densidad compactada y la densidad sin compactar sean relativamente pequeñas. Por lo tanto, se omite el ensayo de densidad en mezcla compactada para el agregado fino.

2.2.3. Gravedad específica y absorción

Adicionalmente, se llevaron a cabo otros ensayos para caracterizar el agregado fino y el agregado grueso:

Para el agregado fino, se realizaron los siguientes ensayos según las normas correspondientes:

- Gravedad Específica: Se siguió el procedimiento establecido en la norma INV E 22 para determinar la gravedad específica del agregado fino. Este ensayo permite calcular la relación entre el peso del agregado y el peso de un volumen igual de agua.
- Absorción: Se siguió el procedimiento establecido en la norma INV E 22 para medir la absorción del agregado fino. La absorción es la cantidad de agua que el agregado fino es capaz de retener, lo que es importante para el diseño de mezclas asfálticas y hormigones.

Para el agregado grueso, se llevaron a cabo ensayos similares, pero siguiendo las especificaciones de la norma INV E 223. Estos ensayos permiten obtener información detallada sobre la densidad, gravedad específica y absorción del agregado grueso, lo que es crucial para su uso en proyectos de construcción de carreteras y pavimentos.

Estos ensayos se realizaron siguiendo los procedimientos detallados en las normas INV E 22 e INV E 223, y los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre las propiedades físicas de los agregados, lo que es fundamental para el diseño y la calidad de las mezclas asfálticas y de hormigón utilizadas en la construcción de infraestructura vial y civil.

2.2.3.1. INV E 22: Ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino. El procedimiento gravimétrico se utiliza para determinar la densidad y absorción del agregado fino. Para ello, es necesario realizar el siguiente procedimiento:

1. Preparación del Picnómetro y Agregado Fino:
 - Se llena parcialmente el picnómetro con agua.
 - Inmediatamente, se introducen en el picnómetro 500 ± 10 g del agregado fino saturado y superficialmente seco, preparado según las especificaciones de la Sección 6.
 - Se añade agua al picnómetro hasta que alcance aproximadamente el 90 % de su capacidad.
2. Agitación del Picnómetro:
 - Se procede a agitar el picnómetro para eliminar las burbujas de aire visibles. La agitación puede realizarse de dos formas:
 - Agitación manual: Se agita manualmente el picnómetro durante 15 a 20 minutos para eliminar las burbujas de aire. En ocasiones, se utiliza una toalla de papel o alcohol isopropílico para eliminar la espuma que pueda formarse.

El propósito de este procedimiento es asegurar que el agregado fino se encuentre en condiciones adecuadas y libre de burbujas de aire para determinar con precisión su densidad y

absorción. La agitación es esencial para obtener resultados confiables y coherentes en el análisis gravimétrico.

Con base a lo anterior, se realizan los siguientes cálculos:

- Densidad Relativa:

$$SH = \frac{A}{(B + S - C)}$$

Ecuación 8. Densidad Relativa seca al horno

- Densidad Relativa:

$$SSS = \frac{S}{(B + S - C)}$$

Ecuación 9. Densidad Relativa sat. superficialmente seca

- Densidad Relativa aparente:

$$DRA = \frac{A}{(B + A - C)}$$

Ecuación 10. Densidad relativa aparente

- Densidad Seca al horno:

$$SH = \frac{997.5A}{(B + S - C)}$$

Ecuación 11. Densidad seca al horno

- Densidad en condición saturada y superficialmente seca:

$$SSS = \frac{997.5S}{(B + S - C)}$$

Ecuación 12. Densidad saturada superficialmente seca

- Densidad Aparente:

$$\frac{997.5A}{(B + A - C)}$$

Ecuación 13. Densidad aparente

- Absorción:

$$Absorción = \frac{S - A}{A} \times 100$$

Ecuación 14. Absorción finos

Donde:

A: Masa del aire de la muestra seca al horno (g)

B: Masa del picnómetro aforado lleno de agua (g)

C: Masa total del picnómetro aforado con la muestra lleno de agua (g)

S: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (g)

Reemplazando los valores correspondientes, se obtiene:

Tabla 13.

Gravedad específica y absorción del agregado fino

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DEL AGREGADO FINO	
DATOS	
A (Kg)	0.49
B (Kg)	0.682
C (Kg)	1.025
S	0.5
S1	0.5

PROCEDIMIENTO GRAVIMETRICO	
Densidad relativa	
Sh	3.121019108
Densidad relativa	
SSS	3.184713376
Densidad relativa aparente	
DRA	3.333333333
Densidad en condición seca al horno	
SH (kg/m³)	3113.216561
SSS (kg/m³)	3176.751592
Densidad Aparente (kg/m³)	3325
Absorción	2.0408%

2.2.3.2. INV E 223: Ensayo de densidad y absorción del agregado grueso. Para el desarrollo de este ensayo, es necesario realizar el siguiente procedimiento:

1. Secado en Horno:

- La muestra se seca en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante. Este paso elimina la humedad presente en la muestra.

2. Enfriamiento al Aire:

- Después del secado en el horno, la muestra se enfría al aire a temperatura ambiente durante 1 a 3 horas o hasta que el agregado sea manipulable (aproximadamente 50°C).

3. Inmersión en Agua:

- La muestra se sumerge en agua a temperatura ambiente durante un período de 24 ± 4 horas. Este paso permite que la muestra se sature con agua.

4. Consideraciones Adicionales:

- Cuando los valores de la densidad relativa (gravedad específica) y absorción se utilizan en el diseño de mezclas de concreto hidráulico y los agregados se emplean en su condición normal de humedad, se puede omitir el secado previo en el horno y el período de inmersión.

- Se debe tener en cuenta que los valores de absorción y densidad relativa (gravedad específica) pueden ser más altos para agregados que no se han secado en el horno antes de la inmersión, especialmente cuando hay partículas mayores de 75 mm, ya que el agua puede no penetrar completamente en los vacíos más profundos durante el período de inmersión.

5. Determinación de la Masa en Condición Saturada con Superficie Seca (SSS):

- Secado de la Superficie:

Después del período de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas, eliminando el agua superficial visible. Esto se logra rodando las partículas sobre un paño absorbente de gran tamaño. Se deben tomar precauciones para evitar la evaporación del agua de los poros durante el proceso de secado de la superficie.

- Determinación de la Masa SSS:

Se determina la masa de la muestra en la condición saturada con superficie seca (SSS) con una aproximación de 0.5 g o 0.05 % de la masa de la muestra, la que sea mayor, a una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Se debe evitar la inclusión de aire en la muestra antes de determinar su masa, agitando la canastilla mientras está sumergida en agua.

Este proceso de acondicionamiento es fundamental para obtener mediciones precisas de la densidad relativa y absorción del agregado, lo que es crucial en el diseño y la calidad de mezclas de concreto y asfalto utilizadas en la construcción.

Con base a lo anterior, se realizan los siguientes cálculos:

- Densidad Relativa:

$$SH = \frac{A}{(B - C)}$$

Ecuación 15. Densidad Relativa seca al horno

- Densidad Relativa:

$$SSS = \frac{B}{(B - C)}$$

Ecuación 16. Densidad Relativa saturada superficialmente seca

- Densidad Relativa Aparente:

$$DRA = \frac{A}{(A - C)}$$

Ecuación 17. Densidad relativa aparente

- Densidad Seca al horno:

$$SH = \frac{997.5A}{(B - C)}$$

Ecuación 18. Densidad seca al horno

- Densidad en condición saturada y superficialmente seca:

$$SSS = \frac{997.5B}{(B - C)}$$

Ecuación 19. Densidad saturada superficialmente seca

- Densidad Aparente:

$$\frac{997.5B}{(A - C)}$$

Ecuación 20. Densidad aparente

- Absorción:

$$Absorción = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Ecuación 21. Absorción gruesos

Donde:

A: Masa del aire de la muestra seca al horno (g)

B: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (g)

C: Masa aparente de la muestra saturada en agua(g)

Reemplazando los valores correspondientes, se obtiene:

Tabla 14.

Gravedad específica y absorción del agregado grueso

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO	
A (Kg)	1.98
B (Kg)	2.051
C (Kg)	1.101
Densidad relativa	
Sh	2.084210526
Densidad relativa	
SSS	2.158947368
Densidad relativa aparente	
DRA	2.252559727
Densidad en condición seca al horno	
SH (kg/m ^3)	2079
SSS(kg/m ^3)	2153.55
Densidad Aparente (kg/m ^3)	2246.928328

2.2.4. Granulometría:

En el proceso de análisis de granulometría mediante el método de Bailey, se realizó un enfoque riguroso basado en las directrices de la normativa INVIAS. Inicialmente, se utilizó la granulometría original como punto de partida, empleando los tamices inferiores estipulados por la Norma MDC-10.

Este proceso permite obtener un porcentaje de material retenido acumulado, el cual se distribuyó en tres grupos distintos:

- Grupo 1 (Agregados Gruesos): En este grupo se encuentra el agregado que permanece retenido en el tamiz número 8. Estos agregados son clasificados como gruesos debido a su mayor tamaño.
- Grupo 2 (Agregados Fino - Grueso): El segundo grupo incluye el agregado que pasa a través del tamiz número 8 pero se retiene en el tamiz número 100. Esta categoría se aplica específicamente a los agregados que son considerados como fino - gruesos.
- Grupo 3 (Agregados Finos): El tercer grupo comprende el agregado que se retiene en el fondo. Estos agregados son clasificados como finos debido a su menor tamaño.

A partir del porcentaje de material retenido acumulado, calculamos el retenido parcial, el cual es determinado de la siguiente manera:

Para agregados gruesos, el retenido parcial se obtiene sumando los porcentajes de retenido parcial del Grupo 1. En el caso de agregados fino gruesos, el retenido parcial se calcula sumando los porcentajes de retenido parcial del Grupo 2. Por otro lado, para agregados finos, el retenido parcial es la suma del porcentaje de retenido parcial del Grupo 3.

Este proceso de análisis granulométrico es fundamental para caracterizar y evaluar las propiedades de los agregados, lo que a su vez tiene un impacto significativo en la formulación y calidad de las mezclas utilizadas en diversos proyectos de construcción, cumpliendo con las regulaciones y estándares establecidos por INVIAS.

Lo anterior, se observa a continuación:

Tabla 15.

Análisis granulométrico del agregado

#Tamiz	D (ln)	Gradación Original	Agregado grueso				Agregado Fino-Grueso		Agregado Fino		
			% ret acum	%ret parcial	%ret parcial	% ret acum	Pasa	%ret parcial	% ret acum	Pasa	
1	25.400	100	0	0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	100
3/4	19.000	100	0	0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	100
1/2	12.500	100	0	0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	100
3/8	9.500	100	0	0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	100
#4	4.750	62	38	38	69.1	69.1	30.9	0.0	0.0	100.0	100
#8	2.360	45	55	17	30.9	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100
#30	0.425	16	84	29	0.0	100.0	0.0	72.5	72.5	27.5	100
#80	0.180	9	91	7	0.0	100.0	0.0	17.5	90.0	10.0	100
#100	0.075	5	95	4	0.0	100.0	0.0	10.0	100.0	0.0	100
Fondo		0	100	5	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	5
Total			100								

De esta manera, se obtienen los porcentajes parciales de cada agregado que se utilizará en las mezclas asfálticas

Tabla 16.

Porcentajes parciales del agregado a usar

Agregado Grueso	Agregado Fino-Grueso	Agregado Fini-Fino
55	40	5

Ahora bien, es necesario llevar a cabo ajustes en cuanto a los porcentajes obtenidos, como se puede observar a continuación:

Tabla 17.

Ajustes del agregado

	Agregado Grueso	Agregado Fino-Grueso	Agregado fino
Grav. esp. bulk	2.08	3.11	
Masa unitaria suelta (kg/m³) LUW	1186	1342	
Masa unitaria apisonada (kg/m³) RUW	1289	1342	
%LUW	100%		
CUW	1186	1342	
Contribución	1186	578	
Vacíos en el agregado	43.1%		
Peso unitario de la mezcla de agr	1764		
% de cada ag inicial	67.2%	32.8%	
Pasante de PCS	0.0		
Retenido en PCS		0.0	
% de fino en la mezcla de ag grueso	0.0%		
% de grueso en la mezcla de ag fino		0.0%	
% de ag grueso ajustado	67.2%		
% de ag fino ajustado		32.8%	
% contribución de MF	0.0%	0.0%	
% de MF contribución total	0.0%		
% de MF deseado	5.0%		
MF requerido	5.0%		
% de finos ajustado		27.8%	
% finales	67.2%	27.8%	5.0%

Con base a lo anterior, se obtiene los porcentajes finales de cada agregado que se va a utilizar para el diseño de mezclas de asfálticas, así pues, es posible realizar el diseño para cada tamiz, para ello, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Diseño} = & (\% \text{ final agregado grueso} \times \text{agregado grueso pasa}) \\
 & + (\% \text{ final agregado fino} - \text{grueso} \times \text{agregado fino} - \text{grueso}) \\
 & + (\% \text{ final agregado fino} \times \text{agregado fino pasa})
 \end{aligned}$$

Realizando el cálculo correspondiente se obtiene:

Tabla 18.

Diseño y tamiz

Tamiz (mm)	Diseño
1.000	100.0
0.750	100.0
0.500	100.0
0.375	100.0
#4	58.7
#8	32.8
#30	13.0
#80	7.9
#100	5.0
Fond0	0.0

Con el porcentaje de material que pasa a través de los tamices, se lleva a cabo nuevamente el mismo procedimiento que se emplea en el método Marshall. En este proceso, se determina tanto el porcentaje retenido acumulado como el porcentaje retenido parcial. Estos valores son esenciales para calcular dos parámetros fundamentales: el peso parcial y el peso total de los agregados.

- **Porcentaje Retenido Acumulado:** Este valor proporciona información sobre la fracción de agregado que permanece retenida en los tamices, lo que es crucial para comprender la distribución de tamaño de partículas en la muestra.
- **Porcentaje Retenido Parcial:** El porcentaje retenido parcial se obtiene a partir del porcentaje de material retenido acumulado. Este parámetro es fundamental para determinar la cantidad de agregado que se retiene en cada tamiz específico, lo que nos permite clasificar y cuantificar la fracción de material en función de su tamaño.

Utilizando estos resultados, se puede calcular dos cantidades clave:

- **Peso Parcial:** El peso parcial representa la cantidad de agregado que se retiene en cada tamiz particular. Es esencial para comprender cómo se distribuyen las partículas de agregado en función de su tamaño y contribuye a la caracterización de la muestra.
- **Peso Total:** El peso total es la cantidad total de agregado necesaria para la preparación de todas nuestras briquetas u otros elementos específicos. Este valor es esencial para garantizar que tengamos suficiente material para llevar a cabo nuestros procedimientos de manera adecuada y conforme a los requisitos de diseño.

Este enfoque analítico es fundamental en el proceso de evaluación de agregados y su posterior utilización en la construcción, ya que proporciona información detallada sobre la distribución de tamaño de partículas y la cantidad necesaria de material para fines específicos, como la fabricación de briquetas en el caso mencionado.

Tabla 19.

Peso parcial y total

Tamiz (mm)	%pasa	% ret acum	%ret parcial	Peso parcial	Peso Total
1	100.0	0	0	0.0	0
0.75	100.0	0	0	0.0	0
0.5	100.0	0	0	0.0	0
0.375	100.0	0	0	0.0	0
#4	58.7	41	41	474.8	5697.6
#8	32.8	67	26	298.4	3581.3
#30	13.0	87	20	226.8	2722.1
#80	7.9	92	5	58.8	705.7
#100	5.0	95	3	33.6	403.3
Fond0	0.0	100	5	57.5	690.0

2.2.5. Preparación de la muestra

Se establece que la masa total de fabricación de la briketa es de 1200 gramos. De esta cantidad total, se asignan 1150 gramos para los agregados y 50 gramos para el asfalto. Dado que se trabajará con diferentes porcentajes de agregado, es necesario determinar la cantidad de asfalto que corresponde a cada uno de estos porcentajes. Los porcentajes con los que se va a trabajar son los

siguientes: 5%, 5.5%, 6% y 6.5%. La siguiente ilustración presenta la cantidad de asfalto en gramos que se utilizará según el porcentaje correspondiente.

Tabla 20.

Porcentajes repartidos para cada briqueta

Pb	Marshall			
	5.0	5.5	6.0	6.5
Agregados	1150	1150	1150	1150
Asfalto	57.5	63.25	69	74.75
Briqueta	1207.5	1213.25	1219	1224.75

Este enfoque nos permite adaptar la proporción de asfalto en función de los diferentes porcentajes de agregado que utilizaremos en la fabricación de las briquetas. De esta manera, podemos asegurar la consistencia en la preparación de las muestras y cumplir con los requerimientos específicos de diseño en nuestro proceso de ensayo.

Con base a lo anterior, se procede a realizar la elaboración de cilindros de mezclas asfálticas, se realiza el mismo procedimiento previamente descrito en Marshall, obteniendo:

Tabla 21.

Elaboración de cilindros

	Cilindro 5%			Cilindro 5.5%			Cilindro 6%			Cilindro 6.5%		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Altura (mm)	68.4	66.8	74.2	68.7	69	69.2	69.7	69.4	66.7	69	66.6	67.2
Diámetro (mm)	101	101	101.1	101.5	101.6	101.2	101.3	100.8	101.2	100.8	102	101.3
Peso (gr) MA	1165	1133	1197	1153	1146	1188	1219	1151	1165	1209	1128	1166
Peso sumergido (gr)	628	601	643	615	610	650	672	616	625	658	609	630
Peso superficialmente seco	1166	1134	1099	1155	1147	1190	1223	1153	1169	1212	1130	1168

2.2.6. Densidad Bulk y gravedad específica

De igual manera, se procede a calcular la densidad bulk, obteniendo:

Tabla 22.

Densidad Bulk

	Cilindro 5%		Cilindro 5.5%		Cilindro 6%		Cilindro 6.5%					
Densidad BULK	2.164	2.125	2.154	2.137	2.136	2.203	2.213	2.146	2.140	2.180	2.165	2.167

Ahora bien, después de obtener las cargas con sus respectivas deflexiones, es de vital importancia obtener la gravedad específica para ello, se hará uso de la ecuación 6 .

$$G = 2.263$$

2.3. Ensayo deflexión por método convencional y Bailey

Por último, se lleva las briquetas a baño maría a una temperatura de 60 °C durante 40 minutos, para llevarlas a la máquina de compresión, la cual, dará como resultado la gráfica carga (KN) vs deflexión axial (mm).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por el método Marshall (convencional) y método Bailey en las siguientes graficas.

- **Asfalto al 5%**

Figura 2.

Asfalto al 5%- briquetas #1

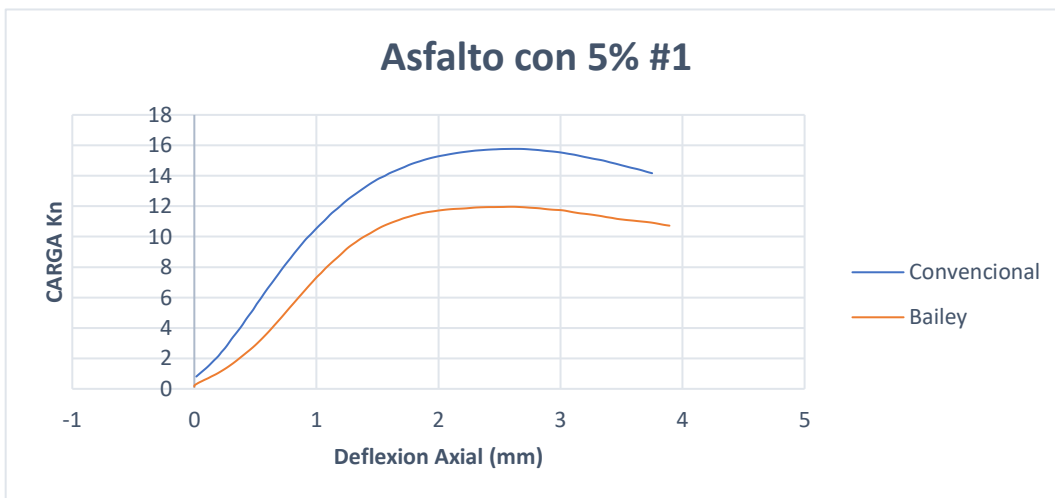
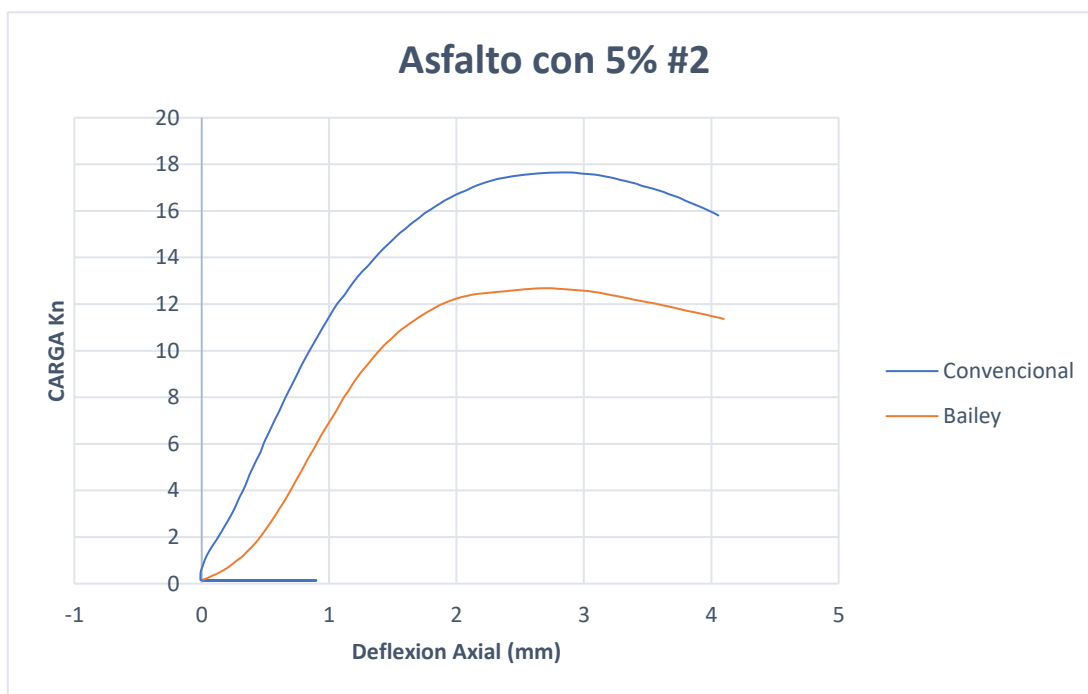


Figura 3.

Asfalto al 5%- briquetas #2



En las gráficas anteriores de carga vs deflexión, se obtuvo una deformación axial con una carga que varía entre los 16 KN y los 18 KN, en el método convencional y en el método de Bailey varia de 12 Kn a 14 Kn, cabe recalcar que se ensayaron tres briquetas para cada método pero en este caso solo se tomó dos porque la otra briqueta presento un error a la hora de fallarla; además teniendo en cuenta la norma INVIAS, se puede determinar que la mezcla asfáltica puede soportar cargas sin deformarse excesivamente y tiene una deflexión axial dentro de los límites establecidos encontrarse dentro del rango de 2 a 4 mm en los 2 métodos, por lo que se considerada adecuada para su uso en la construcción de pavimentos.

- **Asfalto al 5.5%**

Figura 4.

Asfalto al 5.5%- briquetas #1

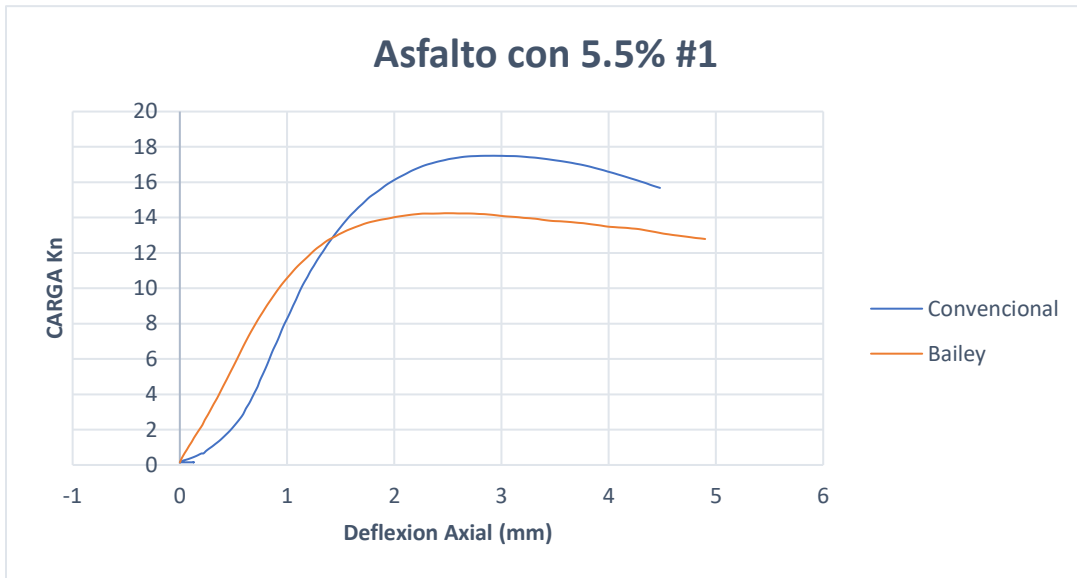


Figura 5.

Asfalto al 5.5%- briquetas #2

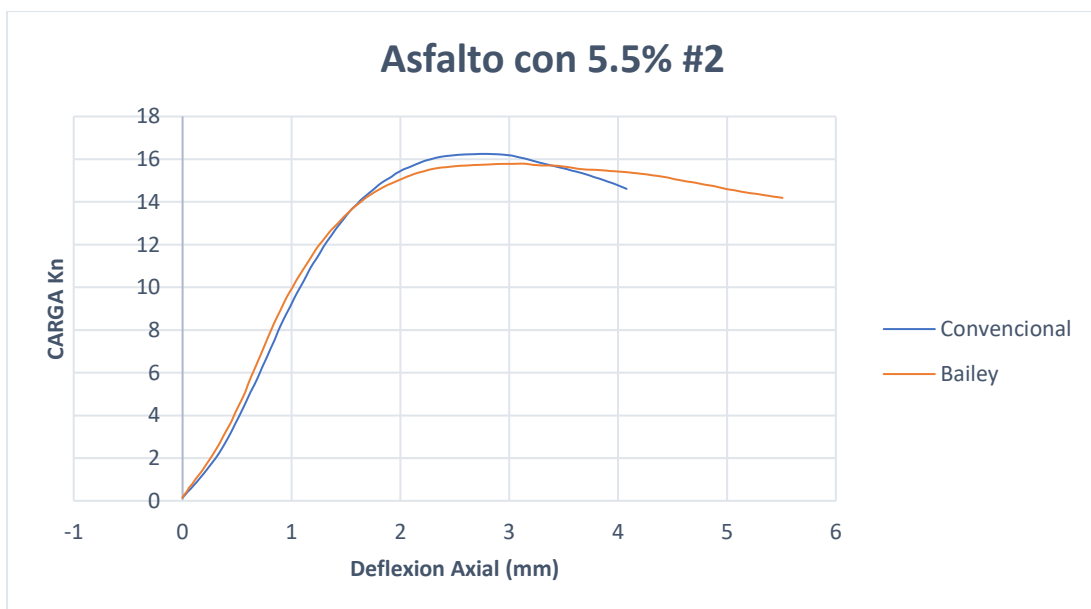
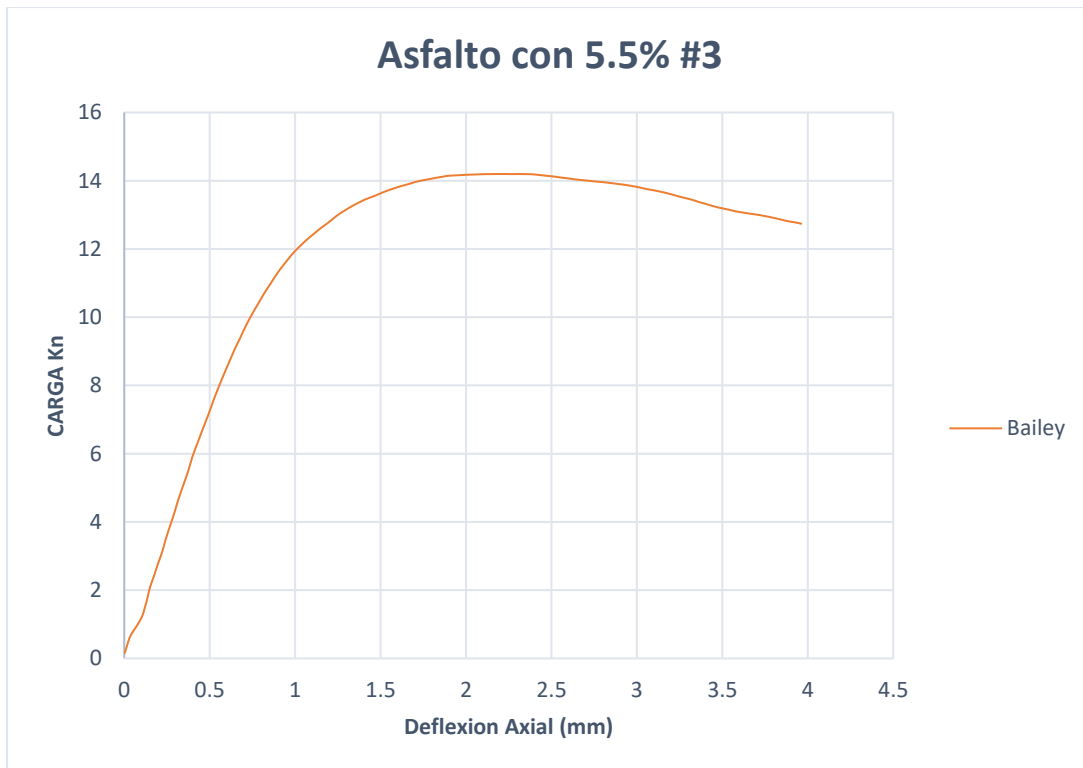


Figura 6.

Asfalto al 5.5%- briqueta #3



En las gráficas anteriores de carga vs deflexión, se obtuvo una deformación axial con una carga que varía entre los 16 KN y los 18 KN, en el método convencional y en el método de Bailey varia de 14 KN y 16 KN , cabe recalcar que se ensayaron tres briquetas para cada método pero en este caso para el método convencional solo se tomó dos, esto porque la otra briqueta presento un error a la hora de fallarla; además teniendo en cuenta la norma INVIAS, se puede determinar que la mezcla asfáltica puede soportar cargas sin deformarse excesivamente y tiene una deflexión axial dentro de los límites establecidos encontrándose dentro del rango de 2 a 4 mm en los 2 métodos, por lo que se considerada adecuada para su uso en la construcción de pavimentos.

- **Asfalto al 6%**

Figura 7.

Asfalto al 6%- briquetas #1

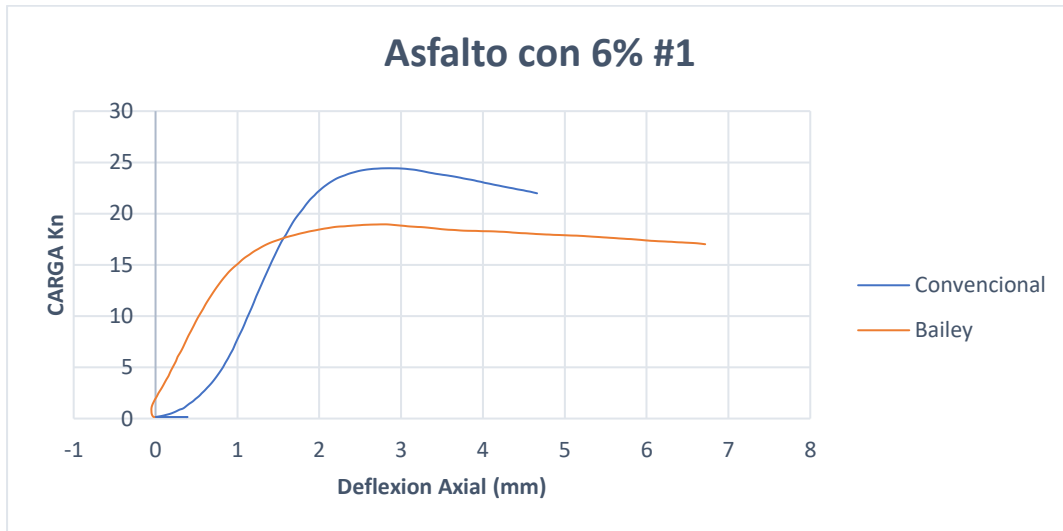


Figura 8.

Asfalto al 6% - briquetas#2

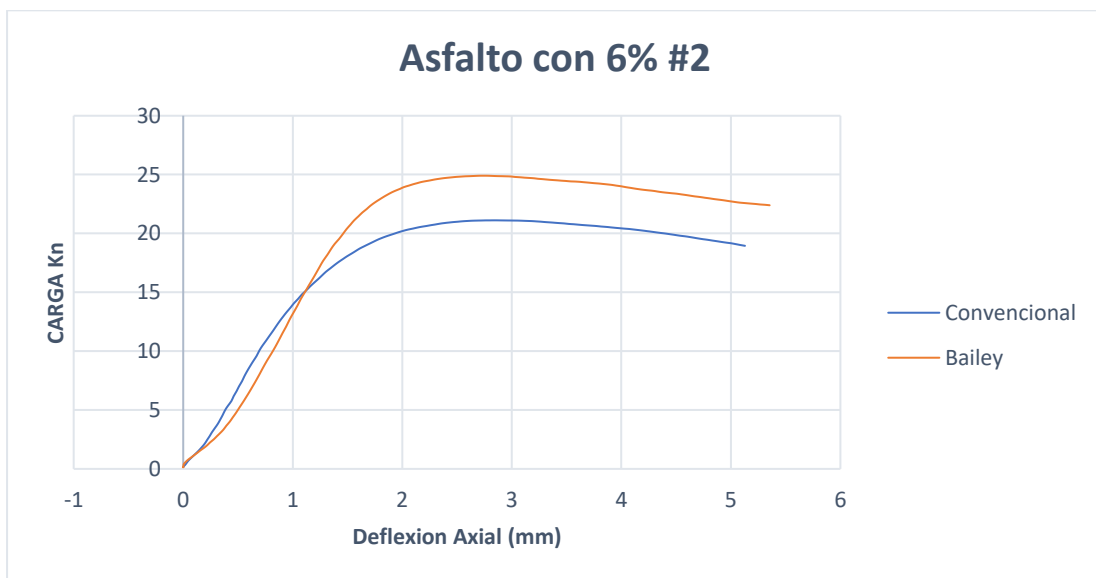
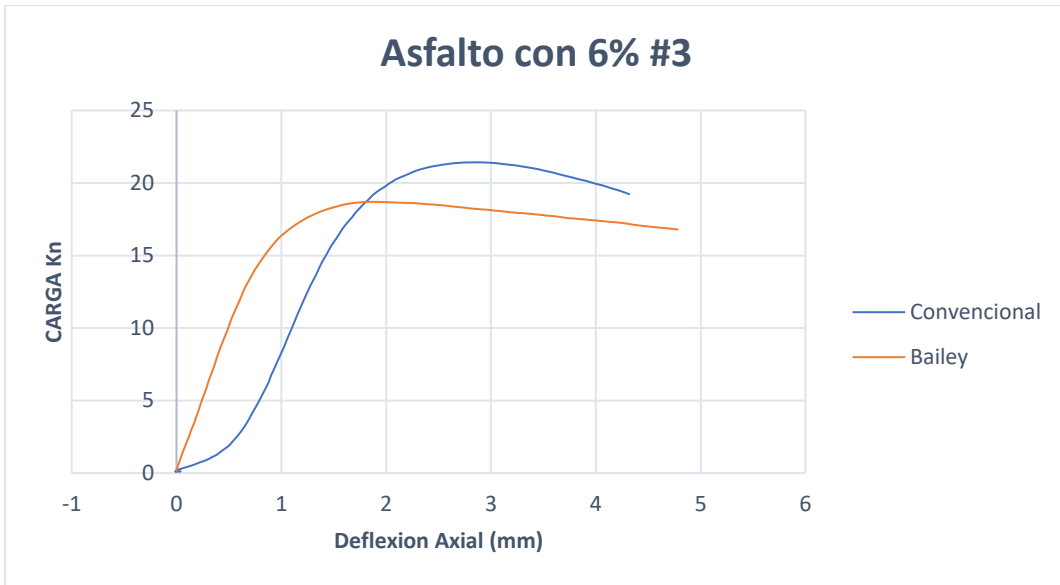


Figura 9.

Asfalto al 6% - briquetas #3



Para este caso, se obtuvo una deformación axial con una carga que varía entre los 20 KN y 25 KN, en el método convencional y en el método de Bailey varia de 18 KN y 25 KN, además teniendo en cuenta la norma INVIAS, se puede determinar que la mezcla asfáltica puede soportar cargas sin deformarse excesivamente y tiene una deflexión axial dentro de los límites establecidos encontrándose dentro del rango de 2 a 4 mm en los 2 métodos, por lo que se considerada adecuada para su uso en la construcción de pavimentos.

- **Asfalto al 6.5%**

Figura 10.

Asfalto al 6.5%- briqueta #1

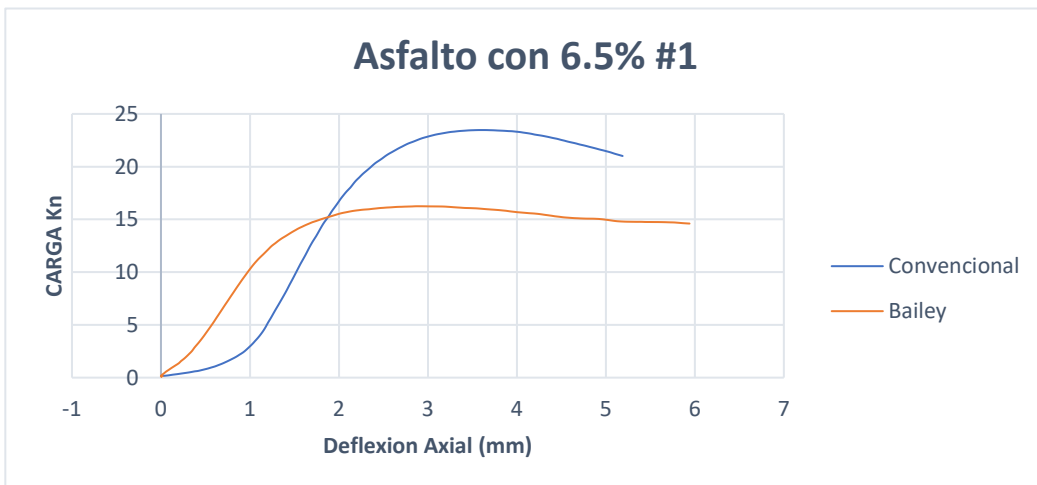


Figura 11.

Asfalto al 6.5%- briqueta #2

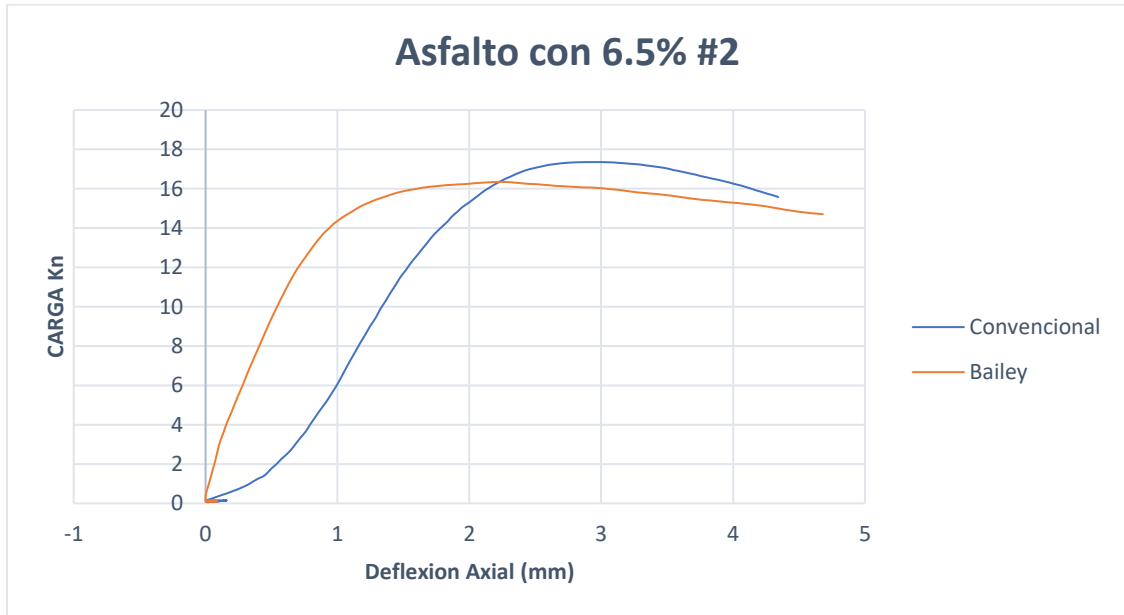
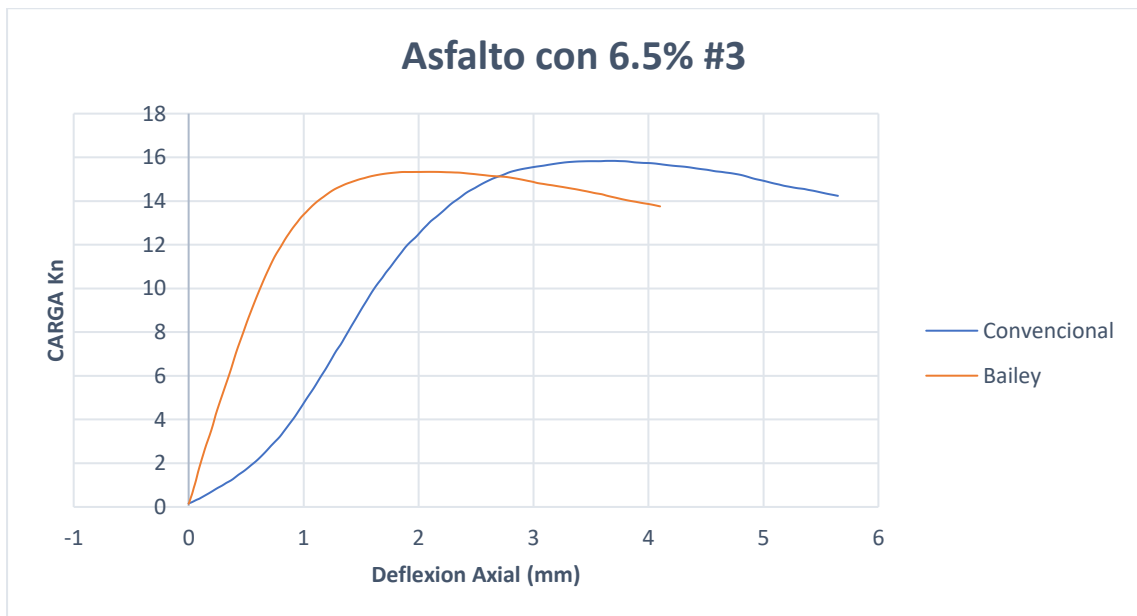


Figura 12.

Asfalto al 6.5%- briqueta #3



Las briquetas ensayadas presentan una carga entre 16 KN y 25 KN, en el método convencional y en el método Bailey cargas entre 15 KN Y 17 KN, además su deflexión se encuentra entre los límites establecidos por la normatividad.

2.4. Porcentaje óptimo

Así pues, para obtener el porcentaje óptimo de los ensayos, es necesario realizar diferentes ensayos, como son:

- Densidad vs. Contenido de asfalto.
- Volumen de vacíos vs. Contenido de asfalto.
- Estabilidad vs. Contenido de asfalto.
- Flujo vs. Contenido de asfalto.
- Vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto.
- Vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto.

2.4.1. Densidad vs. Contenido de asfalto.

Se grafican las densidades encontradas anteriormente por cada método

- **Método convencional**

Tabla 23.

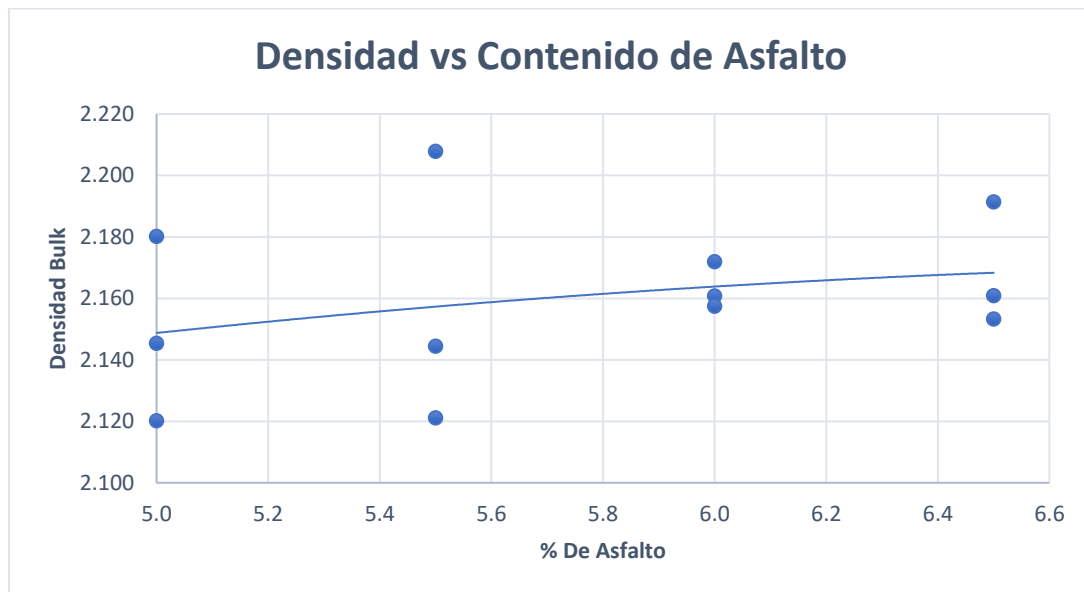
Datos de densidad vs contenido de asfalto- método convencional

Muestra N. °	% Asfalto Inicial	Densidad Bulk
1	5.0	2.120
2	5.0	2.145
3	5.0	2.180
1	5.5	2.144

2	5.5	2.121
3	5.5	2.208
1	6.0	2.161
2	6.0	2.157
3	6.0	2.172
1	6.5	2.153
2	6.5	2.191
3	6.5	2.161

Figura 13.

Densidad vs contenido de asfalto- Método convencional



• **Método Bailey**

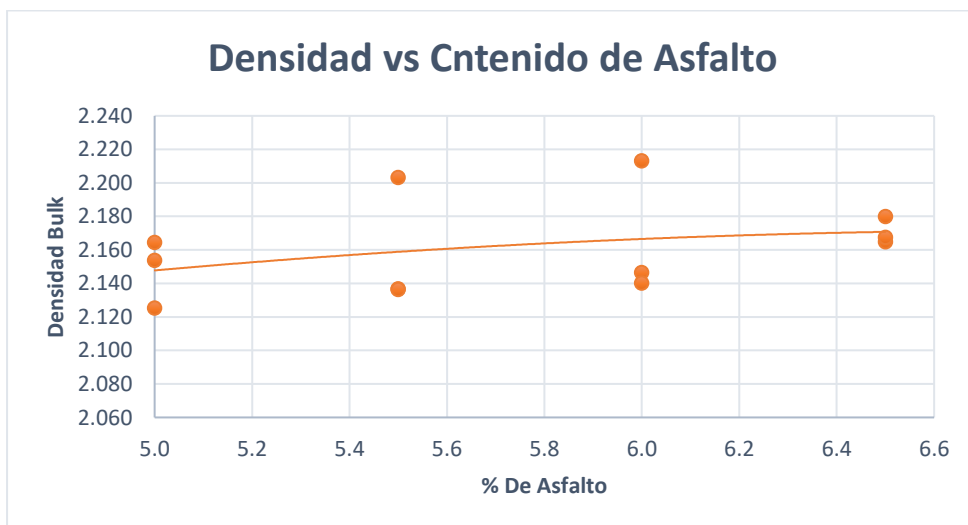
Tabla 24.

Datos de densidad vs contenido de asfalto- método Bailey

Muestra N. °	% Asfalto Inicial	Densidad Bulk
1	5.0	2.164
2	5.0	2.125
3	5.0	2.154
1	5.5	2.137
2	5.5	2.136
3	5.5	2.203
1	6.0	2.213
2	6.0	2.146
3	6.0	2.140
1	6.5	2.180
2	6.5	2.165
3	6.5	2.167

Figura 14.

Densidad vs contenido de asfalto - Método Bailey



La densidad de la mezcla asfáltica es un factor crítico para asegurar la integridad y durabilidad del pavimento. La representación gráfica de la densidad en función del contenido de asfalto permitirá identificar la densidad óptima necesaria para el rendimiento deseado.

2.4.2. Volumen de vacíos vs. Contenido de asfalto.

Para ello se empleará la siguiente ecuación

$$VA = 100 \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right)$$

Ecuación 22. Contenido de vacíos

En donde:

- VA: Contenido de vacíos, % volumen.
- Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla compactada.
- Gmm: Gravedad específica máxima teórica de la mezcla suelta.

Obteniendo las siguiente gráficas y resultados

- **Método convencional**

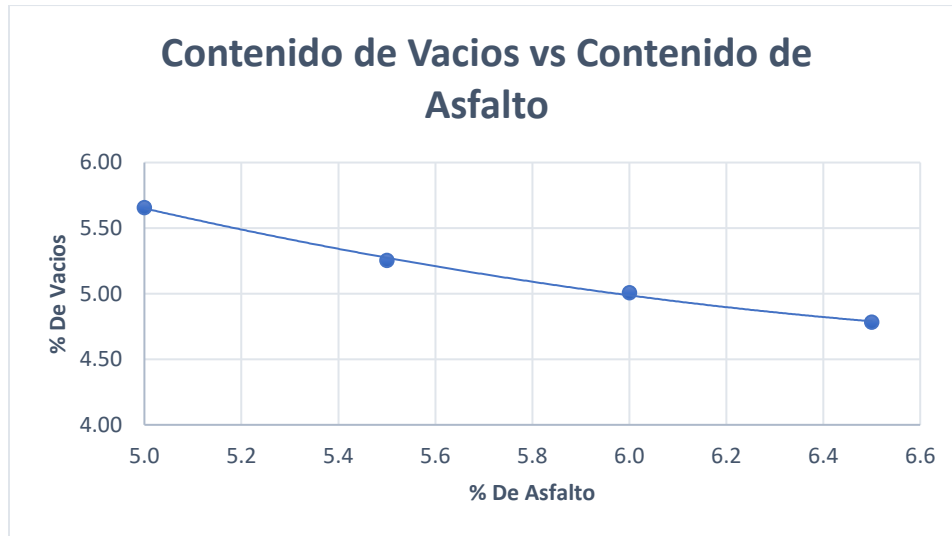
Tabla 25.

Datos de contenidos de vacíos vs contenido de asfalto- método convencional

% Asfalto Inicial	% VA
5	5.66
5.5	5.25
6	5.01
6.5	4.78

Figura 15.

Contenido de vacíos vs contenido de asfalto- método convencional



- **Método Bailey**

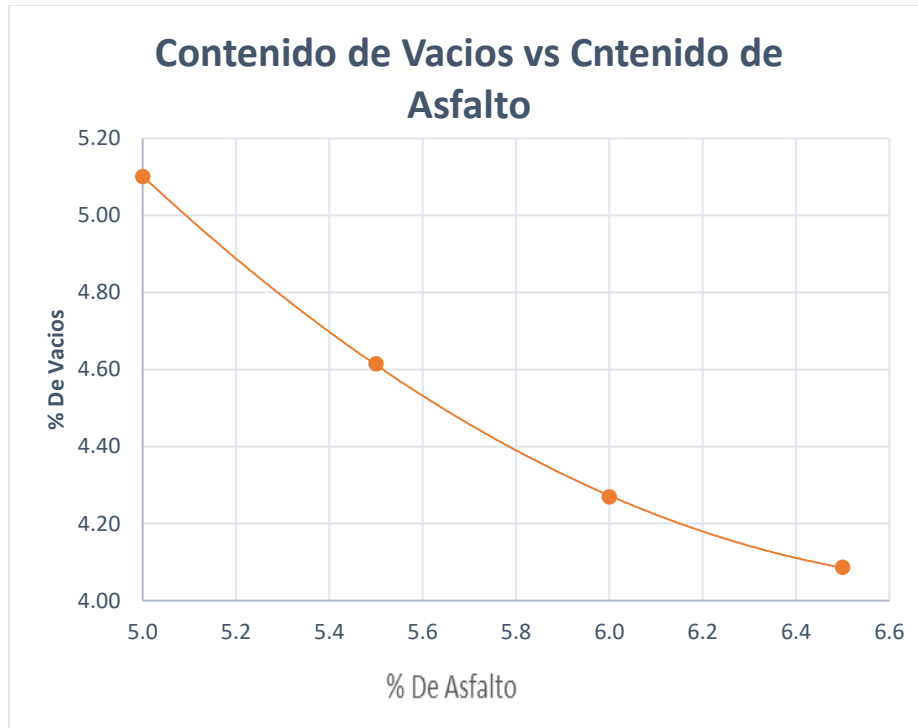
Tabla 26.

Datos contenidos de vacíos vs contenido de asfalto- método Bailey

% Asfalto Inicial	% VA
5	5.10
5.5	4.61
6	4.27
6.5	4.09

Figura 16.

Contenido de vacíos vs contenido de asfalto- método Bailey



Los vacíos en una mezcla asfáltica son esenciales para la adecuada distribución de cargas y la resistencia a la fatiga. La relación entre el volumen de vacíos y el contenido de asfalto proporciona información valiosa para el diseño de pavimentos resistentes.

2.4.3. Estabilidad vs. Contenido de asfalto

Para esto se utiliza los datos de las cargas máximas de cada briqueta, estos se deben corregir la estabilidad según altura de espécimen como lo especifica la norma (INV E-748)

• **Método convencional**

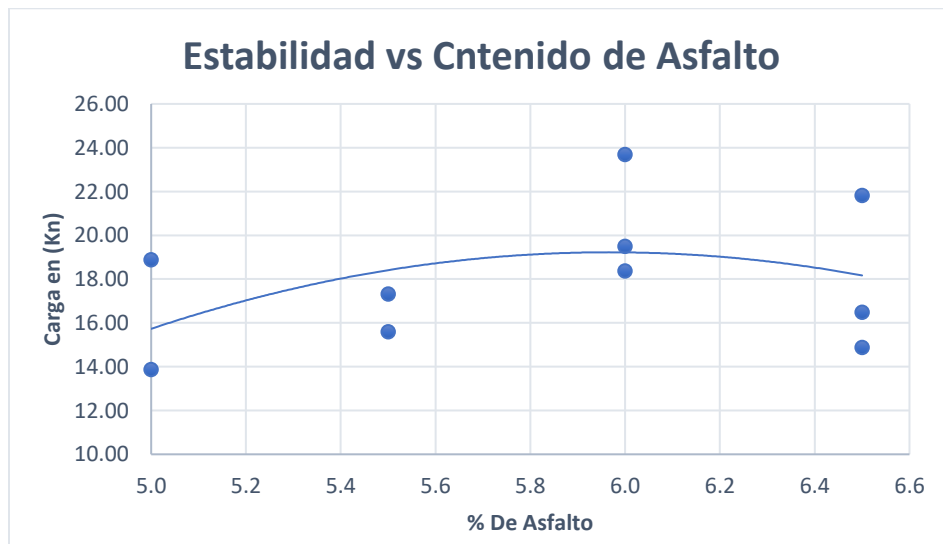
Tabla 27.

Datos estabilidad vs contenido de asfalto- método convencional

Muestra N. °	% Asfalto Inicial	Carga (Kn)	Carga (Kn) Corregida
1	5.0	15.77	13.87
2	5.0	17.65	18.89
3	5.0	-	-
1	5.5	17.50	17.32
2	5.5	16.25	15.60
3	5.5	-	-
1	6.0	24.43	23.70
2	6.0	21.11	18.37
3	6.0	21.42	19.49
1	6.5	23.47	21.83
2	6.5	17.35	16.49
3	6.5	15.84	14.89

Figura 17.

Estabilidad vs contenido de asfalto- método convencional



• **Método Bailey**

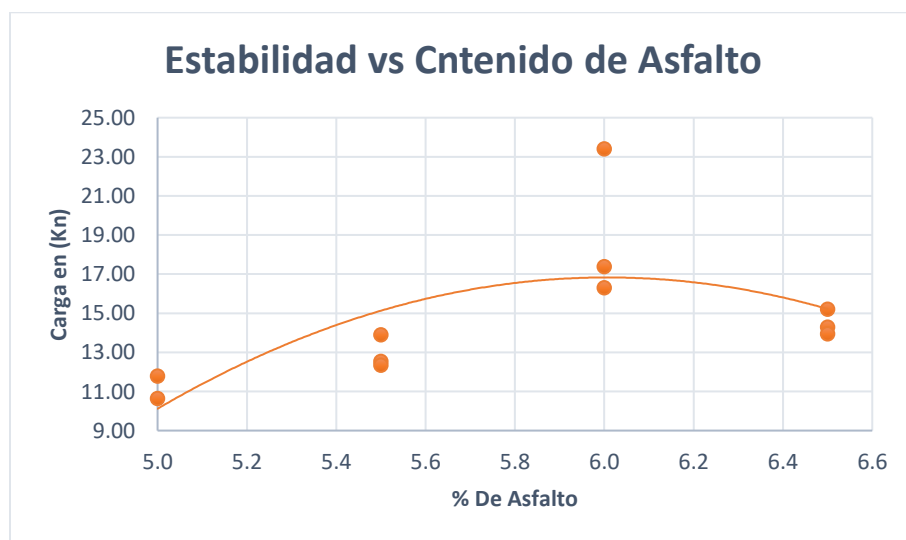
Tabla 28.

Datos estabilidad vs contenido de asfalto- método Bailey

Muestra N. °	% Asfalto Inicial	Carga (Kn)	Carga (Kn) Corregida
1	5.0	11.96	10.65
2	5.0	12.68	11.79
3	5.0		
1	5.5	14.25	12.54
2	5.5	15.79	13.90
3	5.5	14.20	12.35
1	6.0	18.95	16.30
2	6.0	24.90	23.41
3	6.0	18.70	17.39
1	6.5	16.25	14.30
2	6.5	16.35	15.20
3	6.5	15.34	13.95

Figura 18.

Estabilidad vs contenido de asfalto- método Bailey



La estabilidad de la mezcla es un indicador clave de su capacidad para soportar cargas. La representación gráfica de la estabilidad en relación con el contenido de asfalto ayudará a determinar el equilibrio óptimo entre resistencia y flexibilidad.

2.4.4. Flujo vs. Contenido de asfalto

Para ello se utiliza los datos de deflexión en el punto donde alcanzo su carga máxima, para nuestro ensayo se obtuvo los siguientes resultados

- **Método convencional**

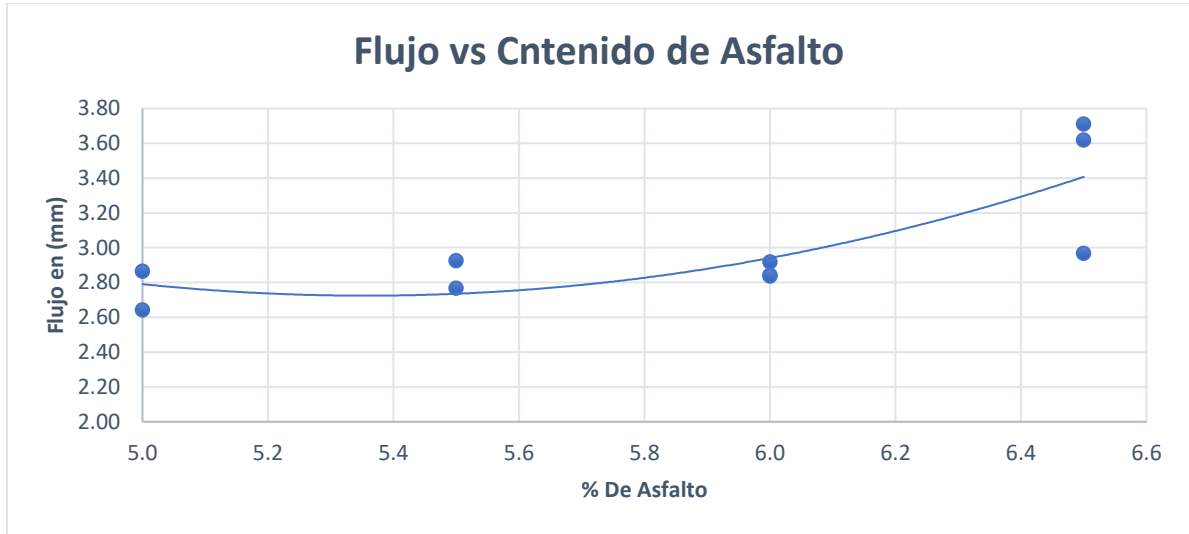
Tabla 29.

Datos flujo vs Contenido de asfalto – Método convencional

Muestra N. °	% Asfalto Inicial	Flujo (mm)
1	5.0	2.64
2	5.0	2.87
3	5.0	
1	5.5	2.93
2	5.5	2.77
3	5.5	
1	6.0	2.92
2	6.0	2.84
3	6.0	2.84
1	6.5	3.62
2	6.5	2.97
3	6.5	3.71

Figura 19.

Flujo vs Contenido de asfalto – Método convencional



- **Método Bailey**

Tabla 30.

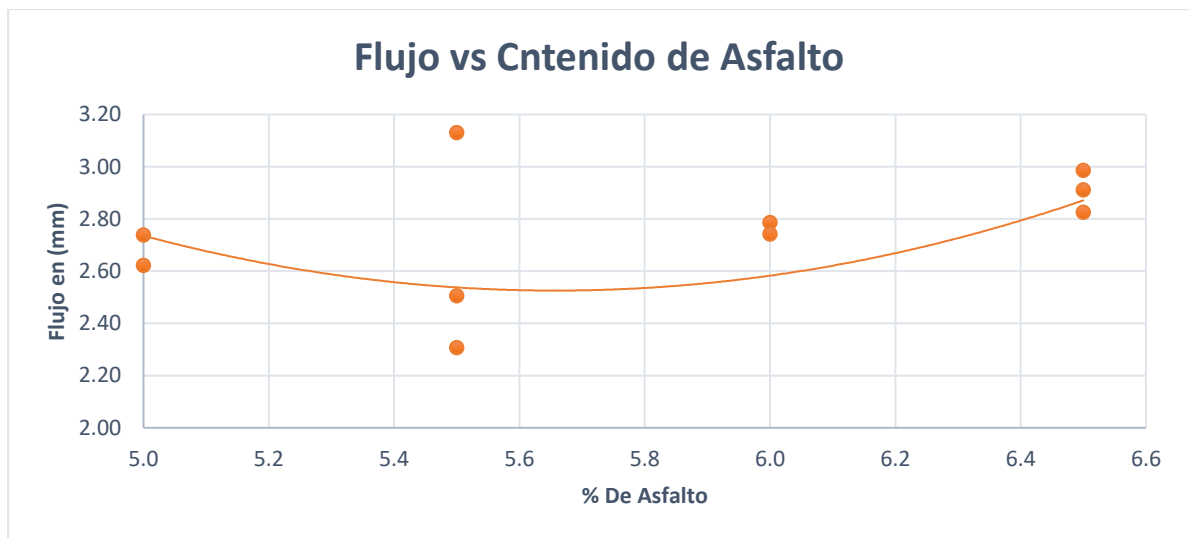
Datos flujo vs Contenido de asfalto – Método Bailey

Muestra N. °	% Asfalto Inicial	Flujo (mm)
1	5.0	2.62
2	5.0	2.74
3	5.0	
1	5.5	2.51
2	5.5	3.13
3	5.5	2.31
1	6.0	2.79
2	6.0	2.74

3	6.0	1.89
1	6.5	2.91
2	6.5	2.99
3	6.5	2.83

Figura 20.

Flujo vs Contenido de asfalto – Método Bailey



El flujo de la mezcla asfáltica está relacionado con su trabajabilidad durante la construcción. Analizar la relación entre el flujo y el contenido de asfalto permitirá optimizar la colocación y compactación en el sitio.

2.4.5. Vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto

Para esto se utilizarán las siguientes formulas;

$$Pb = 100 \left(\frac{M_b}{M_s + M_b} \right)$$

Ecuación 23. Contenido de Asfalto % en peso

- Pb: Contenido de CA total, % en peso de la mezcla.
- Mb: Masa del CA en la mezcla.
- Ms: Masa del pétreo en la mezcla.

$$VB = \frac{Pb * G_{mb}}{G_b}$$

Ecuación 24. Contenido de Asfalto % en volumen

- VB: Contenido de CA total, % en volumen de la mezcla.
- Pb: Contenido de CA total, % en peso de la mezcla.
- Gmb: Gravedad específica Bulk de la mezcla.
- Gb: Gravedad específica del CA.

$$VBA = G_{mb} \left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{sb}} + \frac{100}{G_{mm}} \right)$$

Ecuación 25. CA absorbido

- VBA: Contenido de CA absorbido, % en volumen de la mezcla.
- Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla.
- Pb: Contenido de CA total, % en peso de la mezcla.
- Gb: Gravedad específica del CA.
- Ps: Contenido de agregado total, % en peso de la mezcla (100-Pb).
- Gsb: Gravedad específica bulk promedio de la combinación de agregados.
- Gmm: Gravedad específica máxima teórica de la mezcla.

$$VBE = VB - VBA$$

Ecuación 26. Contenido de CA efectivo en % de volumen

- VBE: Contenido de CA efectivo, % en volumen de la mezcla.
- VBA: Contenido de CA absorbido, % en volumen de la mezcla.
- VB: Contenido de CA total, % en volumen de la mezcla.

$$P_{be} = P_b \left(\frac{VBE}{VB} \right)$$

Ecuación 27. Contenido de CA efectivo en % de peso

$$P_{ba} = P_b - P_{be}$$

Ecuación 28. Contenido de CA absorbido en % de peso

- Pbe: Contenido de CA efectivo, % en peso de la mezcla.
- Pb: Contenido de CA total, % en peso de la mezcla.
- VBE: Contenido de CA efectivo, % en volumen de la mezcla.
- VB: Contenido de CA total, % en volumen de la mezcla.
- Pba: Contenido de CA absorbido, % en peso de la mezcla.

$$VMA = VA + VBE$$

Ecuación 29. Vacíos en el agregado mineral

- VMA: Vacíos en el Agregado Mineral
- VBE: Contenido de CA efectivo, % en volumen de la mezcla.
- VA: Contenido de vacíos, % en volumen de la mezcla.

Obteniendo los siguientes resultados:

- **Método convencional**

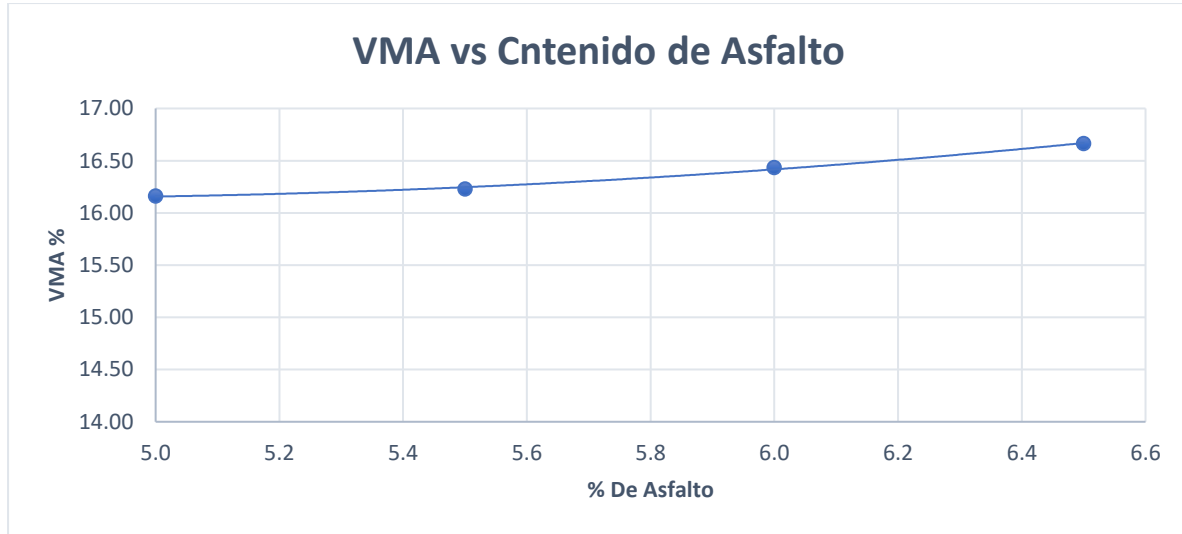
Tabla 31.

Datos de vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto- Método convencional

% Asfalto Inicial	Contenido de CA en %, Pb	Contenido de Asfalto total en %, VB	Contenido de Asfalto absorbido VBA, en volumen de la mezcla	Contenido de CA efectivo (VBE), en volumen de la mezcla	VMA
5.0	4.79	11.19	0.69	10.51	16.16
5.5	5.27	12.36	1.39	10.97	16.23
6.0	5.75	13.52	2.09	11.43	16.44
6.5	6.23	14.68	2.80	11.88	16.66

Figura 21.

Vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto- Método convencional



- **Método Bailey**

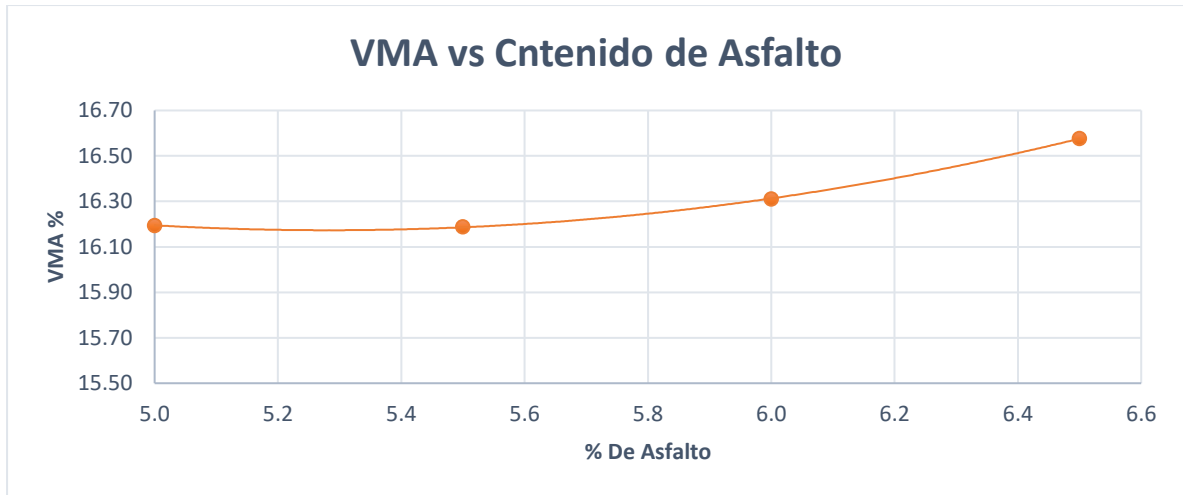
Tabla 32.

Datos de vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto- Método Bailey

% Asfalto Inicial	Contenido de CA en %, Pb	Contenido de Asfalto total en %, VB	Contenido de Asfalto absorbido VBA, en volumen de la mezcla	Contenido de CA efectivo (VBE), en volumen de la mezcla	VMA
5.0	4.79	11.19	0.09	11.09	16.19
5.5	5.27	12.37	0.79	11.57	16.19
6.0	5.75	13.54	1.50	12.04	16.31
6.5	6.23	14.70	2.21	12.49	16.58

Figura 22.

vacíos en el agregado mineral vs. Contenido de asfalto- Método Bailey



Comprender cómo varían los vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto es esencial para el diseño de mezclas que maximicen la interacción entre los componentes.

2.4.6. Vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto.

Para esto usaremos la siguiente ecuación

$$VFA = 100 \left(\frac{VBE}{VMA} \right)$$

Ecuación 30. Vacíos llenos de asfalto

Donde:

- VFA: Vacíos llenos de Asfalto
- VBE: Contenido de CA efectivo, % en volumen de la mezcla.
- VMA: Vacíos en el Agregado Mineral

Obteniendo los siguientes resultados

- **Método convencional**

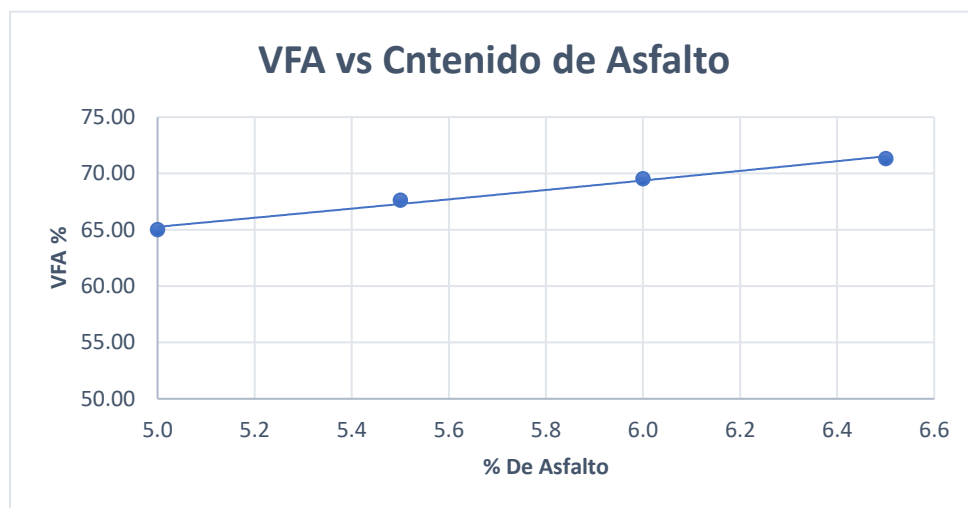
Tabla 33.

Datos Vacíos Llenos de Asfalto vs. Contenido de asfalto- método convencional

% Asfalto Inicial	VFA
5.0	65.00
5.5	67.63
6.0	69.53
6.5	71.30

Figura 23.

Vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto - método convencional



- **Método Bailey**

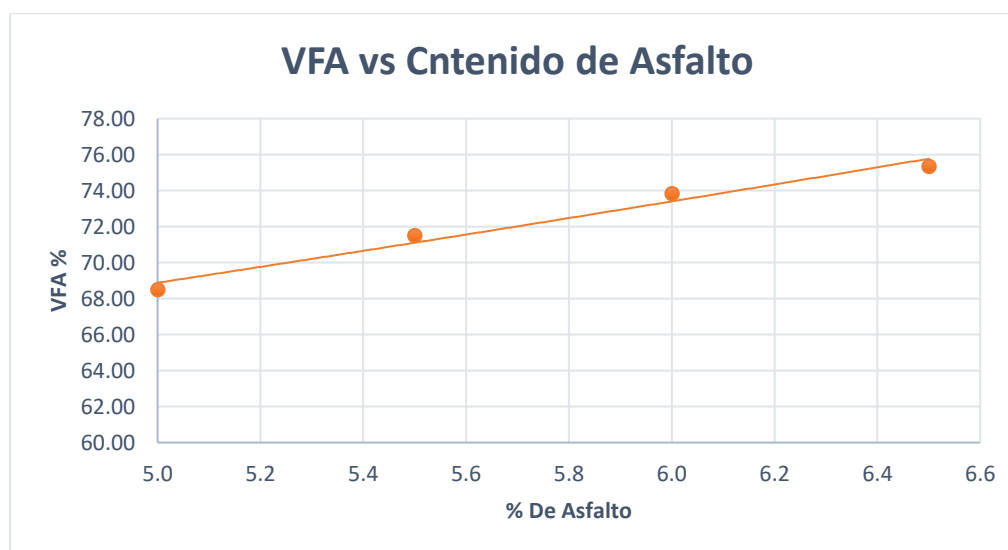
Tabla 34.

Datos vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto- método Bailey

% Asfalto Inicial	VFA
5.0	68.5
5.5	71.49
6.0	73.82
6.5	75.35

Figura 24.

Vacíos llenos de asfalto vs. Contenido de asfalto- método Bailey



La cantidad de vacíos llenos de asfalto afecta la impermeabilidad y la resistencia al envejecimiento de la mezcla. La representación gráfica de esta relación proporcionará información valiosa sobre la durabilidad de la mezcla.

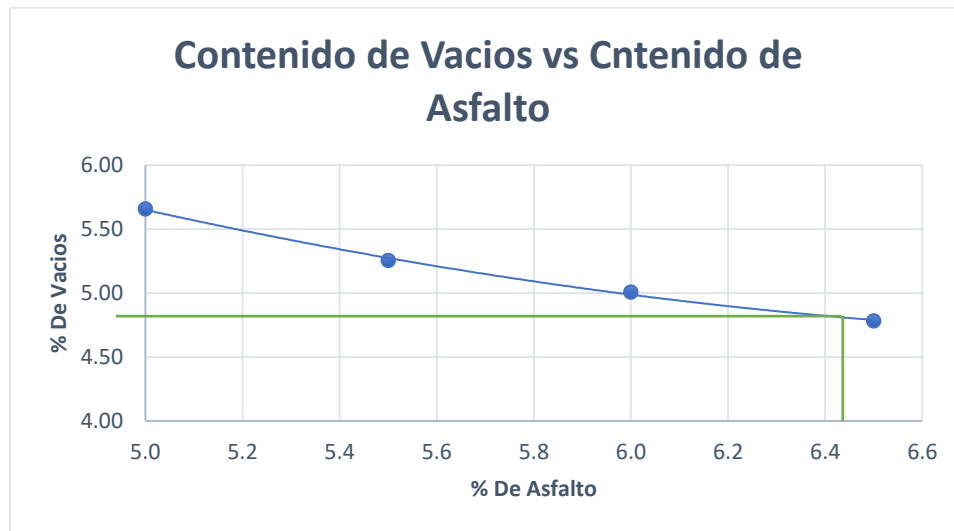
2.4.1. Contenido de asfalto óptimo

Finalmente se encontrará el Contenido de Asfalto óptimo, para esto se debe cumplir los parámetros de la norma.

2.4.1.1. Contenido de asfalto medio. En primer lugar, se determina el contenido de asfalto medio en el rango que exige la especificación (4 % - 6 %), con la gráfica de VA vs Contenido de CA, donde para la investigación, se evaluó para el método convencional 4,8 y para el método Bailey 5.1, obteniendo lo siguiente.

Figura 25.

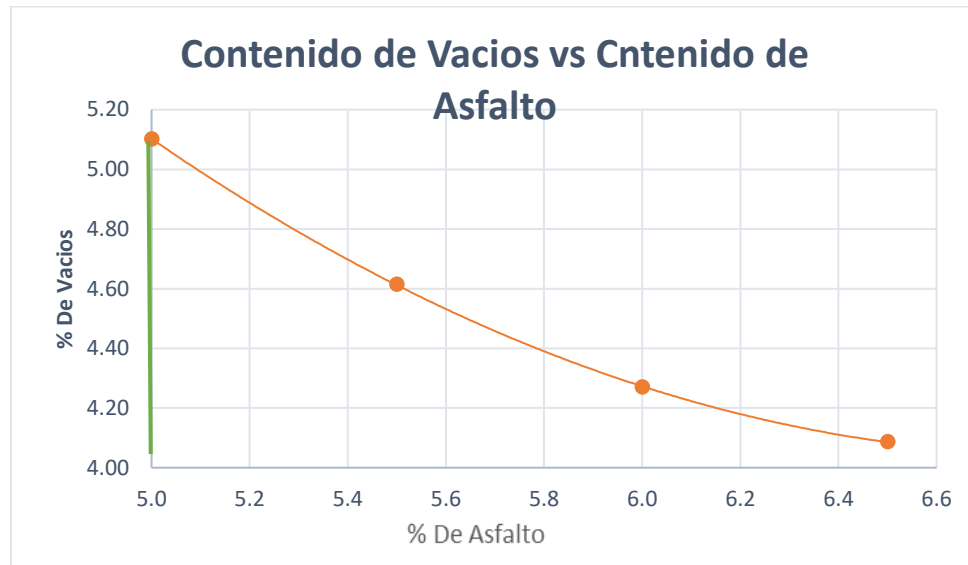
Contenido de vacíos vs contenido de asfalto – método convencional



Teniendo en cuenta la gráfica, es posible afirmar que para el método convencional se evaluara en un 6.5% de Asfalto.

Figura 26.

Contenido de vacíos vs contenido de asfalto- método Bailey

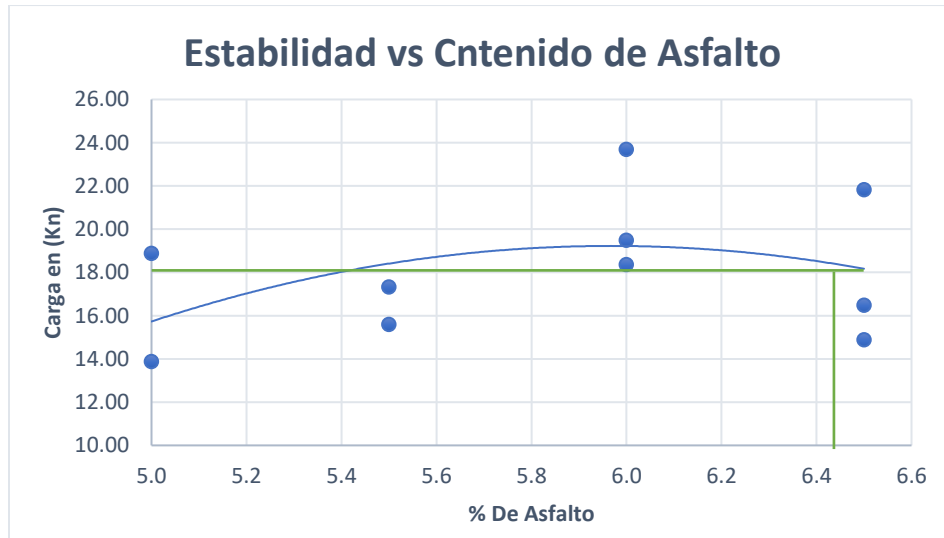


Teniendo en cuenta la gráfica, es posible afirmar que para el método Bailey se evaluara en un 5% de Asfalto

2.4.1.2. Estabilidad mínima. Se procede a encontrar la estabilidad mínima, para ello, es necesario tener en cuenta los parámetros expuestos en el Capítulo 4 a seguir los parámetros del Capítulo 4 de Invias, en donde para la Estabilidad mínima en categoría de tránsito NT3 debe ser de 9 KN, para ello, se obtiene:

Figura 27.

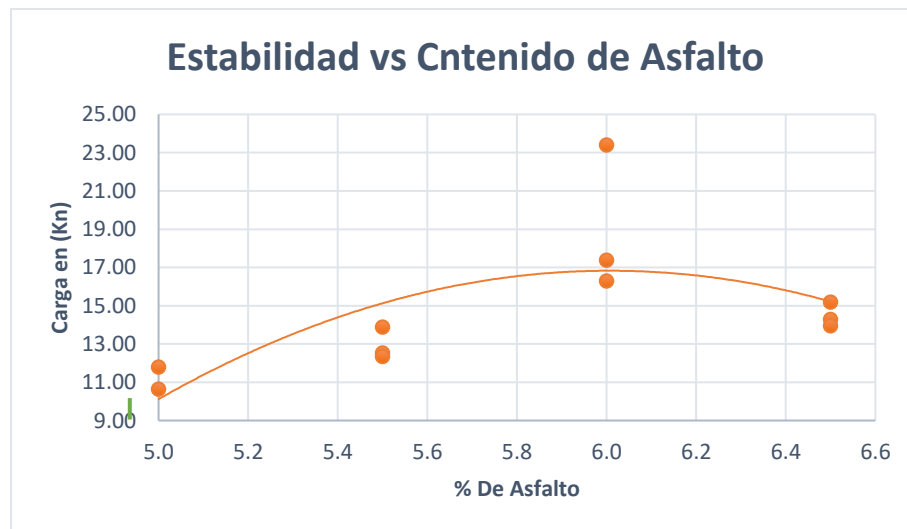
Estabilidad vs contenido de asfalto – Método convencional



Por el método convencional con el porcentaje de 6.5% se tiene una estabilidad de 18 KN cumpliendo con el mínimo.

Figura 28.

Estabilidad vs contenido de asfalto- método Bailey

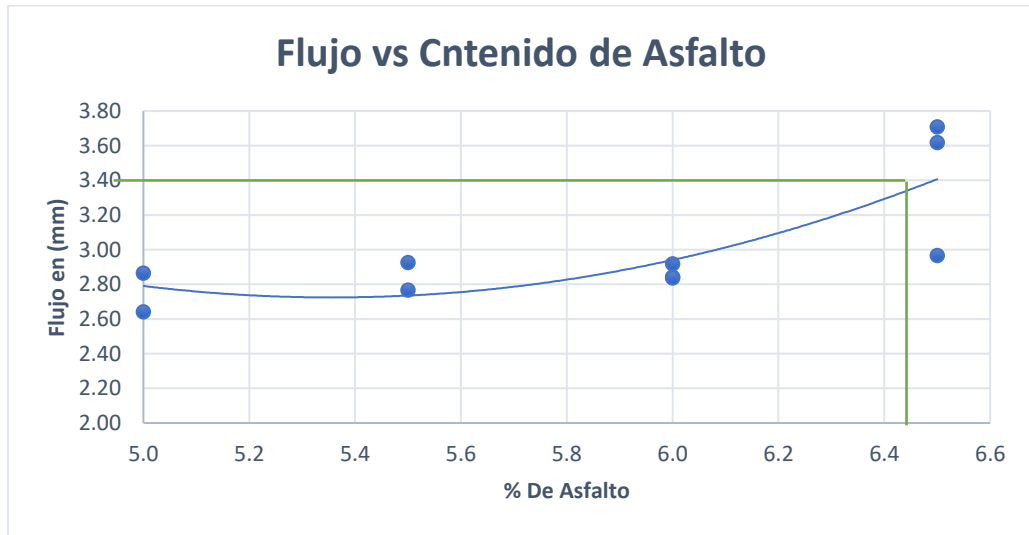


Por el método Bailey con el porcentaje de 5% se tiene una estabilidad de 10 KN aproximadamente cumpliendo con el mínimo.

2.4.1.3. Flujo. Para el flujo es importante cumplir con el rango de la NT3 el cual es de 2.0 mm a 3.5 mm, realizando las gráficas respectivas, se obtiene:

Figura 29.

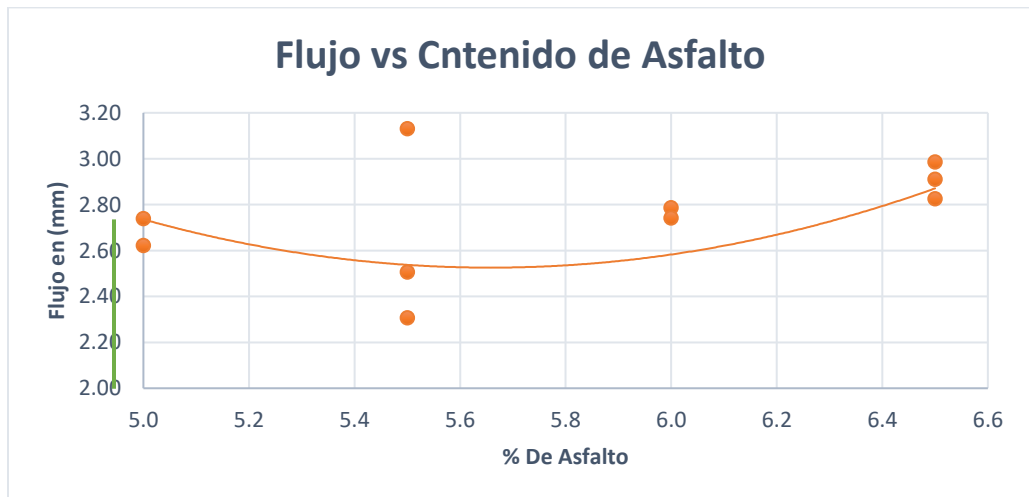
Flujo vs contenido de asfalto – Método convencional



Para el método convencional se obtiene un flujo de 3.4 mm, el cual está en el rango establecido.

Figura 30.

Flujo vs contenido de asfalto – Método Bailey



Para el método convencional se obtiene un flujo de 2.7 mm, el cual está en el rango establecido.

2.4.1.4. Relación Estabilidad/Flujo. En este paso se evalúa la relación de Estabilidad/Flujo en donde el resultado debe estar en un rango de 3.0 a 6.0 KN/mm

- Método convencional

$$\frac{\textit{Estabilidad}}{\textit{Flujo}} = \frac{18}{3.4} \textit{ KN/mm}$$

$$\frac{\textit{Estabilidad}}{\textit{Flujo}} = 5.29 \textit{ KN/mm}$$

El método convencional cumple con el rango establecido

- Método Bailey

$$\frac{\textit{Estabilidad}}{\textit{Flujo}} = \frac{10}{2.72} \textit{ KN/mm}$$

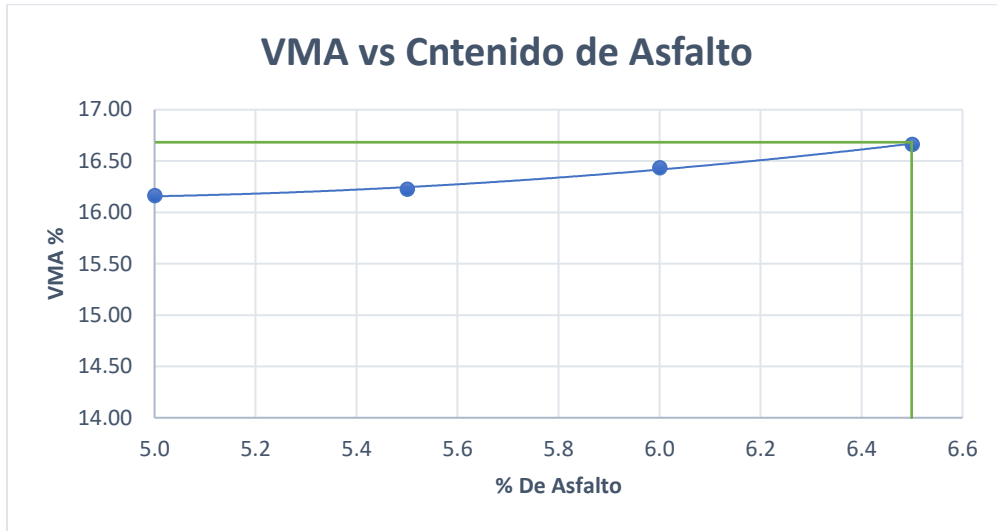
$$\frac{\textit{Estabilidad}}{\textit{Flujo}} = 3.68 \textit{ KN/mm}$$

El método Bailey también cumple con el rango establecido.

2.4.1.5. Vacíos en los agregados minerales. Para los vacíos en el agregado mineral se debe tener en cuenta el tamaño del agregado seleccionado, así pues, al trabajar con el agregado de MDC- 10, T. Max 10mm, también debe cumplir con el parámetro de NT3 el cual debe ser mayor a 16%.

Figura 31.

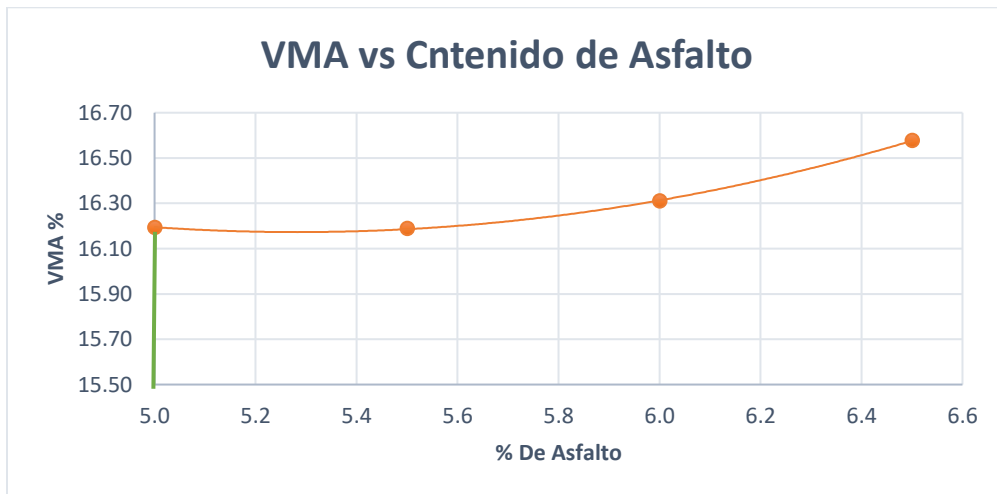
VMA vs contenido de asfalto- Método convencional



Por método convencional se tiene como resultado un % de 16.66, cumpliendo con el parámetro mínimo.

Figura 32.

VMA vs contenido de asfalto- Método Bailey

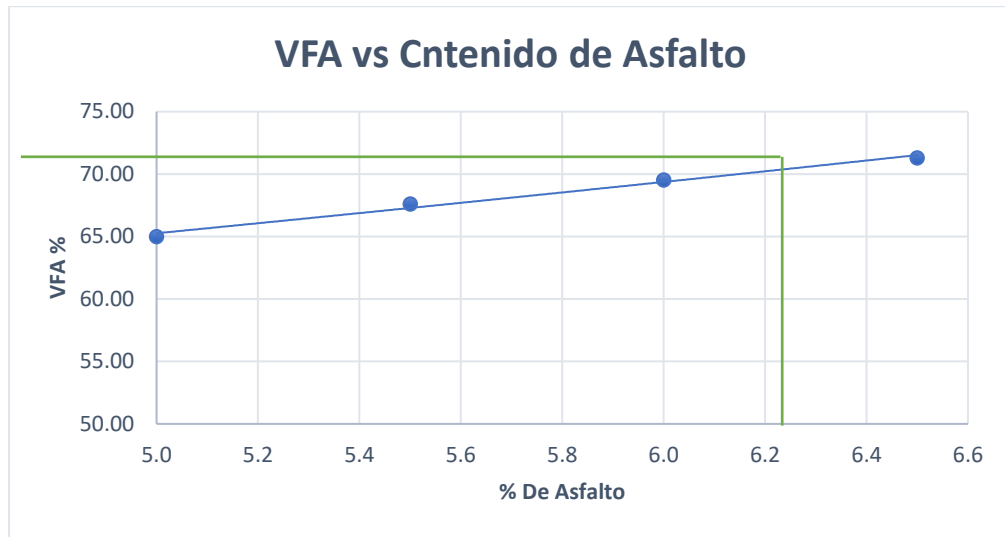


Por método Bailey se tiene como resultado un % de 16.19, cumpliendo con el parámetro mínimo.

2.4.1.6. Vacíos llenos de asfalto VFA. Para cumplir con el parámetro es importante tener como base el NT3 el cual tiene un rango de 65% a 75%, obteniendo:

Figura 33.

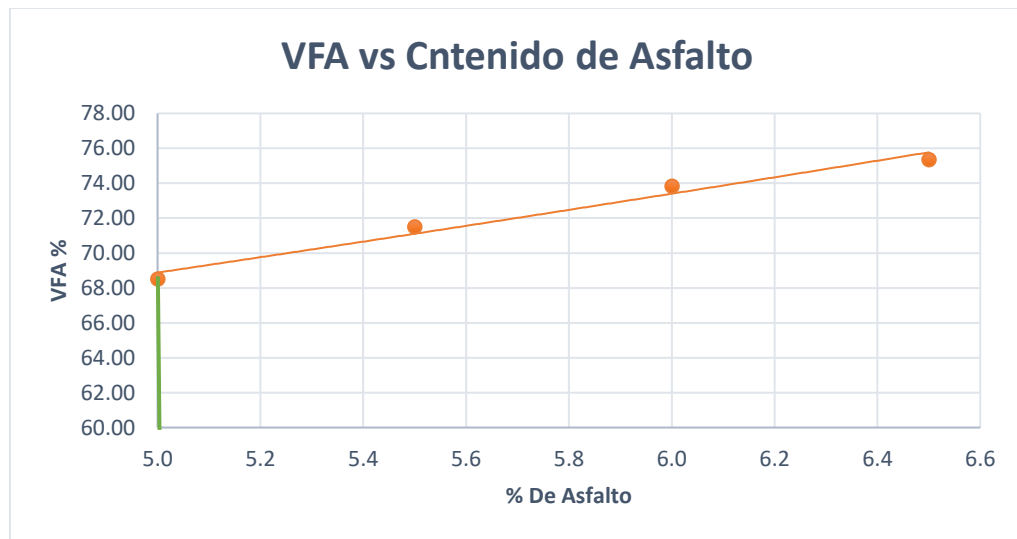
VFA vs contenido de asfalto- método convencional



Para el método convencional se cumple con un porcentaje de 71.3%

Figura 34.

VFA vs contenido de asfalto- método Bailey



Para el método Bailey se cumple con un porcentaje de 68.5%

2.4.1.7. Espesor promedio de película de asfalto. Para encontrar el espesor de película de asfalto mínimo se hace uso de las siguientes ecuaciones, en donde el espesor debe ser > 7.5 μm .

$$S_s = \frac{P_{0.30} + P_{0.15} + P_{0.075}}{5}$$

Ecuación 31. Espesor promedio

- P0.30: % de agregado pasante de tamiz 0.30 mm.
- P0.15: % de agregado pasante de tamiz 0.15 mm.
- P0.075: % de agregado pasante de tamiz 0.075 mm.

- **Método convencional**

$$S_s = 6.0$$

- **Método Bailey**

$$S_s = 6.0$$

Realizando la ecuación:

$$AFT = \frac{1000 * VBE}{S_p * P_s * G_{mb}}$$

Ecuación 32. Espesor de la película

Donde:

- AFT: Espesor de la película aparente de asfalto, μm .
- VBE: Contenido de CA efectivo, % en volumen de la mezcla.
- Ss: Superficie específica del agregado, m^2/kg .
- Ps: Contenido de agregado, % en peso total de la mezcla (100-Pb)

- **Método convencional**

$$AFT = 9.1$$

- **Método Bailey**

$$AFT = 11.14$$

Cumpliendo en los dos métodos.

Finalmente se obtiene los porcentajes óptimos por los 2 métodos, Convencional y Bailey los cuales son:

Porcentaje Optimo método convencional	Porcentaje Optimo método Bailey
6.5%	5%

3. Conclusiones

Tras analizar y comparar detenidamente los resultados obtenidos de nuestra investigación sobre los métodos de estudio, se ha llegado a la conclusión de que uno de los parámetros más significativos es el aspecto económico. En particular, al aplicar el método de Bailey, donde se logró optimizar el porcentaje de asfalto en un 1.5 % con respecto al método convencional, lo que representa un ahorro del 10% al 12% por metro cubico. Además, al optar por el método de Bailey, no solo se logra una optimización económica, sino que también se contribuye significativamente a la reducción de la contaminación asociada al uso de asfalto. Dicha práctica tradicional ha demostrado ser perjudicial para el medio ambiente, y elegir métodos más eficientes como el de Bailey representa un paso importante hacia la sostenibilidad y la preservación ambiental

Al analizar el flujo, determinamos que el método de Bailey resultó en un diseño de pavimento más rígido, dando un resultado de 2.72 mm mientras que el método convencional generó un pavimento más flexible, dando un valor de 3.4 mm. Es crucial resaltar que la estabilidad se mantuvo dentro de los límites establecidos por la normativa vigente, que va de 2-3.5 mm. Es importante señalar que el método de Bailey puede demostrar un rendimiento superior en climas cálidos gracias a su mayor flexibilidad. Contrariamente, el método convencional exhibe un mejor desempeño en climas más fríos debido a su menor flexibilidad. Esta variación en la flexibilidad se debe al comportamiento diferencial de los pavimentos en diversos entornos climáticos: en climas más cálidos, se observa una mayor deformación, mientras que, en climas fríos, la deflexión es menos pronunciada.

La estabilidad emerge como un parámetro crucial en el diseño de pavimentos, se observó que la estabilidad fue notablemente mayor al emplear el método convencional, arrojando un valor de 18 kN, en contraste con los 10 kN obtenidos mediante el método Bailey. Es de suma importancia señalar que ambas metodologías cumplen con el límite mínimo estipulado por la normativa vigente, fijado en 9 kN. Este hecho subraya la eficacia y adecuación de ambos métodos al asegurar el cumplimiento de los estándares normativos relacionados con la estabilidad del pavimento. La superioridad en la estabilidad del método convencional podría atribuirse a ciertas características inherentes a su enfoque de diseño, lo que podría resultar beneficioso en determinados contextos o

condiciones específicas. Sin embargo, la clave reside en reconocer que, independientemente de las diferencias cuantitativas observadas, ambos métodos demuestran su capacidad para satisfacer los requisitos normativos mínimos, confirmando así su capacidad para aplicaciones en el diseño de pavimentos.

Un factor de vital importancia en el diseño de pavimentos es el VFA (Vacant Filled with Asphalt, por sus siglas en inglés), un parámetro volumétrico que indica el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica llenos de asfalto. En el método convencional, se logró un VFA del 71.3%, mientras que en el método de Bailey se obtuvo un 68.5%. Este indicador cobra relevancia porque influye directamente en la durabilidad y resistencia del pavimento. Un VFA bajo puede resultar en una mezcla asfáltica seca y quebradiza, comprometiendo la integridad del pavimento. En contraste, un VFA elevado puede conducir a una mezcla asfáltica demasiado suave y pegajosa, afectando la capacidad estructural de la superficie. Por ende, es imperativo mantener el VFA en un rango óptimo, idealmente entre el 65% y el 75%, para asegurar la calidad y desempeño del pavimento a lo largo de su vida útil. Es alentador destacar que ambos métodos evaluados cumplen con los límites establecidos por la normativa vigente, subrayando así su conformidad con los estándares de calidad y desempeño en relación con el parámetro.

4. Recomendaciones

Se recomienda trabajar con porcentajes de asfalto inferiores al 5% con el fin de evaluar adecuadamente el comportamiento de los parámetros tales como estabilidad, flujo, contenido y contenido de vacíos.

Se recomienda emplear una mayor cantidad de briquetas para cada porcentaje de asfalto, ya que durante su ejecución es posible que surjan algunas fallas. Además, la obtención de un mayor número de resultados contribuirá a mejorar la eficacia de las evaluaciones realizadas.

Se recomienda llevar a cabo estudios adicionales para diversos tipos de mezclas, así como para otras categorías de tránsito. Es importante mencionar que el presente estudio se enfocó en las mezclas tipo densas (MDC 10) y en la categoría de tránsito NT3. Sin embargo, la ampliación de estos análisis a diferentes tipos de mezclas y categorías de tránsito permitiría obtener una comprensión más completa y aplicable en un espectro más amplio de situaciones.

Referencias bibliográficas

- Cruz, G. K. A., de Medeiros Melo Neto, O., Arruda, S. M., de Figueiredo Lopes Lucena, L. C., Ziegler, C. R., & da Silva, G. C. B. (2022). Influence of particle size selection methods on asphalt mixtures produced with lateritic aggregates. **Construction and Building Materials, 314**, 125201.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013). **Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras. Artículo 450.**
- Ferreira, J. L. S., Babadopulos, L. F. A. L., Bastos, J. B. S., & Soares, J. B. (2020). A tool to design rutting resistant asphalt mixes through aggregate gradation selection. **Construction and Building Materials, 236**, 117531.
- Granados, G. A. P. **Análisis de los parámetros del método Bailey y su influencia en la segregación de mezclas densas en caliente.**
- Ibisch, P. L., Hoffmann, M. T., Kreft, S., Pe'er, G., Kati, V., Biber-Freudenberger, L., DellaSala, D. A., Vale, M. M., Hobson, P. R., & Selva, N. (2016). A global map of roadless areas and their conservation status. **Science, 354*(6318), 1423-1427.*
<https://doi.org/10.1126/science.aaf7166>
- Mateus, O. D. A., & Chávez, C. S. C. (s. f.). Evaluación de la resistencia obtenida mediante un ensayo de flexión bajo carga monotónica en especímenes de mezcla asfáltica reforzada con geomallas. **66**.
- Miranda, L., Rubio, B., Jiménez, R., & Enríquez, L. (s. f.). Método de dosificación bailey. Aplicación a las mezclas tipo stone mastic asphalt (SMA). **13**.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013). **Normas de ensayo para materiales de carretera*. Secciones 100, 200 y 700.*

- Parra-Bohórquez, L. A. (2015). Estudio sobre el efecto de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas. **Ingenio Magno, 6*(1), 112 - 127*. Recuperado de <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/1033>
- Reyes-Ortiz, O. J., & Camacho-Tauta, J. (2008). Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas. **Ingeniería y Desarrollo, 23**, 26-42. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612008000100004&lng=en&nrm=iso
- Swathi, M., Andiyappan, T., Guduru, G., Amarnatha Reddy, M., & Kuna, K. K. (2021). Design of asphalt mixes with steel slag aggregates using the Bailey method of gradation selection. **Construction and Building Materials, 279**, 122426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122426>