

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El carbón es utilizado principalmente en el tratamiento de aguas, purificantes de aceites vegetales y azúcar; además de la elaboración de gaseosas, jugos, bebidas alcohólicas, entre otras.

El estudio de las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas con el uso de carbón mineral se realiza por la necesidad que se tiene de buscar otras alternativas a los agregados pétreos convencionales que se utilizan en las obras viales. Mediante este estudio se pretende determinar si este agregado artificial cumple las especificaciones técnicas normadas para la elaboración de mezclas asfálticas, buscando establecer parámetros técnicos que permitan su adecuada dosificación.

Lo que el autor propone en esta investigación es Estudiar el comportamiento de las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas utilizando carbón mineral como agregado, a través de ensayos de laboratorio estandarizados como ser Marshall, con el fin de determinar si este agregado artificial puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas.

El aporte de esta investigación en lo teórico es la utilización de la teoría científica que se describe más adelante; La implementación de este material alternativo hará posible la realización de obras que en otro caso no serían viables, y el consecuente acceso al mejoramiento de la calidad de vida de una amplia región del país donde no se cuenta con agregados pétreos.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Ante las posibilidades de modificar las condiciones del cemento asfáltico con diversos productos, es importante investigar sobre el efecto que puede tener el carbón mineral en el cemento asfáltico y sobre todo en la mezcla asfáltica en sus propiedades volumétricas cuya importancia en la producción, colocación y durabilidad de la mezcla asfáltica es muy importante. Realizar la investigación con diversos porcentajes de residuos de carbón mineral con esto de tal manera que podamos determinar las propiedades de la mezcla y

entre ellas con mayor preponderancia las propiedades volumétricas de manera que podamos obtener un porcentaje óptimo de carbón que satisfaga las mejores condiciones volumétricas de la mezcla asfáltica.

Mediante este estudio se pretende determinar si este agregado artificial puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas, buscando establecer parámetros técnicos que permitan su adecuada dosificación.

Si la variación presentada demuestra una optimización en las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas, esto dará lugar para que se realicen otras investigaciones más a detalle para demostrar si es viable la utilización de este agregado artificial en proyectos viales.

1.3. SITUACIÓN PROBLÉMICA

En la ciudad de Tarija no se realiza un buen control y monitoreo de las propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas, siendo una de las causas por las que el pavimento tiende a fallar o deteriorarse a corto tiempo una vez ya emplazado y puesto al servicio del usuario.

Hoy en día se adicionan agentes modificadores para la mezcla asfáltica con el objeto de mejorar su comportamiento mecánico a temperaturas altas y bajas de servicio, ya que al adicionar estos agentes cumplen con lo establecido para su utilización en carreteras.

Con el presente estudio proponemos usar el carbón mineral, donde se pretende detectar posibles variaciones en el comportamiento volumétrico de las propiedades de las mezclas asfálticas, para así restar los problemas que tienen las mezclas asfálticas convencionales y posibles mejoras a sus propiedades como su durabilidad, estabilidad.

1.3.1 Determinación del problema

¿De qué forma, un estudio de las propiedades volumétricas a las mezclas asfálticas densa con carbón mineral puede determinar si este llenante mineral sería una alternativa técnica para la elaboración de mezclas asfálticas?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Analizar la influencia del carbón mineral en las propiedades volumétricas de una mezcla asfáltica densa en caliente, a través de ensayos de laboratorio estandarizados Marshall, con el fin de determinar si este agregado artificial puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Recopilar información sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas en propiedades volumétricas.
- Realizar la caracterización de los materiales, agregado artificial, agregados pétreos y del cemento asfáltico.
- Diseñar las mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall.
- Realizar un estudio y análisis de las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas con carbón mineral.

1.5. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis

Si se elabora el diseño de las mezclas asfálticas densas en caliente utilizando carbón mineral como filler, haciendo variar sus porcentajes; entonces se podrá establecer un estudio de las propiedades volumétricas y determinar si éste llenante mineral puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas.

1.5.2. Identificación de las Variables

1.5.2.1. Variable independiente

x = Porcentajes de carbón mineral.

1.5.2.2. Variable dependiente

y = Propiedades volumétricas.

1.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 1. 1. Operacionalización de la variable independiente.

Variable independiente	Dimensiones	Indicador	Valor/acción
Carbón mineral	Incluido en la mezcla asfáltica como agregado	Se estudia en diferentes porcentajes	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. 2. Operacionalización de las variables dependientes.

Variable dependiente	Dimensiones	Indicador	Valor/acción
Propiedades volumétricas	Propiedades Volumétricas Marshall de mezclas asfálticas.	Densidad	g/cm ³
		Vacíos en la mezcla	%
		Relación betún vacíos	%
		Vacíos del agregado mineral	%

Fuente: Elaboración propia.

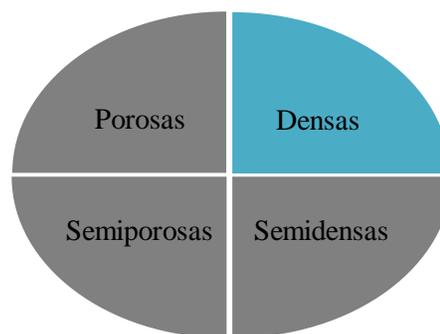
1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1. Unidad de estudio

- Mezclas asfálticas.

1.7.2. Población

- Tipos de mezclas según sus vacíos.



1.7.3 Muestra

- Mezclas asfálticas densas con carbón mineral.

1.7.4. Tamaño de la muestra

Se estudian las 6 mezclas asfálticas cada una con diferente variación de carbón mineral, cada mezcla asfáltica tiene 5 porcentajes de variación de cemento asfáltico y se realizan tres briquetas de cada porcentaje, esto para determinar el óptimo de C.A. de cada porcentaje de carbón mineral, haciendo un total de 90 briquetas.

Una vez determinado el contenido óptimo se realiza como mínimo 5 briquetas para cada porcentaje de carbón mineral, es decir 30 briquetas más.

En total se realizaron 120 briquetas.

1.8. LIMITACIONES

El tipo de cemento asfáltico que se utilizará en la investigación será un asfalto normal de penetración 85 – 100.

Como filler en el diseño de la mezcla asfáltica se utilizará carbón mineral fabricado en Brasil, adquirido del comercial DIEMAF Servicios Integrales.

El agregado que se utilizará en el diseño de la mezcla asfáltica se limitará a los proporcionados por la chancadora de Charaja que se encuentra ubicada en la comunidad de Chocloca.

1.9. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

1.8.1. Listado de actividades a realizar

a) Mezcla asfáltica

Consultar bibliografía referente a mezclas asfálticas.

b) Diseño

Definir el tipo de mezcla asfáltica a diseñar en la presente investigación.

c) Componentes de mezclas asfálticas

Definir el lugar de adquisición de todos los componentes de la mezcla asfáltica (agregados, ligante y equipo).

d) Agregados

Adquisición y selección de agregados

Granulometría de los agregados

Gravedad específica y % de absorción

Desgaste de los ángeles

Equivalente de arena

e) Ligante (cemento asfáltico)

Adquisición del ligante (cemento asfáltico)

Penetración a 25 °C

Viscosidad cinemática

Punto de inflamación

Peso específico

Ductilidad

f) Propiedades Volumétricas (Marshall)

Densidad

Vacíos de la mezcla

Relación betún vacíos

Vacíos del agregado mineral

Los ensayos se realizarán en los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, los mismos cuentan con todo el equipo necesario que se requiere en la presente investigación, los resultados obtenidos serán avalados por los encargados de laboratorio.

1.9.2 Productos esperados en correspondencia con el procedimiento

Los productos esperados en correspondencia con el procedimiento de la perspectiva acerca del estudio del comportamiento de las propiedades del carbón mineral utilizando como agregado en una mezcla asfáltica son:

Realizar los ensayos de propiedades volumétricas: densidad, vacíos de la mezcla, vacíos del agregado mineral y la relación betún vacíos, para así poder obtener los resultados que nos permitirán emitir un juicio de valor cualitativo y cuantitativo al respecto.

1.9.3 Resultados esperados

Identificar el comportamiento de las propiedades de las mezclas asfálticas y determinar si este agregado artificial (carbón mineral) puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas.

1.9.4 Análisis de resultados

El programa a utilizar en el análisis de resultados será el Excel, ya que es el más conocido en nuestro medio.

Las variables dependientes que se medirán son:

Densidad

Vacíos de la mezcla

Relación betún vacíos

Vacíos del agregado mineral

Con estos resultados

Estadística descriptiva, se aplica a las siguientes variables dependientes:

$y_1 =$ Densidad

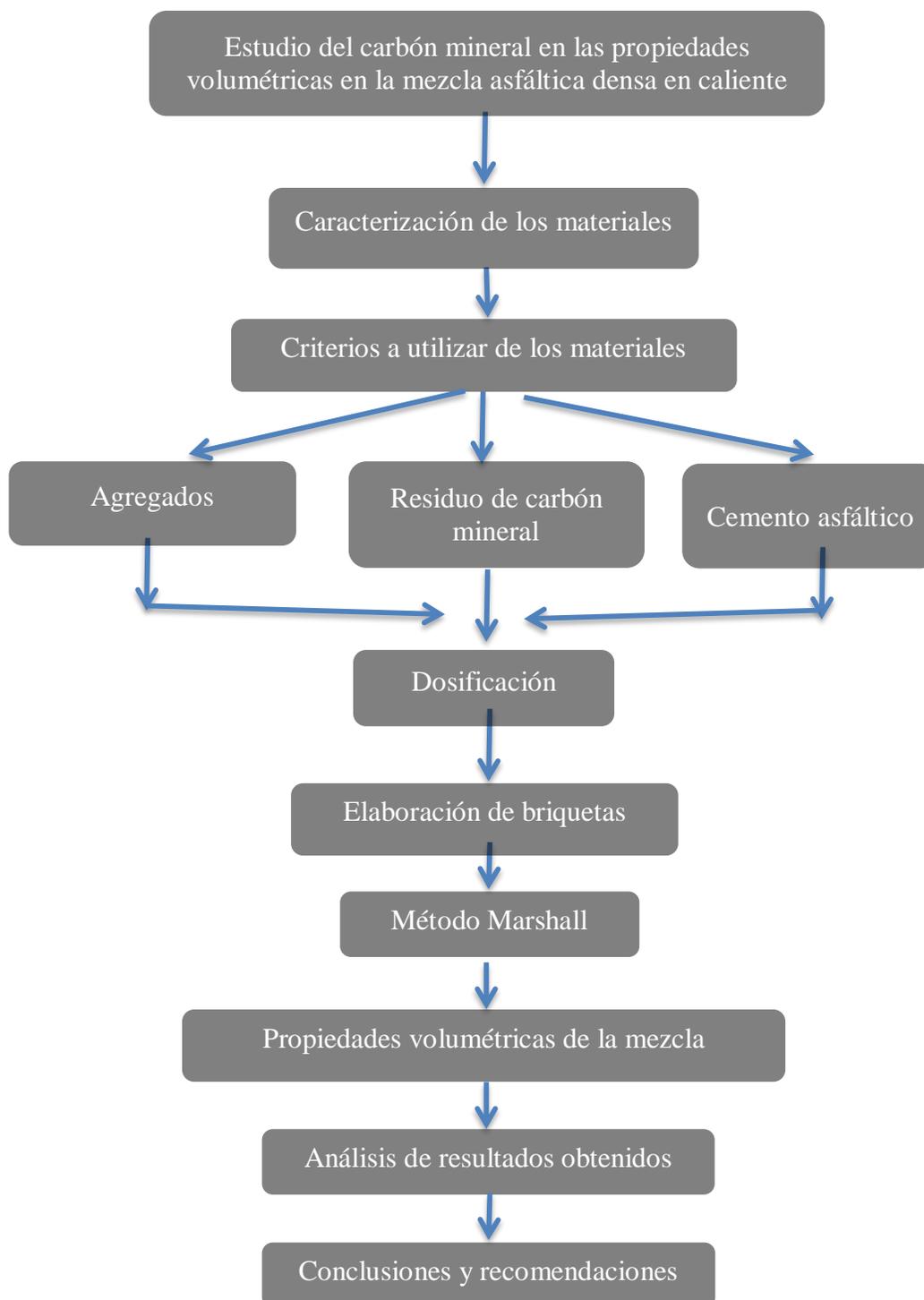
$y_2 =$ Vacíos de la mezcla

$y_3 =$ Relación betún vacíos

$y_4 =$ Vacíos del agregado mineral

1.9.5. Esquema de actividades en función al procedimiento definido

Figura 1. 1. Esquema de actividades en función al procedimiento definido



1.10. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se realiza en la ciudad de Tarija.

Para esta investigación se utilizarán áridos propios de la región, de esta manera se realizará una evaluación del efecto que produce el carbón mineral, dentro de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

Este capítulo contendrá toda la información necesaria para la realización de la investigación, dando los conceptos necesarios para los ensayos y las normativas a seguir hasta el final de la investigación.

El diseño de la mezcla asfáltica en caliente se realizará utilizando el método Marshall.

El diseño de la mezcla asfáltica en caliente será a nivel laboratorio.

Los ensayos para los agregados pétreos, agregados arcilla expandida térmicamente, cemento asfáltico y mezcla asfáltica se realizarán conforme a normas AASHTO y/o ASTM.

En el 1° Capítulo se desarrolla todo lo que se pretende realizar en la investigación, los objetivos que se tienen durante el transcurso del proyecto y el objetivo final al cual se pretende llegar.

El 2° Capítulo está enfocado en la recopilación de información bibliográfica y antecedentes, análisis de información de proyectos similares y la revisión de la normativa.

En el Capítulo 3° se comienza con la realización de los ensayos se realizará la selección del material en la cantera, obtención del carbón mineral, ensayos a los materiales de la cantera. Luego se continúa con la parte práctica dando inicio a los cálculos, diseño y el análisis de los ensayos necesarios para el cumplimiento de los objetivos de la investigación, se realizarán los ensayos de las mezclas asfálticas para obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico y del carbón mineral.

El Capítulo 4° se realizará las conclusiones y recomendaciones de la investigación, si se cumplió con los objetivos establecidos en la planificación del proyecto, y con la hipótesis establecida.

CAPÍTULO II
CARBÓN MINERAL COMO
FILLER EN LAS MEZCLAS
ASFÁLTICAS

2.1. INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica se puede definir como la combinación de agregados pétreos con cemento asfáltico, mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráficos pesados intensos. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto.

El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Existen tres métodos de diseño utilizados para determinar las proporciones adecuadas de asfalto y agregados. Ellos son el método Marshall y el método Hveem, actualmente el método que se utiliza en EEUU. es el método SUPERPAVE ya que se considera que la metodología de diseño está basada en pruebas más reales y científicas y no empíricas como las del método Marshall; debido a las condiciones económicas los países como el nuestro se siguen utilizando es el método Marshall.

2.2. TIPO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Existe varias clasificaciones de mezclas asfálticas, de acuerdo con el parámetro considerando para establecer las diferencias. Así, conforme las fracciones de agregado pétreo empleado en la elaboración de la mezcla, estas se dividen en mastico asfáltico; mortero asfáltico; macadam asfáltico. Si la temperatura es considerada, se divide en mezclas en frío y mezclas en caliente. Si el parámetro considerado es el porcentaje de vacíos de aire, las mezclas pueden ser densas o cerradas; semidensas o semicerradas; abiertas y porosas, dependiendo de si tienen menos del 6%, entre el 6 y el 12% de vacíos de aire, entre el 12 y el 18% o más del 20%, respectivamente. Otra clasificación se

establece de acuerdo con la estructura de los agregados pétreos; así, se tienen mezclas con o sin esqueleto mineral. Si se considera la curva granulométrica, se clasifica en mezclas asfálticas continuas o mezclas discontinuas. La mezcla asfáltica en caliente se tipifica así, porque tanto el agregado pétreo, como el asfalto, se calienta antes del mezclado; es un tipo de mezcla compuesta por un 93 a 97 % de agregado pétreo y por un 3 a 7% de asfalto, con respecto a la masa total de la mezcla.

2.2.1. Diseño de mezclas asfálticas

El objetivo principal del diseño mezclas asfálticas de pavimentación, consiste en determinar una combinación entre los agregados que produzcan una mezcla con:

- Suficiente asfalto para proporcionar un pavimento durable.
- Buena estabilidad para satisfacer las demandas de tránsito sin producir desplazamientos.
- Suficiente trabajabilidad para evitar la segregación al momento de colocación.

El diseño de mezcla adecuado, es generalmente el más económico y cumple satisfactoriamente los criterios mencionados anteriormente.¹

2.2.2. Mezclas densas o cerradas

Son las mezclas cuyos vacíos en su masa son inferiores al 5% entre los rangos de 3% y 5%.

2.2.3. Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 2.1). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño

¹ <https://es.slideshare.net/leonel321/mezclas-asfalticas-2>

preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Tabla 2. 1. Criterios de diseño de mezclas Marshall

Método Marshall	Tráfico liviano		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad, (N)	3336	-	5338	-	8006	-
(lb)	750	-	1200	-	1800	-
Flujo, (0,01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Manual del Instituto del Asfalto, 2003.

2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

En general, todos los betunes presentan una serie de características físicas comunes, tales como su color oscuro, la facultad de presentar buena adhesividad con la superficie de las partículas minerales o su inmisibilidad con el agua.

En cuanto a su comportamiento mecánico, debe decirse que es muy complejo y que depende de varios factores, como son la sollicitación aplicada, el tiempo durante el que ésta actúa o la temperatura ambiente.

Las propiedades más destacables de los betunes desde el punto de vista de la técnica de construcción de carreteras son las siguientes:

Adhesividad.- Facilidad que presenta el betún para adherirse a la superficie de una partícula mineral. Esta característica es muy importante en mezclas asfálticas, donde betún y áridos deben formar un conjunto homogéneo y continuo. Para mejorarla, puede recurrirse al uso de activantes.

Viscosidad.- Se define como la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a los rozamientos internos que ocurren en el seno del fluido. En el caso de los betunes

varían con la temperatura, lo que da una idea de su susceptibilidad térmica.

Susceptibilidad térmica.- Indica la propensión que presenta el betún a variar propiedades teológicas especialmente la viscosidad con la temperatura. Gracias a esta propiedad pueden manejarse con facilidad a altas temperaturas, presentando una mayor estabilidad a temperatura ambiente.

Plasticidad.- Define el comportamiento mecánico del betún ante diferentes estados físicos y temporales de carga. Un betún poco plástico no soportará deformaciones excesivas sin que se produzcan grietas.

Durabilidad.- La mezcla contiene suficiente cemento asfáltico, asegurando un adecuado espesor de película rodeando las partículas de agregados, así se minimiza el endurecimiento del cemento asfáltico. El curado durante la producción y la puesta en servicio también contribuye a esta característica. Por otro lado, la mezcla compactada no debería tener altos porcentajes de vacíos que aceleren el proceso de curado.

Tabla 2. 2. Causas y efectos de una poca durabilidad.

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto.	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua.	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado.

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

Trabajabilidad. La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado o la granulometría

Tabla 2. 3. Causas y efectos de problemas en trabajabilidad.

Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar.
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar.
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable.
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar; poco durable.

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

2.4. CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son la densidad de la mezcla, vacíos de aire, o simplemente vacíos, vacíos en el agregado mineral y el contenido de asfalto.

2.5. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA (ANALIZANDO EL MÉTODO MARSHALL)

La mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Las cuales se detallan a continuación:

2.5.1 Densidad

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento

duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable. La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/pe^3), se calculada al multiplicar la gravedad especifica total de la mezcla por la densidad del agua ($1,000 \text{ kg/m}^3$ o 62.416 lb/pe^3). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar si la densidad del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto, las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

2.5.2 Vacíos de aire

Están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre 3% y 5%. La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico.

A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica.

Por otra parte, un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que, a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

2.5.3 Vacíos en el agregado mineral (VAM)

Son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir, el VAM o VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla.

El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VAM es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla. Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VAM recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VAM establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

2.5.4 Contenido de asfalto

El contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas.

Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones de agregado que pasan a través del tamiz N° 200 (0.075 mm)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Caso contrario al

efectuar pequeñas disminuciones de filler nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

Figura 2. 1. Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica



Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 401.

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto.

Técnicamente se habla de dos tipos de asfalto al referirse al asfalto absorbido y el no-absorbido, contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto: cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto: volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla.

2.5.5. Vacíos llenos de asfalto o relación betún vacíos (R.B.V.)

Son el porcentaje de vacíos inter granulares entre las partículas de agregado (VAM) que se encuentran llenos de asfalto. El VAM abarca asfalto y aire, por lo tanto, el R.B.V. se calcula al restar los vacíos de aire del VAM, y luego dividiendo por el VAM, y expresando su valor como un porcentaje.²

2.6. COMPONENTES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.6.1. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico es una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, que se presenta en forma de cuerpo viscoso más o menos elástico, no cristalino y de color negro. Son productos de la destilación natural o artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda una vez que se hayan extraído los componentes más ligeros y volátiles del petróleo.

El asfalto es un material que se puede encontrar en la naturaleza en yacimientos naturales o puede ser obtenido como subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo. Tiene una consistencia sólida, al calentarlo se ablanda y se vuelve líquido, lo que le permite recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente. El asfalto cambia su comportamiento dependiendo de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Es más duro a bajas temperaturas y más blando a altas, por esto, se debe seleccionar el tipo de asfalto más conveniente dependiendo del clima del sitio de colocación.

El asfalto ha sido utilizado para la construcción de carreteras desde la antigüedad ya que tiene ciertas características físicas que le permiten su uso como aglutinante en la mezcla asfáltica. El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, que tiene las propiedades ideales para la construcción de pavimentos cumpliendo las siguientes funciones:

² <https://es.scribd.com/doc/262834496/>. Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente net/

- Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.
- Proporciona una fuerte unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.

2.6.1.1 Ensayos realizados al asfalto para determinar sus propiedades

2.6.1.1.1 Penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97)

Este método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.

El ensayo de penetración se usa como una medida de consistencia, valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

2.6.1.1.2 Ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00)

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra se tracciona a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de 25 °C y a una velocidad de 5cm/min. Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad.

2.6.1.1.3 Punto de inflamación y combustión en la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01 AASHTO T79-96)

El método define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para productos del petróleo y otros líquidos, excepto aceites combustibles y materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de los 70°C determinado por medio de este método de ensayo.

2.6.1.1.4 Viscosidad (AASHTO T201 ASTM D 2170)

Este método abarca los procedimientos para determinar la viscosidad de asfaltos líquidos, aceites de caminos y residuos destilados de asfaltos líquidos, todos a 60°C, y de cementos asfálticos a 135°C, en el rango de 30 a 100.000 cts.

2.6.1.1.5 Densidad (ASTM D 71-94 AASHTO T229-97)

Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos, mediante el uso del picnómetro a la temperatura requerida ³.

2.6.1.2 Requisitos del cemento asfáltico clasificado por penetración

Tabla 2. 4. Requisitos del cemento asfáltico clasificado por penetración

Pruebas	Grado de penetración									
	40 - 50		60 - 70		85 - 100		120 - 150		200 - 300	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Penetración a 25°C (77°F), 100, 5seg.	40,00	50,00	60,00	70,00	85,00	100,00	120,00	150,00	200,00	300,00
Punto de inflamación °C (°F)	232,00	-	232,00	-	232,00	-	218,00	-	177,00	-
	450,00		450,00		450,00		425,00		350,00	
Ductilidad a 25°C (77°F), 5cm/min, cm	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-	-	-
Solubilidad en tricloroetileno, porcentaje	90,00	-	90,00	-	90,00	-	90,00	-	90,00	-
Prueba en homo de película delgada (TFO), 3,2 mm (1/8in), 163°C (325°F), 5 horas perdida por calentamiento, porcentaje	-	0,80	-	0,80	-	1,00	-	1,30	-	1,50
Penetración del residuo, porcentaje del original	58,00	-	54,00	-	50,00	-	46,00	-	40,00	-
Ductilidad de residuo, a 25°C (77°F), 5cm/min.cm	-	-	50,00	-	75,00	-	100,00	-	100,00	-
Prueba de mancha (cuando y como se especifique) (ver nota)	Negativo para todos los grados									
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados									
Solvente de nafta-xileno, porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados									
Solvente de heptano-xileno, porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados									

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 223.

³ <https://es.slideshare.net/leonel321/mezclas-asfalticas-2>

2.7. AGREGADOS

Los agregados también llamados áridos son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, usado en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento flexible. Los agregados se usan tanto en las capas de base granular como para la elaboración de la mezcla asfáltica.

El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento.

2.7.1. Clasificación de los agregados

En general los agregados se han clasificado de varias maneras a través del tiempo, pero principalmente desde los puntos de vista de: procedencia, densidad, tamaño, forma y textura.

2.7.2. Clasificación según su procedencia

De acuerdo con el origen de los agregados, según su procedencia ya sea de fuentes naturales o a partir de productos industriales, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Agregados naturales.
- Agregados artificiales.

2.7.2.1. Agregados naturales

Son aquellos procedentes de la explotación de fuentes naturales tales como: depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río) o glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Pueden usarse tal como se hallen o variando la distribución de tamaños de sus partículas, si ello se requiere. Todas las partículas que provienen de los agregados tienen su origen en una masa mayor la que se ha fragmentado por procesos naturales como intemperismo y abrasión, o mediante trituración mecánica realizada por el hombre, por lo que gran parte de sus características vienen dadas por la roca madre que le dio su origen.

2.7.2.2. Agregados artificiales

Por lo general, los agregados artificiales se obtienen a partir de productos y procesos industriales tales como: arcillas expandidas, escorias de alto horno, clinker, limaduras de hierro y otros, comúnmente estos son de mayor o menor densidad que los agregados corrientes.

2.7.2.3. Agregados livianos artificiales

Los áridos livianos artificiales se obtienen a través de un tratamiento térmico -a elevadas temperaturas- a determinados productos que poseen la propiedad de desprender gas al tiempo que se reblandecen, con lo cual expanden. Por efecto de la temperatura la capa superficial se vitrifica y el gas queda encerrado en el interior. Una vez enfriado se obtiene un material liviano y duro de superficie lisa y forma más o menos regular. Los más corrientes son las arcillas expandidas, las pizarras o esquistos expandidos y las cenizas volantes calcinadas.

La densidad aparente de estos áridos oscila entre los 300 y 1000 kg/m³. La absorción de agua de estos agregados, varían según la materia prima, el proceso de fabricación y el tamaño del grano; el intervalo de variación oscila entre un 8 y 25 por ciento sobre el peso deseado de los áridos mayores. A continuación, se nombra estos tipos de áridos:

- Piedra pómez
- Escorias de lava porosa
- Escorias de caldera
- Escorias de alto horno
- Pómez siderúrgica
- Arcilla, esquisto y pizarras expandidas
- Vermiculita o mica esponjada
- Clinker
- Ladrillos triturados

2.8. ENSAYOS REALIZADOS A LOS AGREGADOS

2.8.1 Granulometría (ASTM E 40 AASHTO T27-99)

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Tabla 2. 5. Serie de tamices utilizados para realizar la granulometría

Designación de tamices			
Para agregados gruesos		Para agregados finos	
Sistema métrico	Sistema habitual norteamericano	Sistema métrico	Sistema habitual norteamericano
63,00 mm	2 ½ plg	2,36 mm	N°8
50,00 mm	2 plg	1,18 mm	N°16
37,50 mm	1 ½ plg	0,60 mm	N°30
25,00 mm	1 plg	0,30 mm	N°50
19,00 mm	¾ plg	0,150 mm	N°100
12,50 mm	½ plg	0,075 mm	N°200
9,50 mm	3/8 plg		
4,75 mm	N°4		

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 36.

2.8.2. Densidad real, densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos y finos (AASHTO T85, AASHTO T84)

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos.

Es aplicable a los áridos gruesos y finos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas.

2.8.3. Equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176-00)

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz N° 4 (4.75 mm).

2.8.4. Desgaste mediante la máquina de los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99)

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2.36 mm, de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, mediante la máquina de los Ángeles.

2.8.5. Desintegración sulfato de sodio (ASTM E 88 AASHTO T104-99)

Este método establece el procedimiento para determinar la desintegración de los áridos mediante soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. El uso de una u otra sal es alternativo, pero sus resultados no son comparables.

Este método se aplica a los áridos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, que se utilizan en la elaboración de morteros, hormigones y, mezclas asfálticas.

2.8.6. Caras fracturadas en los áridos (ASTM D 5821)

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso de material que presenta una o más caras fracturadas de las muestras de áridos.

2.9. ESPECIFICACIONES QUE DEBEN CUMPLIR LOS AGREGADOS

2.9.1. Agregado grueso

Este material debe consistir en grava de buena calidad triturada (Retenidos por el tamiz N°4 (4.75 mm)) y mezclada de manera que el producto obtenido corresponda a uno de los tipos de granulometría estipulados y llene además los requisitos siguientes:

Tabla 2. 6. Especificaciones que debe cumplir el agregado grueso.

N°	Parámetro	Norma	Especificación
1	Abrasión de los Ángeles	AASHTO T 96	40 % máx.
2	Durabilidad, sulfato de sodio	AASHTO T 104	12 % máx.
3	Caras fracturadas	ASTM D 5821	75 % min.

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente

2.9.2. Agregado fino

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra chancada tamizada, o su combinación y deberá tener una granulometría que pasan por el tamiz N°4 (4.75 mm), al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría requerida según **AASHTO M 29** incluyendo la pérdida en sulfato, y que llene además los requisitos siguientes:

Tabla 2. 7. Especificaciones que debe cumplir el agregado fino.

N°	Parámetro	Norma	Especificación
1	Índice de durabilidad (fino)	AASHTO T 210	35 % min
2	Equivalente de arena	AASHTO T 176	45 % min
3	Durabilidad, sulfato de sodio	AASHTO T 104	15 % máx.

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente.

La graduación del agregado fino será conforme a la siguiente graduación.

Tabla 2. 8. Graduación del agregado fino de acuerdo a AASHTO M 29.

Graduación del agregado fino						
Tamaño de tamiz		Cantidad más fina que pasa cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), Masa, %				
		Graduación N°1	Graduación N°2	Graduación N°3	Graduación N°4	Graduación N°5
3/8"	9,50 mm	100	-	-	100	100
N°4	4,75 mm	95 a 100	100	100	80 a 100	80 a 100
N°8	2,36 mm	70 a 100	75 a 100	95 a 100	65 a 100	65 a 100
N°16	1,18 mm	40 a 80	50 a 74	85 a 100	40 a 80	40 a 80
N°30	0,60 mm	20 a 65	28 a 52	65 a 90	20 a 65	20 a 65
N°50	0,30 mm	7 a 40	8 a 30	30 a 60	7 a 40	7 a 46
N°100	0,15 mm	2 a 20	0 a 12	5 a 25	2 a 20	2 a 30
N°200	0,075 mm	0 a 10	0 a 5	0 a 5	0 a 10	-

Fuente: Tabla 1 norma AASHTO M 29.

2.10. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, MÉTODO MARSHALL

2.10.1 Metodología

La práctica de diseño de mezclas asfálticas ha utilizado diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en laboratorio; los comúnmente más utilizados son el método Marshall y el Hveem. Siendo el Marshall el más común en la práctica que se realizan.

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas.

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1') o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5'). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 1/2') y 102 mm (4') de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559).

Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.⁴

⁴ ASPECTOS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Paul Garnica Anguas Horacio Delgado. Técnica No 246 Sanfandila, Qro, 2004 Certificación ISO 9001:2000 Laboratorios acreditados por EMA

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100') que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

2.10.2 Propósito de la metodología

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla.

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 plg) o menor. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

2.10.3 Descripción general

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2.5 plg) de espesor por 102 mm (4 plg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica. Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

Preparación para efectuar los procedimientos Marshall

Los agregados y asfaltos presentan diferentes características, que tienen un impacto directo sobre la naturaleza del pavimento. El primer paso en el método de diseño, es determinar las cualidades que se necesita en una determinada mezcla asfáltica, y posteriormente seleccionar el tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

Selección de las muestras de material

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras de asfalto y del agregado que van a ser utilizados en la mezcla asfáltica. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple, los datos de los procedimientos de diseño de la mezcla determinan la "receta" para la elaboración de la mezcla final usada en el proceso de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en laboratorio tienen características idénticas a los usados en el producto final.

Preparación del agregado

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va ser usado debe ser ya conocida con el propósito de establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar claramente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico y efectuar un análisis granulométrico, con la finalidad de preparar una serie de briquetas que tengan diferentes contenidos de asfalto.

Se prepara una dosificación por el método de tanteo, en función de una faja de trabajo que se adecue al proyecto, y de una granulometría conocida de los agregados disponibles (grava de 3/4, gravilla de 3/8, arena natural y filler).

Como indica el nombre del método, se tantea con diferentes porcentajes de agregado, hasta que se encuentre una combinación que se adecue de mejor manera posible a la faja de trabajo.

Sabiendo que la muestra final se tiene que elaborar con briquetas con un peso de 1200 g; se determina el contenido de asfalto en peso equivalente a un porcentaje del peso total' de la briqueta, conociendo el peso del agregado que tiene que ocupar cada briqueta por la

diferencia en peso entre el total de la briqueta y el peso del asfalto, se separa una dosificación en pesos retenidos, que aporta cada tamiz.

Se prepara un número determinado de muestras de agregado para cada contenido de asfalto para elaborar un punto en la curva de dosificación Marshall y se separa cada uno en fuentes o bandejas correctamente identificadas.

Es importante mencionar que, para la elaboración del método tradicional de mezcla asfáltica en caliente, el agregado tiene que estar seco, para tal fin, antes de efectuar el pesado se deja el material en horno a 110 °C durante 24 horas.

Preparación de las muestras de ensayo (briquetas)

Las briquetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentos son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto, como se mencionó anteriormente. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados de análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

El asfalto y el agregado se calientan por separado y se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén recubiertas (esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta).

La mezcla se vierte en los moldes pre-calentados, luego se procede a la compactación con el martillo, el número de golpes se especifica en la tabla 2.9 Después de completar la compactación, las briquetas se dejan enfriar para luego proceder a su extracción de los moldes.

2.10.4. Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de cemento asfáltico depende de muchos criterios. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los

límites de vacíos de aire, el cual es 4%. El rango de vacíos de aire es de 3% al 5%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 2.11). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

2.10.4.1 Granulometría

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Tabla 2.9 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la norma AASHTO.

Tabla 2. 9. Granulometrías que deben cumplir los agregados para el diseño Marshall

Granulometría para el diseño Marshall						
Abertura de la malla	Porcentaje por peso que pasa por la malla estándar (AASHTO T 27 Y AASHTO T 11)					
	A	B	C	D	E	F
37,50 mm	100					
25,00 mm	97 a 100	100	100			
19,00 mm	-	97 a 100	97 a 100	100	100	
12,50 mm	-	76 a 88	(±5)	97 a 100	97 a 100	
9,50 mm	53 a 70	-	(±6)	-	(±5)	100
4,75 mm	40 a 52	49 a 59	(±7)	57 a 69	(±6)	37 a 47
2,36 mm	-	-		-	-	-
1,18 mm	25 a 39	36 a 45	(±5)	41 a 49	(±5)	7 a 13
0,60 mm	12 a 22	20 a 28	(±4)	22 a 30	(±4)	-
0,30 mm	8 a 16	13 a 21	(±3)	13 a 21	(±3)	-
0,15 mm	-	-		-	-	-
0,075 mm	3 a 8	3 a 7	3 a 8	3 a 8	3 a 8	2 a 4

Fuente: Materiales, mezclas asfálticas y técnicas de preservación, división 400, tabla 403-1.

2.10.4.2. Golpes de compactación

El proceso de compactación se realiza mediante una serie de golpes con el martillo Marshall sobre ambas caras de la muestra, según el propósito y tránsito esperado de la mezcla que se está diseñando.

Tabla 2. 10. Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo

Número de golpes			
Condición de tránsito que resultan en un ESALs de diseño (millones)	Alto	Medio	Bajo
		> 10 hasta 30	De 0,3 a 30
Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo	75,00	50,00	35,00

Fuente: Materiales, mezclas asfálticas y técnicas de preservación, división 400.

2.10.4.3. Parámetros volumétricos de diseño Marshall

La volumetría de la mezcla para encontrar el contenido de asfalto óptimo debe cumplir los parámetros establecidos en las tablas 2.11 y 2.12. El flujo y estabilidad Marshall se tienen que medir de acuerdo con el método AASHTO T 245.

Tabla 2. 11. Requisitos para la mezcla asfáltica Marshall (AASHTO T 2459)

Criterios para mezclas método Marshall	Tránsito liviano Carpeta y base		Tránsito mediano Carpeta y base		Tránsito pesado Carpeta y base	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N (lb)	336,00 (750,00)	-	5358,00 (1200,00)	-	8006,00 (1800,00)	-
Flujo, 0,25mm (0,01plg)	8,00	18,00	8,00	16,00	8,00	14,00
% de vacíos	3,00	5,00	3,00	5,00	3,00	5,00
% VMA	Ver tabla 2.11					
% VFA	70,00	80,00	65,00	78,00	65,00	75,00

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 414.

Tabla 2. 12. Porcentajes mínimos de vacíos en el agregado mineral (VMA).

Tamaño máximo en mm		VMA mínimo, por ciento		
		Vacíos de diseño, por ciento		
mm	plg	3,00	4,00	5,00
1,18	N°16	21,50	22,50	23,50
2,36	N°8	19,00	20,00	21,00
4,75	N°4	16,00	17,00	18,00
9,50	3/8	14,00	15,00	16,00
12,50	1/2	13,00	14,00	15,00
19,00	3/4	12,00	13,00	14,00
25,00	1.00	11,00	12,00	13,00
37,50	1,50	10,00	11,00	12,00
50,00	2,00	9,50	10,50	11,50
63,00	2,50	9,00	10,00	11,00

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 415.

2.10.5 Ensayos realizados a la mezcla asfáltica compactada

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

2.10.5.1 Determinación de la gravedad específica bulk

El ensayo de gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas utilizando especímenes saturados superficialmente secos puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado. Este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma AASHTO T 166-05, para la gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas usando especímenes cubiertos con parafina la norma AASHTO T 275 es aplicada. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se utiliza la norma AASHTO T 166-05, en caso contrario, se recurre a la norma AASHTO T 275.

2.10.5.2 Ensayo de estabilidad y flujo

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

Las briquetas confeccionadas con cemento asfáltico se deben sumergir en un baño María a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Remueva el espécimen de ensayo del baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocar la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga. Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una velocidad constante de $50 \pm 1\text{ mm/min}$ (2 plg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons o libras requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que el ensayo de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm ($1/100''$) será el valor del flujo Marshall. El procedimiento completo de estabilidad y fluencia, comenzando desde el momento en que se retira la probeta del agua, no debe durar más de 30 segundos.

2.10.5.3 Análisis de densidad y vacíos

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto.

Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco,

porcentaje de vacíos (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).⁵

2.11. CARBÓN MINERAL

El carbón o carbón mineral es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono y con cantidades variables de otros elementos, principalmente hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno, utilizada como combustible fósil.¹ La mayor parte del carbón se formó durante el período Carbonífero (hace 359 a 299 millones de años).² Es un recurso no renovable.

2.11.1 Reseña histórica

El hombre extrae carbón desde la Edad Media. En los yacimientos poco profundos la explotación es a cielo abierto. Sin embargo, por lo general las explotaciones de carbón se hacen con minería subterránea ya que la mayoría de las capas se encuentran a cientos de metros de profundidad.

Su uso se remonta a algunos siglos atrás, época en la cual se utilizaba ampliamente en las herrerías y en alguna que otra pequeña industria; ejemplo de esto, lo constituye el hecho de que a finales del siglo XV Inglaterra exportaba a Francia y a los Países Bajos grandes cantidades de carbón mineral extraído de sus minas.

Pero en realidad, se considera que la verdadera era del carbón comenzó a principios del siglo XVI. El carbón constituyó la principal fuente de energía que sustentó el desarrollo de la era industrial, hasta que fue sustituido por el petróleo gracias al desarrollo del transporte automotor.

El carbón mineral (cuyo nombre vulgar es el de "carbón de piedra"), es un término genérico que se utiliza para designar a un grupo de minerales sólidos de origen vegetal con elevado contenido de carbono, en cuya composición química se encuentra este elemento químico en proporciones variables.

⁵ <https://es.scribd.com/doc/284661083/Propiedades-volumetricas>

El carbón mineral posee además hidrógeno, nitrógeno, azufre y fósforo, entre otros elementos químicos, y las diferentes variedades del mismo están en dependencia del tiempo transcurrido en su formación.

2.11.2 Tipos de carbón

Existen numerosas variedades de carbón, las cuales se pueden clasificar según características como:

Humedad

- Porcentaje en materias minerales no combustibles (cenizas)
- El poder calorífico
- Inflamabilidad, en conexión con el porcentaje de elementos volátiles.

Las variedades del carbón mineral son las siguientes:

Turba

Lignito

Hulla

Antracita: Entre todas las variedades de carbón es la de mejor calidad. Posee entre el 90 y el 97 % de carbono y es el de más antigua formación, constituido por un mineral negro, brillante y sonoro a la percusión, que arde sin dejar humo y deja poca ceniza o materias inertes; un kilogramo de este mineral desprende en su combustión completa entre 33,4 y 37,2 MJ.

Figura 2. 2. Tipos de carbón mineral



Fuente: www.areaciencia.com

2.11.3 Métodos de extracción

Minería por franjas.- La minería por franjas expone el carbón a través de remover las rocas encima de los mantos de carbón en cortes largos o tiras. Las rocas de la primera tira son depositadas en un área fuera del área de minería. Las rocas del corte subsecuente son depositadas como relleno en el corte anterior removido. Usualmente el proceso consiste en taladrar la tira de roca pegada a la tira anteriormente excavada.

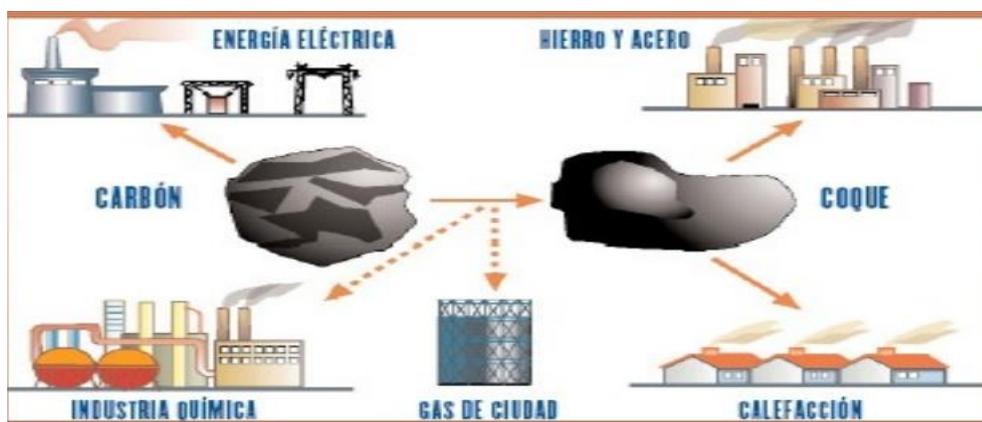
Minería de contorno.- El método de extracción de contorno consiste en retirar el material estéril encima de los mantos de carbón, siguiendo las curvas de nivel a lo largo de una cresta o alrededor de una ladera. Este método se utiliza con mayor frecuencia en zonas escarpadas.

Minería de retiro de cimas montañosas.- La minería de carbón de cima de montaña es una práctica de minería de superficie que implica la remoción de cimas de las montañas para exponer las vetas de carbón, y la eliminación del escombros asociado a la minería en "valles de llenado" adyacentes. El llenado de valles ocurre en terreno escarpado donde hay alternativas de disposición limitadas.

2.11.4 Usos

El carbón suministra el 25 % de la energía primaria consumida en el mundo, solo por detrás del petróleo. Además es de las primeras fuentes de energía eléctrica, con 40 % de la producción mundial (datos de 2006). Las aplicaciones principales del carbón son:

Figura 2. 3. Usos de carbón mineral⁶



⁶ [https://es.scribd.com/doc/3680433201/Carbon mineral](https://es.scribd.com/doc/3680433201/Carbon%20mineral)

CAPÍTULO III
DISEÑO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS Y ANÁLISIS DE
RESULTADOS

3.1 INTRODUCCIÓN

Para realizar el estudio de las propiedades volumétricas es necesario conocer las características propias de los componentes de la mezcla asfáltica y del carbón mineral como filler.

3.2 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Los componentes de la mezcla asfáltica son los agregados pétreos, cemento asfáltico y carbón mineral como filler, para la selección se procedió de la siguiente manera:

3.2.1 Selección de agregados pétreos

Los agregados estudiados en la presente investigación fueron proporcionados por la planta chancadora de Charaja del Servicio Departamental de Caminos de Tarija (SEDECA).

El agregado en bruto se lo extrae del río Camacho de una longitud de 3,5 km con coordenada de inicio 21°49'22" S – 64°47'37" W, hasta coordenada de 21°50'52" S – 64°49'02" W, cumpliendo normas ambientales por parte del municipio de Padcaya.

El agregado adquirido tiene los siguientes tamaños de ¾" (grava), 3/8" (gravilla), 3/16" (arena) y pasa tamiz N° 200 (filler natural convencional polvo de roca). (Ver anexo 1.1)

3.2.2 Selección del cemento asfáltico

El Cemento asfáltico fue adquirido del Gobierno Municipal de la Ciudad de Tarija, el cemento asfáltico convencional es de procedencia STRATURA ASFALTOS S.A., Betupen Plus 85-100 con las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 3. 1. Especificaciones técnicas del cemento asfáltico.

Análisis	Método AASHTO	Especificaciones	Resultados
Penetración 25°C	T-49	85-100	90
Vaso abierto de Cleveland, punto de inflamación °c	T-48	> 230°C	300°C
Viscosidad 60°C (Visc. Saybolt Furol a 130°C)	T-316	Informar	335 seg
Solubilidad en tricloroetileno %	T-44	> 99,00%	
Ductilidad 25°C	T-55	> 100 cm	110°C
Ensayo de la mancha Heptano-Xilol (25% máximo de xilol)	T-102	(-) Negativo	Negativo
Ensayo de la película delgada:			
1. Penetración del residuo % de la penetración original	T-49	Mín. 50	50
2. Pérdida por calentamiento	T-240	Máx. 1	0,95
3. Viscosidad 60°C	T-316	Informar	
4. Ductilidad del residuo, 25°C, 5 cm/min	T-51	Mín. 100	105
Penetración del residuo de perdida, % por calentamiento % original	T-49	> 50	50
% H2O	T-56	Máx. 0,2	0,00

Fuente: Ficha técnica cemento asfáltico, Laboratorio de Asfaltos,
Gobierno Municipal de la ciudad de Tarija. (Anexo 1.2)

3.2.3 Selección del carbón mineral como filler

El carbón mineral es utilizado principalmente en el tratamiento de aguas, purificación de aceites vegetales y azúcar; además de la elaboración de gaseosas, jugos, bebidas alcohólicas, entre otras.

Para la presente investigación se adquirió el carbón mineral de una importadora particular DIEMAF Servicios Integrales, cuyo producto es adquirido de Brasil. Este carbón mineral cuenta con las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 3. 2. Especificaciones técnicas del carbón mineral.

Especificación	Resultado
Estado físico	Sólido
Color	Polvo negro
Olor	Inodoro
Punto de fusión	>3500°C
Punto de ebullición	>4000°C
Punto de inflamación	288-316°C
Solubilidad en agua	Insoluble
Solubilidad en otros disolventes	Soluble en alcohol, glicerina y éter
Humedad	8% máx.
Resistencia a la abrasión	87%
Ph	4-7
Reactividad	Muy poco reactivo, combustible
Estabilidad	Estable bajo condiciones normales
Incompatibilidad	Reacciona violentamente con oxidantes tales como bromatos, cloratos y nitratos.
Productos peligrosos de la descomposición	Monóxido y dióxido de carbono

Fuente: Ficha técnica carbón mineral, DIEMAF Servicios Integrales. (Anexo 1.3)

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Para la caracterización de los componentes de la mezcla asfáltica, se procede de la siguiente manera.

3.3.1 Caracterización de los agregados pétreos

La caracterización de los agregados consiste en determinar las características físico-mecánicas de los materiales grava, gravilla y arena.

3.3.1.1 Ensayo de granulometría AASHTO T-27 (ASTM C-136)

Una propiedad clave de los agregados que se usan en las carreteras es la distribución de los tamaños de partículas al mezclarlos. La graduación de los agregados es la combinación de tamaños de partículas en la mezcla que afecta la densidad, la resistencia, y la economía de la estructura del pavimento.

El objetivo es determinar los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material seco, por medio de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura.

Procedimiento:

- a. Seleccionar un grupo de tamices de tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones del material que se va a ensayar.
- b. Colocar los tamices en orden, por tamaño de abertura.
- c. Limitar la cantidad de material en un tamiz dado, de tal forma que todas las partículas puedan alcanzar las aberturas del tamiz durante la operación del tamizado.
- d. Determinar el peso de la muestra retenida en cada tamiz, con una balanza, el cual se expresa como un porcentaje de la muestra original.

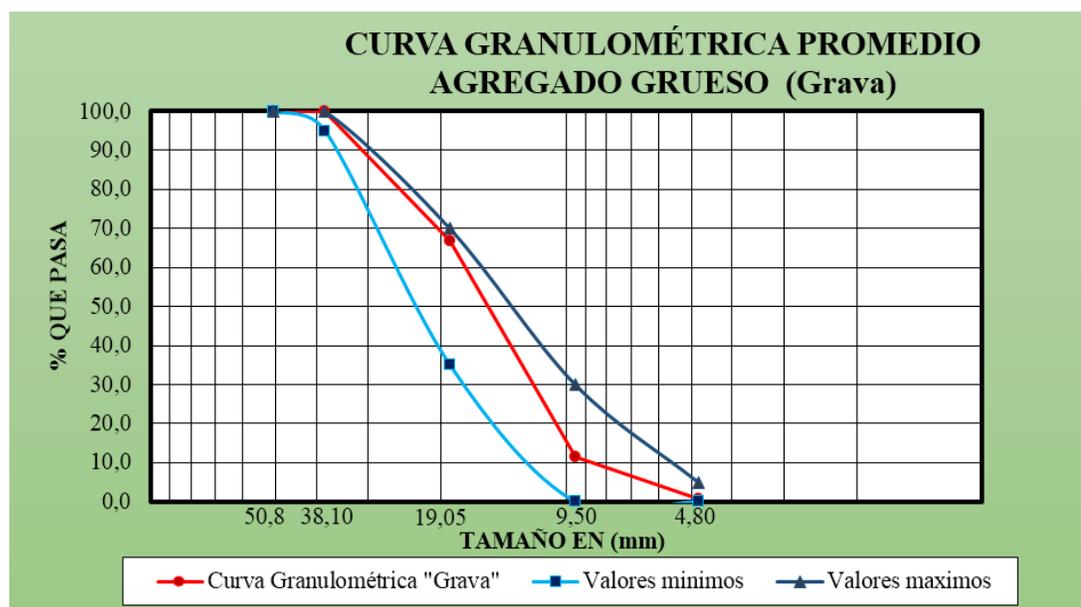
Proceso de cálculo de porcentajes que pasan cada uno de los tamices.

$$\% \text{ Que Pasa} = 100 - \left(\frac{\text{Peso Ret}}{\text{Peso total seco}} * 100 \right)$$

Resultados:**Tabla 3. 3. Tabla granulométrica promedio de la grava.**

Peso Total (gr.)			10000		% Que pasa del total	% Que pasa s/g Especific. ASTM C-33	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Retenido Acumulado (gr)	(%)			
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,0	100	100
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,0	95	100
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,0	-	
3/4"	19,05	3330,90	3330,90	33,31	66,7	35	70
1/2"	12,50	3275,47	6606,37	66,06	33,9	-	-
3/8"	9,50	2261,63	8868,00	88,68	11,3	10	30
N°4	4,80	1050,53	9918,53	99,19	0,8	0	5
BASE	0	81,47	10000,00	100,00	0,0	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 1. Curva granulométrica promedio de la grava.

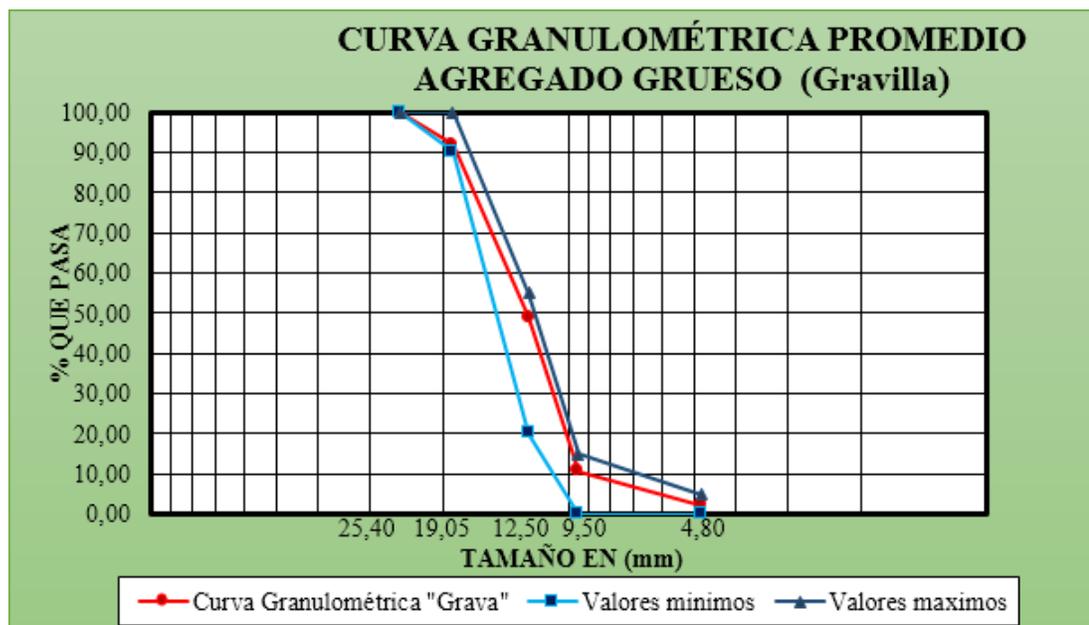
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 4. Tabla granulométrica promedio de la gravilla.

Peso Total (gr.)			10000		% Que pasa del total	% Que pasa s/g Especific. ASTM C-33	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Retenido Acumulado (gr)	(%)			
2 1/2"	63	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,05	818,27	818,27	8,18	91,82	90	100
1/2"	12,50	4292,10	5110,37	51,10	48,90	20	55
3/8"	9,50	3818,47	8928,83	89,29	10,71	0	15
Nº4	4,80	853,40	9782,23	97,82	2,18	0	5
BASE	0	217,77	10000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 2. Curva granulométrica promedio de la gravilla.



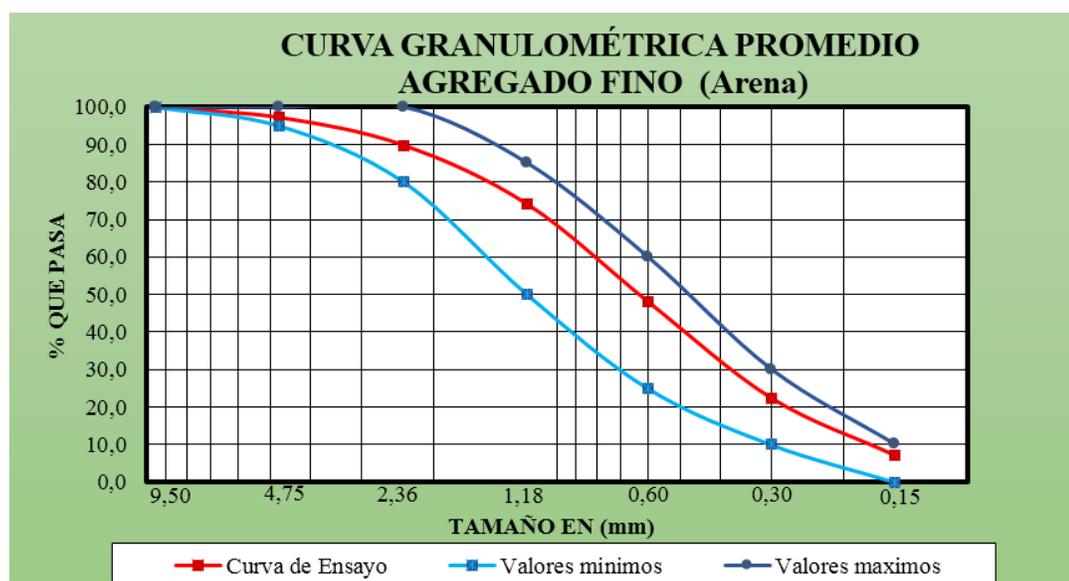
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 5. Tabla granulométrica promedio de la arena.

Peso Total (gr.)			2000		% Que pasa del total	% Que pasa s/g Especific. ASTM C-33	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Retenido Acumulado (gr)	(%)			
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,0	100	100
Nº4	4,75	54,17	54,17	2,71	97,3	95	100
Nº8	2,36	148,40	202,57	10,13	89,9	80	100
Nº16	1,18	315,10	517,67	25,88	74,1	50	85
Nº30	0,60	520,13	1037,80	51,89	48,1	25	60
Nº50	0,30	516,27	1554,07	77,70	22,3	10	30
Nº100	0,15	305,80	1859,87	92,99	7,0	2	10
BASE		140,13	2000,00	100,00	0,0	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 3. Curva granulométrica promedio de la arena.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.2 Ensayo de desgaste mediante la máquina de los ángeles AASHTO T-96 (ASTM C-131)

Los materiales que se usan en los pavimentos de carreteras deberán ser duros y resistir el desgaste debido al efecto de pulido del tránsito y a los efectos abrasivos internos de las cargas repetidas. La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados

es la prueba de abrasión de los ángeles. La máquina que se usa en la prueba de los ángeles consta de un cilindro de acero hueco, cerrado en ambos extremos y montado en ejes en posición horizontal.

La muestra y la carga abrasiva correspondiente se colocan en la máquina de los ángeles, y se hace girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 30 y 33rpm; el número total de vueltas deberá ser 500. La máquina deberá girar de manera, uniforme para mantener una velocidad constante. Una vez cumplido el número de vueltas prescrito, se descarga el material del cilindro y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada, en el tamiz N° 12.

El material retenido en el tamiz se lava, se seca hasta alcanzar una masa constante y se pesa. Se reporta como porcentaje de desgaste la diferencia entre la masa original y la masa fina de la muestra expresada como un porcentaje de la masa original. El método T-96 de AASHTO (ASTM C-131) da un procedimiento detallado para esta prueba.

El tipo de abrasión que se efectuó es de tipo B para la grava mientras que para la gravilla se realizó del tipo C, donde se realizó un solo ensayo para cada uno.

Proceso de cálculo:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso total}} * 100$$

Resultados:

Tabla 3. 6. Desgaste de los ángeles para la grava.

Muestra	Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Promedio (%)	Especificación ASTM
1	B	5000	3806,9	23,86	23,73	35% MAX
2	B	5000	3836,9	23,26		
3	B	5000	3795,9	24,08		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 7. Desgaste de los ángeles para la gravilla.

Muestra	Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Promedio (%)	Especificación ASTM
1	C	5000	3755,3	24,89	24,93	35% MAX
2	C	5000	3738,1	25,24		
3	C	5000	3766,4	24,67		

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.3 Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos AASHTO T-85 (ASTM C-127)

El peso específico y la absorción de los agregados son propiedades importantes que se requieren para el diseño de concreto y de mezclas bituminosas. La densidad relativa de un sólido es la razón de su masa a la de un volumen igual de agua destilada a una temperatura específica.

Procedimiento:

- a. Para realizar el ensayo se deberá realizar:
- b. Cuartear el agregado grueso más o menos 5kg lavados y retenidos en la malla N°4 (4,75mm), se secan a peso constante.
- c. La muestra seca se sumerge por 24 horas en agua.
- d. Los agregados se sacan del agua.
- e. Se obtiene el peso de la muestra en su condición superficialmente seca.
- f. La muestra saturada superficialmente seca se coloca en una cesta de alambre y se determina el peso sumergido en agua.
- g. La muestra se seca al horno hasta obtener peso constante.

Para este ensayo se realizó la medición del peso específico tanto para la grava 3/4" como para la gravilla 3/8".

Proceso de cálculo para agregados gruesos:

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{b}{a - c}$$

$$\text{P.E.A. saturado de superficie seca} = \frac{a}{a - c}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{b}{b - c}$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{b - a}{b} * 100\%$$

Resultados:

Tabla 3. 8. Resultados de peso específico de la grava.

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	5000,00	5038,80	3095,20	2,57	2,59	2,62	0,78
2	5000,00	5044,50	3107,30	2,58	2,60	2,64	0,89
3	5000,00	5033,40	3097,10	2,58	2,60	2,63	0,67
Promedio				2,58	2,60	2,63	0,78

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 9. Resultados de peso específico de la gravilla.

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	5000,00	5054,60	3145,20	2,62	2,65	2,70	1,09
2	5000,00	5062,90	3145,80	2,61	2,64	2,70	1,26
3	5000,00	5058,60	3151,60	2,62	2,65	2,71	1,17
Promedio				2,62	2,65	2,70	1,17

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.4 Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados finos AASHTO T-84 (ASTM C-128)

Mediante este ensayo podemos determinar el peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, este valor expresado en porcentaje en peso. Se define como peso específico aparente a la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

Proceso de cálculo de peso específico agregado fino:

$$\text{Peso específico seco} = \frac{a}{(x+w) - b}$$

$$\text{P.E.A. Saturado superficial seco} = \frac{x}{(x+w) - b}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{a}{(a+w) - b}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{x - a}{a} * 100\%$$

Resultados:

Tabla 3. 10. Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino.

Muestra N°	Peso muestra "B" (gr)	Peso de matraz (gr)	Muestra + matraz + agua (gr)	Peso del agua agregado al matraz "W" (ml) ó (gr)	Peso muestra secada "A" (gr)	Volumen del matraz "V" (ml)	P. E. a granel (gr/cm ³)	P. E. Saturado con sup. seca (gr/cm ³)	P. E. aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	500	177,3	967,8	290,50	462,40	500,00	2,21	2,39	2,69	7,52
2	500	177,3	968,5	291,20	464,30	500,00	2,22	2,39	2,68	7,14
3	500	177,3	967,2	289,90	461,50	500,00	2,20	2,38	2,69	7,70
Promedio							2,21	2,39	2,69	7,45

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.5 Ensayo de peso unitario agregados AASHTO T-19 (ASTM C-29)

El peso unitario de unos áridos dados puede determinarse sobre volumen suelto o sobre volumen compactado. Para ello se emplea un recipiente cilíndrico de volumen conocido.

Procedimiento:

- Se deberá realizar de la siguiente manera:
- Para medir el peso unitario con áridos sueltos, se llena el recipiente por un procedimiento normalizado y se determina el peso de los áridos contenidos en el recipiente lleno.
- Para medir el peso compactado, se llena el recipiente en tres capas aproximadamente iguales, aplicando a cada capa determinados procedimientos de agitación o apisonado según el tamaño de los áridos empleados en el ensayo.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-19 y ASTM C-29.

Proceso de cálculo del peso unitario:

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

Resultados:

Tabla 3. 11. Resultados del ensayo de peso unitario suelto de la grava.

Peso unitario suelto					
Muestra N°	Peso Recipiente (gr)	Volumen Recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso Unitario suelto (gr/cm3)
1	5650,00	10000,00	19925,00	14275,00	1,428
2	5650,00	10000,00	19880,00	14230,00	1,423
3	5650,00	10000,00	19895,00	14245,00	1,425
Promedio					1,425

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 12. Resultados del ensayo de peso unitario compactado de la grava.

Peso unitario compactado					
Muestra N°	Peso Recipiente (gr)	Volumen Recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso Unitario suelto (gr/cm3)
1	5650,00	10000,00	21040,00	15390,00	1,539
2	5650,00	10000,00	21050,00	15400,00	1,540
3	5650,00	10000,00	21065,00	15415,00	1,542
Promedio					1,540

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 13. Resultados del ensayo de peso unitario suelto de la gravilla.

Peso unitario suelto					
Muestra N°	Peso Recipiente (gr)	Volumen Recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso Unitario suelto (gr/cm3)
1	5650,00	10000,00	19295,00	13645,00	1,365
2	5650,00	10000,00	19280,00	13630,00	1,363
3	5650,00	10000,00	19405,00	13755,00	1,376
Promedio					1,368

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 14. Resultados del ensayo de peso unitario compactado de la gravilla.

Peso unitario compactado					
Muestra N°	Peso Recipiente (gr)	Volumen Recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso Unitario suelto (gr/cm3)
1	5650,00	10000,00	20405,00	14755,00	1,476
2	5650,00	10000,00	20425,00	14775,00	1,478
3	5650,00	10000,00	20450,00	14800,00	1,480
Promedio					1,478

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 15. Resultados del ensayo de peso unitario suelto de la arena.

Peso unitario suelto					
Muestra N°	Peso Recipiente (gr)	Volumen Recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso Unitario suelto (gr/cm3)
1	2610,00	3000,00	7055,00	4445,00	1,482
2	2610,00	3000,00	7085,00	4475,00	1,492
3	2610,00	3000,00	7120,00	4510,00	1,503
Promedio					1,492

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 16. Resultados del ensayo de peso unitario compactado de la arena.

Peso unitario compactado					
Muestra N°	Peso Recipiente (gr)	Volumen Recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso Unitario suelto (gr/cm3)
1	2610,00	3000,00	7930,00	5320,00	1,773
2	2610,00	3000,00	7860,00	5250,00	1,750
3	2610,00	3000,00	8005,00	5395,00	1,798
Promedio					1,774

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.6 Ensayo de equivalente de arena AASHTO T-176 (ASTM D-2419)

Este ensayo, indica la proporción relativa de polvo fino o materiales arcillosos perjudiciales contenidos en los áridos empleados en las mezclas asfálticas para pavimentación y en los suelos empleados en capas de base. El ensayo se aplica a la fracción que pasa por el tamiz N°4.

Se coloca una muestra del material en estudio en un cilindro graduado transparente que contiene una solución de cloruro cálcico, glicerina y formaldehído en agua. La muestra y la solución se agitan vigorosamente de una forma normalizada.

Se emplea la misma solución para impulsar el material arcilloso hacia arriba, haciéndolo salir de la muestra a medida que se llena el cilindro, introduciéndola a presión en el fondo mediante un tubo delgado.

Después de un período de sedimentación de 20 minutos se lee en la graduación del recipiente la altura máxima de la suspensión de arcilla.

A continuación, se introduce en el cilindro un disco pesado de metal que se hace bajar hasta que descansa sobre la parte superior de la arena limpia y se lee la altura de la superficie inferior del disco. Se llama equivalente de arena a la relación de la lectura correspondiente a la superficie superior de la arena a la correspondiente a la capa superior de la arcilla multiplicada por 100. Los aparatos y procedimiento para la realización de este ensayo se describen en el método AASTHO T-176.

Proceso de cálculo:

$$\% \text{ de arena} = \frac{\text{Lectura nivel inferior}}{\text{Lectura nivel superior}} * 100\%$$

Resultados:

Tabla 3. 17. Resultados del ensayo equivalente de arena.

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,70	10,10	96,04
2	9,90	10,30	96,12
3	9,40	9,80	95,92
Promedio			96,02
Especificaciones			> 50%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Caracterización del carbón mineral

3.3.2.1 Ensayo de peso específico y absorción del carbón mineral AASHTO T-100 (ASTM D-854)

Este método establece el procedimiento para determinar, mediante un picnómetro, la densidad de partículas de suelos compuestos por partículas menores que 5mm. Cuando el suelo se compone de partículas mayores que 5mm, se debe aplicar el rentado de determinación de densidad neta de los gruesos, según el método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

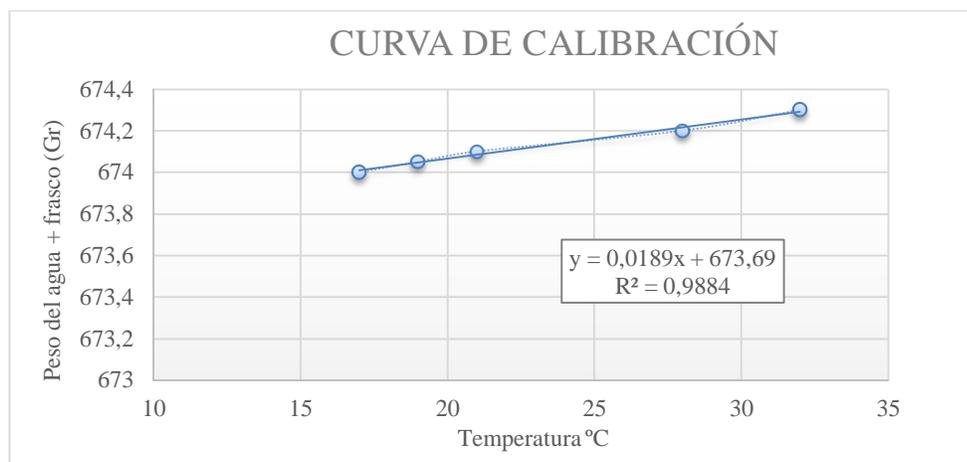
Cuando el suelo se compone tanto de partículas mayores como menores que 5mm, separe en el tamiz N°4 (4,75mm), determine y registre el porcentaje en masa seca de ambas fracciones y ensáyese con el método correspondiente. El resultado es el procedimiento ponderado de ambas fracciones.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-100 y ASTM D-854.

Tabla 3. 18. Datos de la calibración de frasco volumétrico.

Número de ensayo	Wfw (gr)	T (° C)
1	674,3	32
2	674,2	28
3	674,1	21
4	674,1	19
5	674,0	17

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 4. Curva de calibración del frasco volumétrico.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 19. Datos de ensayo de peso específico del carbón mineral.

Numero de ensayo	1	2	3	4	5	6	7	Promedio
Temperatura ensayada °C	30,00	29,00	26,00	22,00	20,00	18,00	16,00	
Peso del suelo seco Ws	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	
Peso del frasco + agua Wfw	674,26	674,24	674,18	674,11	674,07	674,03	673,99	
Peso del frasco + agua + suelo Wfws	745,50	745,40	745,20	745,00	744,8	744,7	744,6	
Peso específico (g/cm ³)	9,136	9,052	8,907	8,786	8,632	8,574	8,518	
Factor de corrección K	0,9974	0,9977	0,9986	0,9996	1,0000	1,0004	1,0009	
Peso específico corregido (g/cm ³)	9,159	9,073	8,920	8,789	8,632	8,571	8,510	8,808

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.2 Análisis granulométrico con el método del hidrómetro ASTM D-422

El análisis hidrométrico se basa en la ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente de un fluido, con el diámetro de la esfera. Se requiere el peso en su estado seco, pudiendo haber variantes de acuerdo a las características del suelo ensayado, así, por ejemplo: limo y arcillas (que pasa el tamiz N°200) 60 a 80 gramos.

Hay dos opciones para obtener el peso de la muestra, que se seque antes del ensayo o después del ensayo. Si la muestra se seca antes del ensayo, entonces, entonces se anota el

valor de peso de suelo seco. Si la muestra se seca después del ensayo, hay que transportar toda la suspensión a un recipiente para luego introducirla al horno, luego hay que restar el peso del defloculante.

Resultados:

Tabla 3. 20. Tabla granulométrica de hidrómetro del carbón mineral.

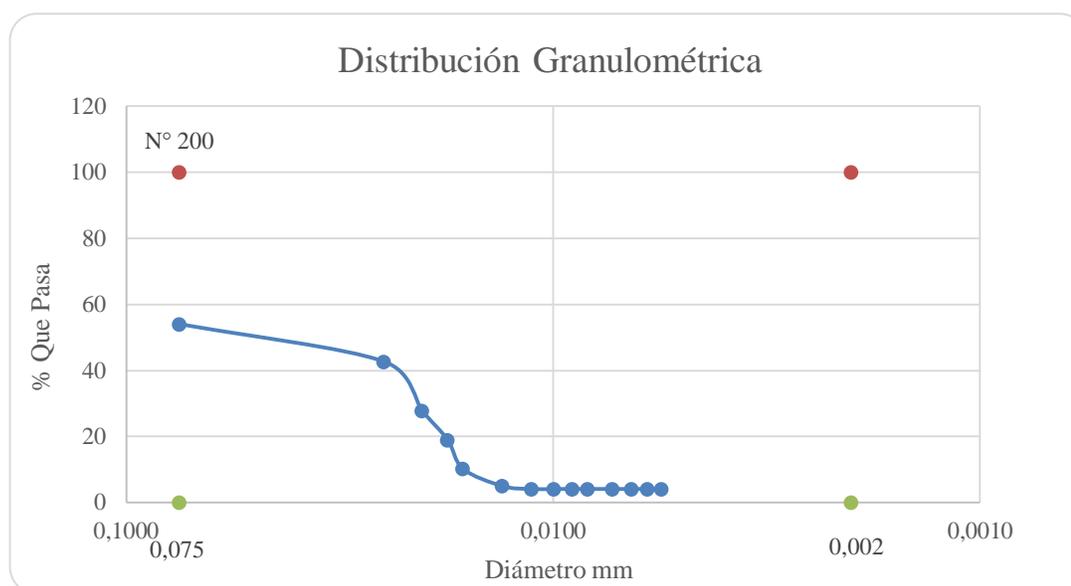
Hora de Lectura	Tiempo Transc. min.	Temp. °c.	Lectura Real R'	Lectura Correg R.	Prof. Efec. L	Constante K Tabla	L/t	Ct	Lectura Correg Rc.	Diam. Partícula mm	% Mas Fino
9:04	0	23	60	61	6,5	0,0120	0	0,700	61,700	0,075	53,99
9:06	2	23	47	48	8,6	0,0120	4,300	0,700	48,700	0,0249	42,61
9:08	4	23	30	31	11,4	0,0120	2,850	0,700	31,700	0,0203	27,74
9:10	6	23	20	21	13	0,0120	2,167	0,700	21,700	0,0177	18,99
9:12	8	23	10	11	14,7	0,0120	1,838	0,700	11,700	0,0163	10,24
9:17	13	23	4	5	15,6	0,0120	1,200	0,700	5,700	0,0131	4,99
9:22	18	23	3	4	15,8	0,0120	0,878	0,700	4,700	0,0112	4,11
9:27	23	23	3	4	15,8	0,0120	0,687	0,700	4,700	0,0099	4,11
9:32	28	23	3	4	15,8	0,0120	0,564	0,700	4,700	0,0090	4,11
9:37	33	23	3	4	15,8	0,0120	0,479	0,700	4,700	0,0083	4,11
9:47	43	23	3	4	15,8	0,0120	0,367	0,700	4,700	0,0073	4,11
9:57	53	23	3	4	15,8	0,0120	0,298	0,700	4,700	0,0066	4,11
10:07	63	23	3	4	15,8	0,0120	0,251	0,700	4,700	0,0060	4,11
10:17	73	23	3	4	15,8	0,0120	0,216	0,700	4,700	0,0056	4,11
10:27	83	23	3	4	15,8	0,0120	0,190	0,700	4,700	0,0052	4,11
8:00	1376	21	3	4	15,8	0,0122	0,011	0,200	4,200	0,0013	3,68
8:00	2816	21	3	4	15,8	0,0122	0,006	0,200	4,200	0,0009	3,68

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 21. Resultados granulométricos del carbón mineral.

% Pasa 200	100,00
% Limo parcial	96,19
% Arcilla parcial	3,81

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 5. Distribución granulométrica del carbón mineral.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Caracterización del cemento asfáltico

Para caracterizar y evaluar el comportamiento del cemento asfáltico, es necesario realizar los diversos ensayos, para conocer el comportamiento a escala real, en este capítulo realizaremos una breve descripción de los diversos ensayos sobre el cemento asfáltico.

3.3.3.1 Ensayo de penetración AASHTO T-49 (ASTM D-5)

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100gr y que la carga se aplica durante 5seg.

La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal. La unidad penetración es la décima de milímetro. Es evidente que cuando más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración.

Los betunes asfálticos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración. El instituto del asfalto ha adoptado cuatro grados de betún asfáltico para pavimentación con penetraciones comprendidas dentro de los márgenes siguientes: 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300. Además, el instituto tiene especificaciones para un betún asfáltico de penetración comprendida en el margen 40-50, que se usa en aplicaciones especiales e industriales. Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el método AASHTO T-49 y en el ASTM D-5.

Resultados:

Tabla 3. 22. Resultados del Ensayo Penetración del Cemento Asfáltico 85-100.

Descripción		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg. (0,1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	0,1 mm	90	89	91
	Lectura N°2	0,1 mm	94	91	92
	Lectura N°3	0,1 mm	92	89	95
	Promedio	0,1 mm	91		

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.2 Ensayo punto de inflamación AASHTO T-48 (ASTM D-92)

El punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos.

El punto de inflamación de un betún asfáltico se mide por el ensayo del vaso abierto Cleveland según condiciones normalizadas prescritas en los métodos AASHTO T-48 y

ASTM D-92. Un vaso abierto de latón se llena parcialmente con betún asfáltico y se calienta a una velocidad establecida. Se hace pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define como punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina.

Resultados:

Tabla 3. 23. Resultados del ensayo punto de inflamación.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	279	295	280
Promedio	°C	285		

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.3 Ensayo peso específico del asfalto AASHTO T-43 (ASTM D-70)

Aunque normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del betún asfáltico que se emplea. Este conocimiento es útil para hacer las correcciones de volumen cuando éste se mide a temperaturas elevadas. Se emplea como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactadas. El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas.

Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada. El peso específico del betún asfáltico se determina normalmente por el método del picnómetro, descrito en los métodos AASHTO T-43 y ASTM D-70.

Proceso de cálculo:

$$\text{Peso específico cemento asfáltico} = \frac{c}{b + (c - a) - d}$$

Resultados:

Tabla 3. 24. Resultados del ensayo peso específico.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso picnómetro (a)	g	36,8	35,1	33,7
Peso picnómetro + agua (25°C) (b)	g	88,5	84,7	85,3
Peso picnómetro + muestra (c)	g	64,4	62	61,7
Peso picnómetro + agua + muestra (d)	g	89,2	85,2	85,7
Peso Específico Promedio	g/cm ³	1,023	1,016	1,012
Peso Específico Promedio	g/cm³	1,017		

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.4 Ensayo punto de ablandamiento AASHTO T-53 (ASTM D-36)

Los asfaltos de diferentes tipos se ablandan a temperaturas diferentes. El punto de ablandamiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentación, se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura a que estos asfaltos se hacen fluidos.

Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una velocidad determinada y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se llama punto de ablandamiento del asfalto.

Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en los métodos AASHTO T-53 y ASTM D-36.

Resultados:**Tabla 3. 25. Resultados del ensayo punto de ablandamiento.**

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de ablandamiento	°C	47,0	48,0	47,0
Promedio	°C	47		

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.5 Ensayo ductilidad AASHTO T-51 (ASTM D-113)

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm a la cual se alarga antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra y de la forma descrita en la gráfica se traccionan a la velocidad y temperatura especificada. A menos que otra condición se especifique. El ensayo se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ y a una velocidad de $5\text{cm}/\text{min.} \pm 5\%$. Para otras temperaturas deberán especificarse la velocidad.

Tabla 3. 26. Datos del ensayo de ductilidad.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	109	101	111
Promedio	cm	107		

Fuente: Elaboración propia.

3.4 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Para realizar el diseño de una mezcla asfáltica, primero se debe contar con la información básica, como se detalla a continuación:

3.4.1 Resultados previos de la caracterización**3.4.1.1 Resultados de los agregados pétreos**

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que son comparados con las especificaciones propuestas por la norma ASTM.

Tabla 3. 27. Resultados de la caracterización de los agregados pétreos.

Ensayo	Agregados	Tamiz	Especificación		Resultado	ASTM
			Mín.	Máx.		
Granulometría (% pasa)	Grava	2"	100	100	100	C- 33
		1 ½"	95	100	100	
		1	-	-	100	
		¾"	35	70	66,7	
		½"	-	-	33,9	
		3/8"	10	30	11,3	
	Gravilla	Nº4	0	5	0,8	C- 33
		1	100	100	100	
		¾"	90	100	91,82	
		½"	20	55	48,9	
	Arena	3/8"	0	15	10,71	C- 33
		Nº4	0	5	2,18	
		3/8"	100	100	100	
		Nº4	95	100	97,3	
		Nº8	80	100	89,9	
Nº16		50	85	74,1		
Nº30	25	60	48,1			
Nº100	10	30	22,3			
Nº200	2	10	7			
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Grava	-	35%	23,73%	C-131	
	Gravilla	-	35%	24,93%		
Peso específico	Grava	-	-	2,63 gr/cm ³	C-127	
	Gravilla	-	-	2,70 gr/cm ³		
	Arena	-	-	2,69gr/cm ³	C-128	
Peso unitario suelto	Grava	-	-	1,425gr/cm ³	C-29	
	Gravilla	-	-	1,368gr/cm ³		
	Arena	-	-	1,492gr/cm ³		
Equivalente de arena	Arena	50%	-	96,02%	D-2419	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2 Resultados del carbón mineral

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que son comparados con las especificaciones propuestas por la norma ASTM.

Tabla 3. 28. Resultados de la caracterización del carbón mineral.

Ensayo	Filler	Resultado	ASTM
Peso específico	Carbón mineral	8,808 gr/cm ³	D-854
Hidrómetro (% arcilla)	Carbón mineral	3,81 %	D-422

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.3 Resultados del cemento asfáltico

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que son comparados con las especificaciones propuestas por la norma ASTM.

Tabla 3. 29. Resultados de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico.

Ensayo	Especificación		Resultado	Norma
	Mínimo	Máximo		
Peso específico	1	1,05	1,017 gr/cm ³	ASTM D-70
Punto de ablandamiento	41,5	53,5	47°C	ASTM D-36
Punto de inflamación	232	-	285°C	ASTM D-92
Penetración	85	100	91 mm	ASTM D-5
Ductilidad	100	-	107 cm	ASTM D-102

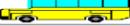
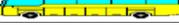
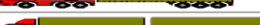
Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Metodología de diseño

La metodología de diseño aplicado es por el método Marshall, que, para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico de una mezcla asfáltica, aplica muchos criterios, uno de los más importantes para realizar el diseño es el tipo de tráfico en donde será aplicada la carpeta asfáltica.

Para tráfico pesado comprenden todas las movibilidades mayores a 8,2 toneladas como se observa en la tabla 3.30

Tabla 3. 30. Clasificación de Vehículos por tipo de ejes Administradora Boliviana de carreteras

CONFIGURACIÓN VEHICULAR POR TIPO DE EJES		
Código	Tipo de Vehículos	Figura
1	Automóviles y Vagonetas	
2	Camionetas (hasta 2 Tn.)	
3	Minibuses (hasta 15 pasajeros)	
MB	Microbuses (hasta 21 pasajeros; de 2 ejes)	
B2	Buses Medianos (hasta 35 pasajeros; de 2 ejes)	
B3	Buses Grandes (más de 35 pasajeros; de 3 ejes)	
C2m	Camiones Medianos (de 2,5 a 10,0 t; de 2 ejes)	
C2	Camiones Grandes (más de 10,0 t; de 2 ejes)	
C3	Camiones Grandes (más de 10,0 t; de 3 ejes)	
CSR	Camiones Semiremolque	
CR	Camiones Remolque	
12	Otros Vehículos	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 31. Clasificación de Vehículos

Servicio	Publico	Privado
Livianos	Automóvil (taxi)	automóvil
		jeep
		Vagoneta
		camioneta
		minibús
Medianos	microbús	Camiones medianos
		furgones
Pesados	ómnibus	volvo
		volqueta
		Camión
		Tractor-camión

Fuente: Manual de carreteras SIECA 2º Edición marzo 2004

El presente trabajo se enfoca en la aplicación para carreteras de tráfico pesado, por ello, como se observa en la tabla 3.32, todas las briquetas se realizan con 75 golpes por cara, luego los resultados obtenidos son analizados a partir de las especificaciones del Instituto del Asfalto, donde especifican rangos mínimos y máximos de las propiedades Marshall para mezclas asfálticas de tráfico pesado.

Tabla 3. 32. Criterios de diseño de mezclas Marshall

Método Marshall	Tráfico liviano		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad, (N)	3336	-	5338	-	8006	-
(lb)	750	-	1200	-	1800	-
Flujo, (0,01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Manual del Instituto del Asfalto, 2003.

Otro punto que considerar para el diseño es determinar la densidad de la mezcla asfáltica. En la presente investigación se realiza el diseño para una mezcla densa, cuyo porcentaje de asfalto óptimo será el promedio de los límites de vacíos de aire, igual a 4%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas

comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 3.32). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

3.4.3 Diseño granulométrico

A continuación, se muestran el resumen de las granulometrías formadas con los promedios.

Tabla 3. 33. Pesos retenidos por cada tipo de agregado, para diseñar las granulometrías Marshall

Tamices	tamaño (mm)	Grava * Peso Ret. (gr)	Gravilla * Peso Ret. (gr)	Arena * Peso Ret. (gr)	Filler * Peso Ret. (gr)
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	3330,90	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	3275,47	818,27	0,00	0,00
3/8"	9,50	2261,63	4292,10	0,00	0,00
Nº4	4,75	1050,53	3818,47	270,83	0,00
Nº8	2,36	81,47	853,40	742,00	0,00
Nº16	1,18	0,00	217,77	1575,50	0,00
Nº30	0,60	0,00	0,00	2600,67	0,00
Nº50	0,30	0,00	0,00	2581,33	0,00
Nº100	0,15	0,00	0,00	1529,00	0,00
Nº200	0,075	0,00	0,00	700,67	0,00
BASE	-	0,00	0,00	0,00	10000,00
PESO TOTAL		10000,0	10000,0	10000,0	10000,0

Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño de dicha faja se utilizarán los materiales de los que se disponía, tanto para el agregado grueso como para el fino, con lo cual se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 20% de agregado grueso grava, 35% de gravilla, 45% de agregado arena, sin embargo, el % de filler (carbón mineral) irá aumentando cada 1% desde 0% hasta el 5% y para poder estudiar el comportamiento del carbón mineral a varios porcentajes.

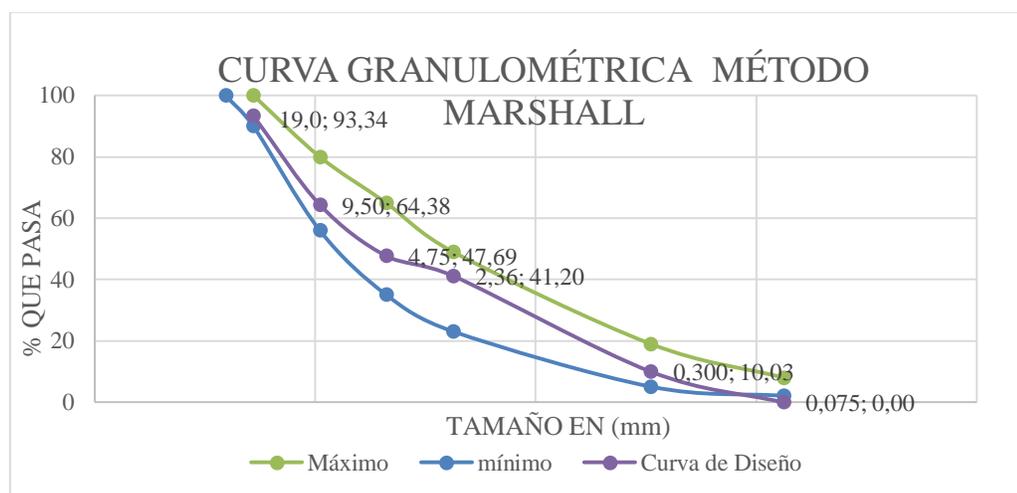
En las siguientes tablas se presentan los pesos del material retenidos y el peso del material que pasa en cada tamiz tanto para el agregado grueso, fino y el filler

Tabla 3. 34. Granulometría formada con 0% carbón mineral

Tamices	Grava (%) 20,00	Gravilla (%) 35,00	Arena (%) 45,00	Filler (%) 0,00	Curva de dosificación				Especificaciones	
					Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
					100,00				Mínimo	Máximo
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	666,18	0,00	0,00	666,18	666,18	666,18	6,66	93,34	90	100
1/2"	655,09	286,39	0,00	941,49	941,49	1607,67	16,08	83,92	-	-
3/8"	452,33	1502,24	0,00	1954,56	1954,56	3562,23	35,62	64,38	56	80
Nº4	210,11	1336,46	121,88	1668,45	1668,45	5230,67	52,31	47,69	35	65
Nº8	16,29	298,69	333,90	648,88	648,88	5879,56	58,80	41,20	23	49
Nº16	0,00	76,22	708,98	785,19	785,19	6664,75	66,65	33,35	-	-
Nº30	0,00	0,00	1170,30	1170,30	1170,30	7835,05	78,35	21,65	-	-
Nº50	0,00	0,00	1161,60	1161,60	1161,60	8996,65	89,97	10,03	5	19
Nº100	0,00	0,00	688,05	688,05	688,05	9684,70	96,85	3,15	-	-
Nº200	0,00	0,00	315,30	315,30	315,30	10000,00	100,00	0,00	2	8
BASE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 6. Curva granulométrica formada diseño Marshall con 0% carbón mineral.



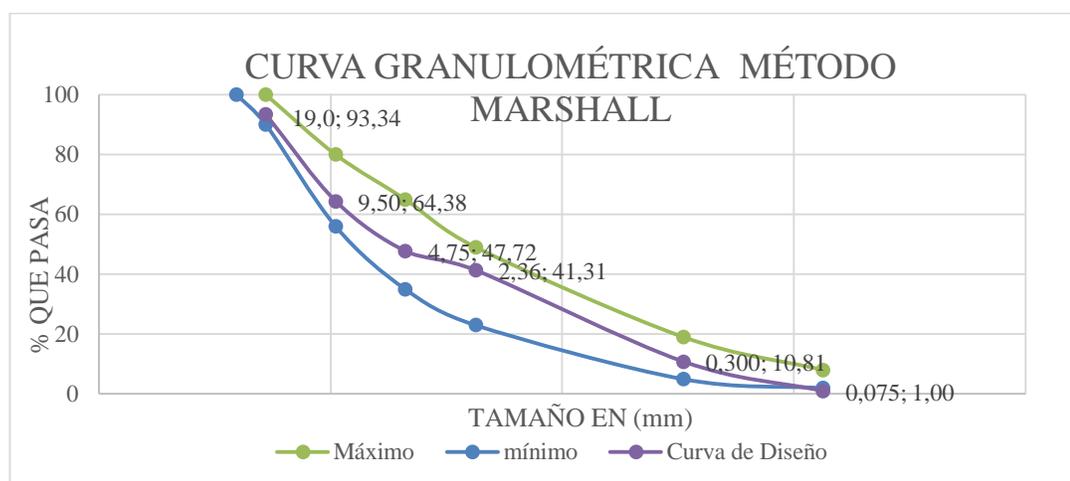
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 35. Granulometría formada con 1% carbón mineral

Tamices	Grava (%) 20,00	Gravilla (%) 35,00	Arena (%) 44,00	Filler (%) 1,00	Curva de dosificación				Especificaciones	
					Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
					100,00				Mínimo	Máximo
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	666,18	0,00	0,00	0,00	666,18	666,18	6,66	93,34	90	100
1/2"	655,09	286,39	0,00	0,00	941,49	1607,67	16,08	83,92	-	-
3/8"	452,33	1502,24	0,00	0,00	1954,56	3562,23	35,62	64,38	56	80
Nº4	210,11	1336,46	119,17	0,00	1665,74	5227,97	52,28	47,72	35	65
Nº8	16,29	298,69	326,48	0,00	641,46	5869,43	58,69	41,31	23	49
Nº16	0,00	76,22	693,22	0,00	769,44	6638,87	66,39	33,61	-	-
Nº30	0,00	0,00	1144,29	0,00	1144,29	7783,16	77,83	22,17	-	-
Nº50	0,00	0,00	1135,79	0,00	1135,79	8918,95	89,19	10,81	5	19
Nº100	0,00	0,00	672,76	0,00	672,76	9591,71	95,92	4,08	-	-
Nº200	0,00	0,00	308,29	0,00	308,29	9900,00	99,00	1,00	2	8
BASE	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	10000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 7. Curva granulométrica formada diseño Marshall con 1% carbón mineral.



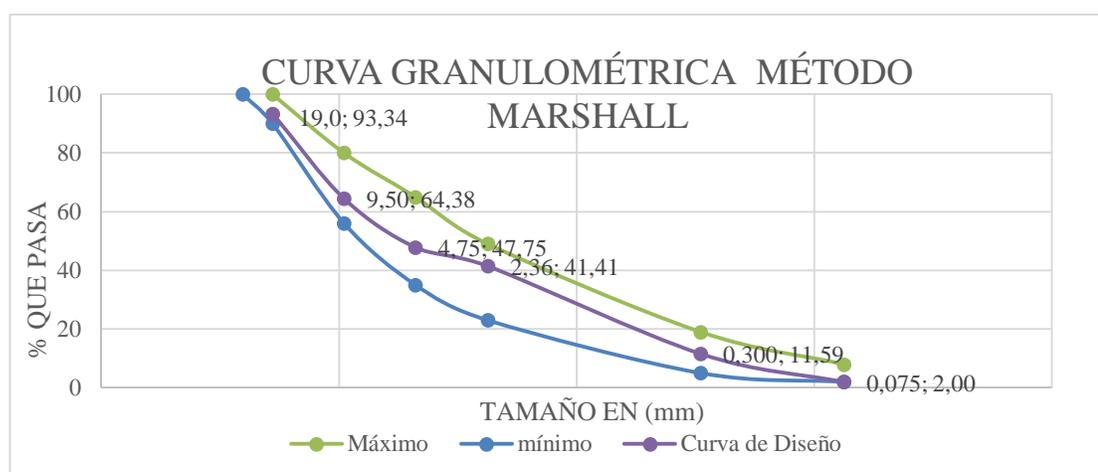
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 36. Granulometría formada con 2% carbón mineral

Tamices	Grava (%)	Gravilla (%)	Arena (%)	Filler (%)	Curva de dosificación				Especificaciones	
					Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515 Mínimo	Máximo
	20,00	35,00	43,00	2,00	100,00					
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	666,18	0,00	0,00	0,00	666,18	666,18	6,66	93,34	90	100
1/2"	655,09	286,39	0,00	0,00	941,49	1607,67	16,08	83,92	-	-
3/8"	452,33	1502,24	0,00	0,00	1954,56	3562,23	35,62	64,38	56	80
Nº4	210,11	1336,46	116,46	0,00	1663,03	5225,26	52,25	47,75	35	65
Nº8	16,29	298,69	319,06	0,00	634,04	5859,30	58,59	41,41	23	49
Nº16	0,00	76,22	677,47	0,00	753,68	6612,98	66,13	33,87	-	-
Nº30	0,00	0,00	1118,29	0,00	1118,29	7731,27	77,31	22,69	-	-
Nº50	0,00	0,00	1109,97	0,00	1109,97	8841,24	88,41	11,59	5	19
Nº100	0,00	0,00	657,47	0,00	657,47	9498,71	94,99	5,01	-	-
Nº200	0,00	0,00	301,29	0,00	301,29	9800,00	98,00	2,00	2	8
BASE	0,00	0,00	0,00	200,00	200,00	10000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 8. Curva granulométrica formada diseño Marshall con 2% carbón mineral.



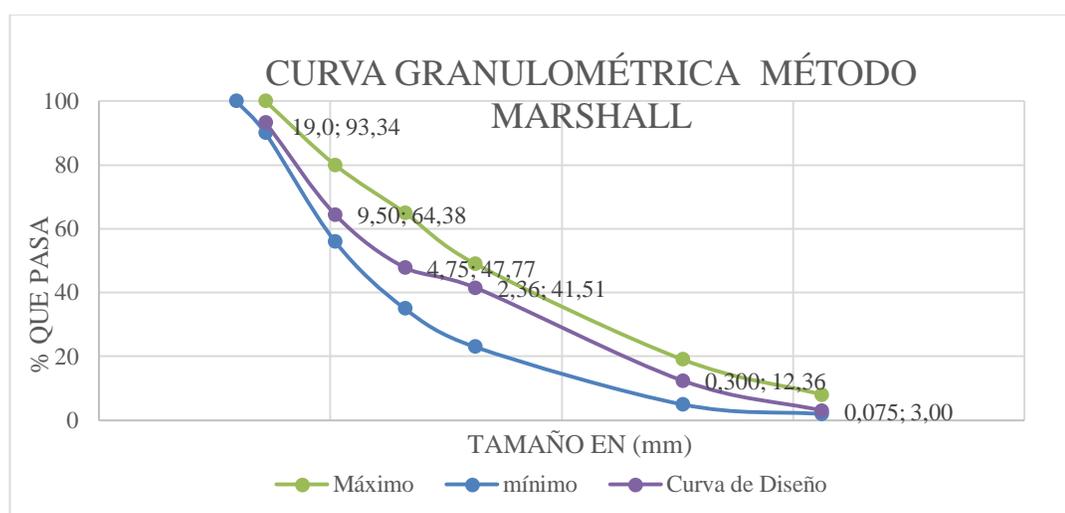
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 37. Granulometría formada con 3% carbón mineral

Tamices	Grava (%)	Gravilla (%)	Arena (%)	Filler (%)	Curva de dosificación				Especificaciones	
					Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515 Mínimo	Máximo
	20,00	35,00	42,00	3,00	100,00					
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	666,18	0,00	0,00	0,00	666,18	666,18	6,66	93,34	90	100
1/2"	655,09	286,39	0,00	0,00	941,49	1607,67	16,08	83,92	-	-
3/8"	452,33	1502,24	0,00	0,00	1954,56	3562,23	35,62	64,38	56	80
Nº4	210,11	1336,46	113,75	0,00	1660,32	5222,55	52,23	47,77	35	65
Nº8	16,29	298,69	311,64	0,00	626,62	5849,17	58,49	41,51	23	49
Nº16	0,00	76,22	661,71	0,00	737,93	6587,10	65,87	34,13	-	-
Nº30	0,00	0,00	1092,28	0,00	1092,28	7679,38	76,79	23,21	-	-
Nº50	0,00	0,00	1084,16	0,00	1084,16	8763,54	87,64	12,36	5	19
Nº100	0,00	0,00	642,18	0,00	642,18	9405,72	94,06	5,94	-	-
Nº200	0,00	0,00	294,28	0,00	294,28	9700,00	97,00	3,00	2	8
BASE	0,00	0,00	0,00	300,00	300,00	10000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 9. Curva granulométrica formada diseño Marshall con 3% carbón mineral.



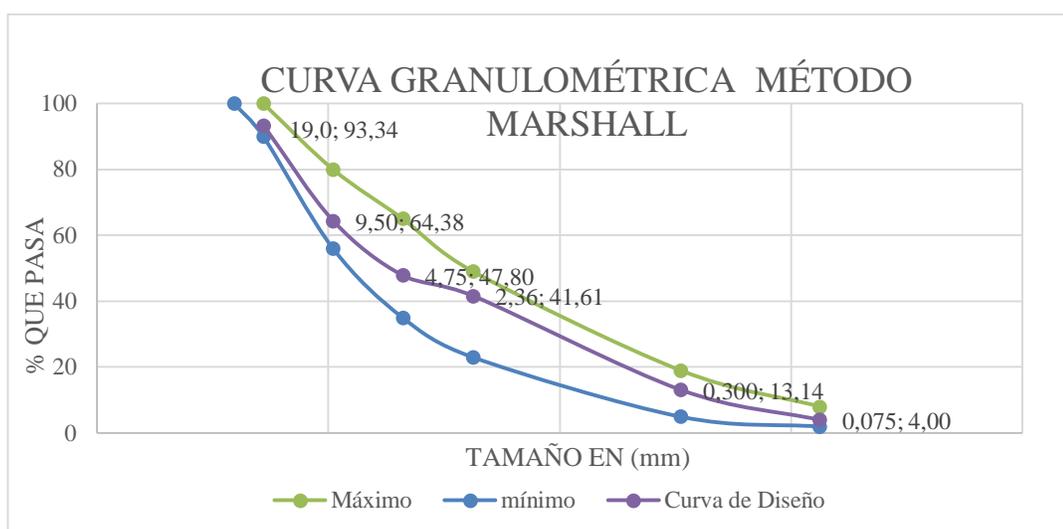
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 38. Granulometría formada con 4% carbón mineral

Tamices	Grava (%)	Gravilla (%)	Arena (%)	Filler (%)	Curva de dosificación				Especificaciones	
					Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515 Mínimo	Máximo
	20,00	35,00	41,00	4,00	100,00					
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	666,18	0,00	0,00	0,00	666,18	666,18	6,66	93,34	90	100
1/2"	655,09	286,39	0,00	0,00	941,49	1607,67	16,08	83,92	-	-
3/8"	452,33	1502,24	0,00	0,00	1954,56	3562,23	35,62	64,38	56	80
Nº4	210,11	1336,46	111,04	0,00	1657,61	5219,84	52,20	47,80	35	65
Nº8	16,29	298,69	304,22	0,00	619,20	5839,04	58,39	41,61	23	49
Nº16	0,00	76,22	645,96	0,00	722,17	6561,22	65,61	34,39	-	-
Nº30	0,00	0,00	1066,27	0,00	1066,27	7627,49	76,27	23,73	-	-
Nº50	0,00	0,00	1058,35	0,00	1058,35	8685,84	86,86	13,14	5	19
Nº100	0,00	0,00	626,89	0,00	626,89	9312,73	93,13	6,87	-	-
Nº200	0,00	0,00	287,27	0,00	287,27	9600,00	96,00	4,00	2	8
BASE	0,00	0,00	0,00	400,00	400,00	10000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 10. Curva granulométrica formada diseño Marshall con 4% carbón mineral.



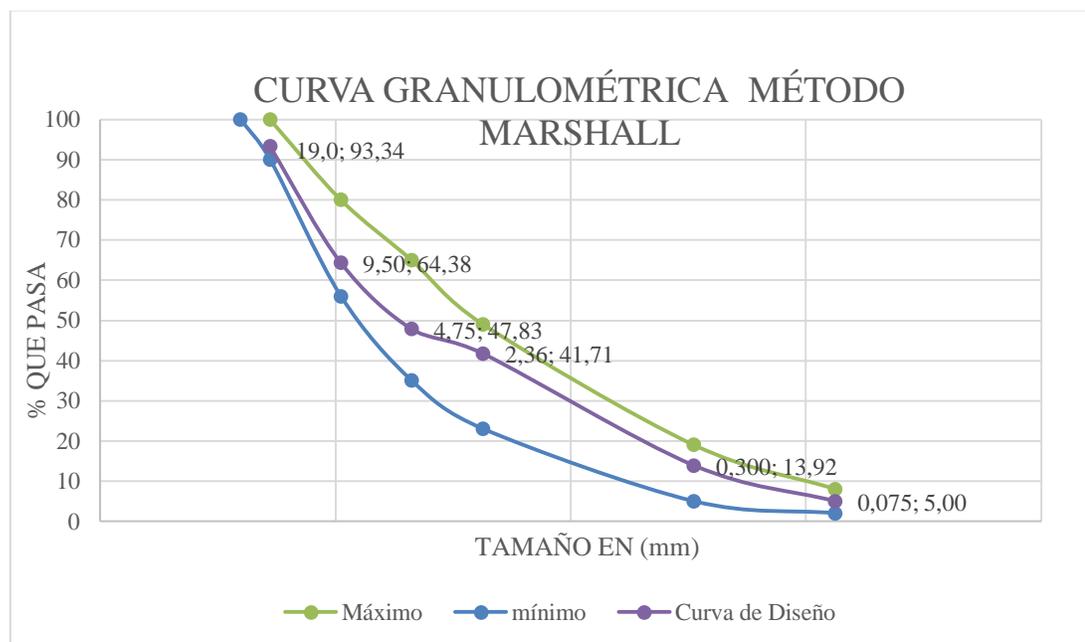
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 39. Granulometría formada con 5% carbón mineral

Tamices	Grava (%) 20,00	Gravilla (%) 35,00	Arena (%) 40,00	Filler (%) 5,00	Curva de dosificación				Especificaciones	
					Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
					100,00				Mínimo	Máximo
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	666,18	0,00	0,00	0,00	666,18	666,18	6,66	93,34	90	100
1/2"	655,09	286,39	0,00	0,00	941,49	1607,67	16,08	83,92	-	-
3/8"	452,33	1502,24	0,00	0,00	1954,56	3562,23	35,62	64,38	56	80
Nº4	210,11	1336,46	108,33	0,00	1654,90	5217,13	52,17	47,83	35	65
Nº8	16,29	298,69	296,80	0,00	611,78	5828,92	58,29	41,71	23	49
Nº16	0,00	76,22	630,20	0,00	706,42	6535,33	65,35	34,65	-	-
Nº30	0,00	0,00	1040,27	0,00	1040,27	7575,60	75,76	24,24	-	-
Nº50	0,00	0,00	1032,53	0,00	1032,53	8608,13	86,08	13,92	5	19
Nº100	0,00	0,00	611,60	0,00	611,60	9219,73	92,20	7,80	-	-
Nº200	0,00	0,00	280,27	0,00	280,27	9500,00	95,00	5,00	2	8
BASE	0,00	0,00	0,00	500,00	500,00	10000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 11. Curva granulométrica formada diseño Marshall con 5% carbón mineral.



Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Número de ensayos a realizar

Los porcentajes de cemento asfáltico que se aplicaron al presente estudio son 5%, 5,5%, 6%, 6,5% y 7%, haciendo un total de 5 porcentajes de cemento asfáltico y de cada porcentaje se procederá a realizar 3 briquetas haciendo un total de 15 briquetas por cada porcentaje de carbón mineral.

Por lo tanto, la cantidad final de briquetas es la siguiente:

Tabla 3. 40. Total N° de briquetas elaboradas para la investigación.

Descripción	Porcentaje de carbón mineral	Cantidad
Briquetas con variación de carbón mineral para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico	0%	15
	1%	15
	2%	15
	3%	15
	4%	15
	5%	15
Briquetas con el % óptimo de cemento asfáltico para cada porcentaje de carbón mineral	0%	5
	1%	5
	2%	5
	3%	5
	4%	5
	5%	5
Total briquetas elaboradas para los ensayos		120

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5 Contenido mínimo de cemento asfáltico

Para determinación de la cantidad mínima de cemento asfalto, se procede a utilizar la siguiente fórmula.

$$A = 0,035 * a + 0,045 * b + K * c + F$$

Donde:

A = % de asfalto en la mezcla.

a = % Retenido tamiz N°8.

b = % Pasante tamiz N°8.

c = % de agregado que pasa la malla N°200.

K = 0,15, si él % que retiene el tamiz N°3/4" está entre 11% y 15%.

0,18, si él % que retiene está entre 6% y 10%.

0,20, si él % que retiene es el 5% o menos.

F= de 0 a 2% que varía según la absorción del material (se puede asumir 0,7).

Proceso de cálculo:

$$a = 58,80\% \quad b = 41,20\% \quad c = 0\%$$

K = 0,18 debido a que el porcentaje retenido en el tamiz N°3/4" es 6,66% lo cual el % que retiene está entre 6% y 10%.

$$F = 0,7$$

$$A = 0,035 (58,80) + 0,045 (41,20) + 0,18 (0) + 0,7$$

$$A = 4,912\% \approx 5\%$$

El contenido aproximado de asfalto es 5%, debido a este resultado se trabajarán en las diferentes dosificaciones con los siguientes porcentajes: 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5% y 7%.

3.4.6 Dosificación de las mezclas según el contenido de carbón mineral con el método Marshall (ASTM D-159)

Con la granulometría de los agregados y los porcentajes de variación de cemento asfáltico se tiene una dosificación tentativa, con la cual se procederá a determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico para cada porcentaje de carbón mineral.

Tabla 3. 41. Dosificación para 0% de carbón mineral.

0% Carbón mineral	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr)	228,00	226,80	225,60	224,40	223,20
Peso de Gravilla (gr)	399,00	396,90	394,80	392,70	390,60
Peso de Arena (gr)	513,00	510,30	507,60	504,90	502,20
Peso de Carbón mineral (gr)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 42. Dosificación para 1% de carbón mineral.

1% Carbón mineral	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr)	228,00	226,80	225,60	224,40	223,20
Peso de Gravilla (gr)	399,00	396,90	394,80	392,70	390,60
Peso de Arena (gr)	501,60	498,96	496,32	493,68	491,04
Peso de Carbón mineral (gr)	11,40	11,34	11,28	11,22	11,16
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 43. Dosificación para 2% de carbón mineral.

2% Carbón mineral	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr)	228,00	226,80	225,60	224,40	223,20
Peso de Gravilla (gr)	399,00	396,90	394,80	392,70	390,60
Peso de Arena (gr)	490,20	487,62	485,04	482,46	479,88
Peso de Carbón mineral (gr)	22,80	22,68	22,56	22,44	22,32
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 44. Dosificación para 3% de carbón mineral.

3% Carbón mineral	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr)	228,00	226,80	225,60	224,40	223,20
Peso de Gravilla (gr)	399,00	396,90	394,80	392,70	390,60
Peso de Arena (gr)	478,80	476,28	473,76	471,24	468,72
Peso de Carbón mineral (gr)	34,20	34,02	33,84	33,66	33,48
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 45. Dosificación para 4% de carbón mineral.

4% Carbón mineral	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr)	228,00	226,80	225,60	224,40	223,20
Peso de Gravilla (gr)	399,00	396,90	394,80	392,70	390,60
Peso de Arena (gr)	467,40	464,94	462,48	460,02	457,56
Peso de Carbón mineral (gr)	45,60	45,36	45,12	44,88	44,64
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 46. Dosificación para 5% de carbón mineral.

5% Carbón mineral	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr)	228,00	226,80	225,60	224,40	223,20
Peso de Gravilla (gr)	399,00	396,90	394,80	392,70	390,60
Peso de Arena (gr)	456,00	453,60	451,20	448,80	446,40
Peso de Carbón mineral (gr)	57,00	56,70	56,40	56,10	55,80
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7 Elaboración de briquetas – método Marshall

Para realizar las briquetas por el método Marshall se necesita del siguiente equipo:

- Martillo de compactación.
- Dispositivo para moldear probetas.
- Extractor de probetas.
- Balanza A ± 0.1 gr.
- Bandejas metálicas.
- Termómetro
- Espátula.
- Asfalto 85-100
- Equipo Marshall.

Procedimiento:

Antes de preparar la mezcla, el conjunto del molde y la base de compactación se limpian y calientan a una temperatura entre 100 y 150°C. Por un lado, se pesan en bandeja separadas las diversas fracciones de áridos calculado para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada en la placa de calentamiento para calentar su contenido a una temperatura de 175 a 190°C. Por otro lado, se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 140°C. Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.

Se pesan luego sobre un plato las diversas fracciones de áridos de acuerdo con los pesos acumulativos. Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla, se coloca la bandeja sobre la balanza y se vierte sobre los agregados el asfalto caliente, hasta completar el peso total de agregados más asfalto calculado para un porcentaje de la mezcla total.

Figura 3. 1. Pesado de los materiales.



Fuente: Elaboración propia.

Se mezcla el asfalto con los agregados, hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 107°C ni en ningún caso someterse a recalentamiento. Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 4" de diámetro interior y 3" de altura. La compactación se hace usando un martillo especial compuesto de:

Un disco circular que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco, el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18".

Para el diseño de esta mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta en la compactación, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 18 briquetas. El molde, conteniendo la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente durante una media hora y luego se extrajo la briqueta mediante un gato hidráulico.

Figura 3. 2. Elaboración de las briquetas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 3. Proceso de compactación de las briquetas.



Fuente: Elaboración propia.

3.5 DESARROLLO DEL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUENCIA

Una vez extraído las briquetas de los moldes, se procede a realizar el ensayo de flujo y estabilidad en la prensa.

Primero se debe medir con un vernier las alturas en cuatro puntos de la briqueta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección.

Figura 3. 4. Medición de las alturas de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia.

Antes de realizar el ensayo la muestra se debe pesar en seco, saturado superficialmente seco y sumergida en agua, antes de su ruptura debe ser sumergidas en baño de agua a $60^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 1,8^{\circ}\text{F}$) durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos.

Figura 3. 5. Briqueta sumergida en agua.



Fuente: Elaboración propia.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre 21°C y 38°C (70 a 100°F). Si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior deslice fácilmente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que es indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50,8mm por minuto hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60°C (150°F) se anota como valor de estabilidad Marshall.

Mientras se realiza el ensayo de estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (flujo) en posición sobre la varilla de guía y se lo quita cuando se obtiene la carga máxima; se lee y anota esta lectura como valor de flujo de la briqueta, expresado en centésimas de pulgada.

3.6 PROCESO DE CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS MARSHALL DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Solo se realizará un cálculo demostrativo para la briqueta con porcentaje de cemento asfáltico de 5,0% sin carbón mineral.

3.6.1 Altura de las briquetas

Se miden las alturas dividiendo a la briqueta en cuatro para poder determinar cuatro alturas y sacar un promedio que represente el valor significativo de las alturas, después de haber procedido a la compactación con el martillo de las cuales para el porcentaje de asfalto de 4,0% sus alturas correspondientes son las siguientes:

Tabla 3. 47. Alturas medidas de cada briqueta.

Identificación	Alturas (cm)	Promedio (cm)
1	6,05	6,01
	6,00	
	5,97	
	6,05	
2	6,12	6,09
	6,09	
	6,08	
	6,05	
3	6,04	6,06
	6,10	
	6,06	
	6,05	

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Base de mezcla y agregado

Para la base de mezcla se toma el porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas en este cálculo el porcentaje de asfalto es de 4,0%. Mientras que para la base de agregado se realiza el siguiente procedimiento de cálculo.

$$\text{Base de agregado} = \frac{\text{Base de mezcla} * 100}{100 - \text{Base de la mezcla}}$$

$$\text{Base de agregado} = \frac{5,0 * 100}{100 - 5,0}$$

$$\text{Base de agregado} = 5,26$$

3.6.3 Peso de la briketa en el aire saturado superficialmente seco (S.S.S.)

El peso de la briketa saturado superficialmente seco consiste en medir su peso una vez secada la briketa después de estar sumergida en agua por un lapso de 30 minutos a 25°C.

Tabla 3. 48. Peso briketa saturada superficialmente seca (S.S.S)

Identificación	Peso briketa en el aire S.S.S. (gr)
1	1164,4
2	1190,2
3	1194,0

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4 Peso de la briketa en el aire

El peso de la briketa en el aire consiste en medir su peso una vez desmoldada la misma y limpiada en su superficie.

Tabla 3. 49. Peso al aire de las briketas.

Identificación	Peso briketa en el aire (gr)
1	1161,9
2	1190,2
3	1192,4

Fuente: Elaboración propia.

3.6.5 Peso de la briketa sumergida en el agua

El peso de la briketa sumergida en agua consiste en medir su peso una vez transcurrido 30 minutos sumergida en agua a 25°C.

Tabla 3. 50. Peso briqueta sumergida en agua.

Identificación	Peso briqueta sumergida en agua (gr)
1	666,0
2	684,0
3	689,0

Fuente: Elaboración propia.

3.6.6 Volumen de la briqueta

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

Vol. de briqueta = Peso briqueta en el aire S.S.S - Peso de briqueta sumergida

$$\text{Vol. de briqueta} = 1164,4 - 666,0$$

$$\text{Vol. de briqueta} = 498,9 \text{ [gr]}$$

Debido a que el peso es del agua y su peso específico es 1 gr/cm³ se considera:

$$\text{Vol. de briqueta} = 498,9 \text{ [cm}^3\text{]}$$

3.6.7 Densidad de la briqueta

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

3.6.7.1 Densidad real de la briqueta

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso de la briqueta en el aire}}{\text{Volumen de la muestra}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1161,9 \text{ gr}}{498,9 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Densidad real} = 2,33 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$$

3.6.7.2 Densidad máxima teórica de la briqueta

$$\text{Densidad máx.} = \frac{100}{\frac{\% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico asfalto}} + \frac{100 - \% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico agregado grueso}}}$$

$$\text{Densidad máx.} = \frac{100}{\frac{5,0}{1,017} + \frac{100-5,0}{2,68}}$$

$$\text{Densidad máx.} = 2,47 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

3.6.8 Porcentaje de vacíos

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

3.6.8.1 Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv)

$$V_v = \frac{\text{Densidad máx} - \text{Densidad real promedio}}{\text{Densidad máx}} * 100\%$$

$$V_v = \frac{2,47-2,33}{2,47} * 100\%$$

$$V_v = 4,98 \%$$

3.6.8.2 Porcentaje de vacíos de los agregados minerales (V.A.M)

$$V.A.M = \frac{\% \text{ de asfalto} * \text{Densidad real promedio}}{\text{Peso específico de asfalto}} + \% \text{ de vacíos (Vv)}$$

$$V.A.M = \frac{5,0 * 2,35}{1,017} + 4,98$$

$$V.A.M = 16,52\%$$

3.6.8.3 Porcentaje de relación betún vacíos (R.B.V)

$$R.B.V = \frac{V.A.M. - \% \text{ de vacíos (Vv)}}{V.A.M.} * 100$$

$$R.B.V. = \frac{16,52 - 4,98}{16,52} * 100$$

$$R.B.V. = 69,84\%$$

3.6.9 Estabilidad y fluencia

La estabilidad y la fluencia son propiedades medidas a partir de realizar el ensayo en la prensa Marshall.

3.6.9.1 Estabilidad

A partir del dato de la lectura del dial, se procede a calcular la estabilidad con la siguiente ecuación del anillo de la prensa Marshall:

$$y = (0,012*x - 0,0812)*102*2,2$$

Tabla 3. 51. Datos del ensayo de estabilidad

Identificación	Lectura dial (mm)	Estabilidad (lb)
1	1026	2744,59
2	992	2653,04
3	11144	3062,34

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Estabilidad} = (0,012*\text{lectura dial} - 0,0812) *102*2,2$$

$$\text{Estabilidad} = (0,012*1026 - 0,0812) *102*2,2$$

$$\text{Estabilidad} = 2744,59 \text{ lb}$$

Después del cálculo de estabilidad real se procede a corregir por la altura de la briqueta con la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilidad corregida} = \text{Estabilidad} * \text{Factor corrección de altura}$$

Dónde:

Factor de correc. de altura = Es el factor de corrección de acuerdo a la altura de la briqueta según el método Marshall cuando la altura es diferente de 63,5mm.

Tabla 3. 52. Alturas promedio y factor de corrección por altura.

Identificación	Promedio de alturas (cm)	Factor de corrección por altura*
1	6,01	1,01
2	6,09	1,07
3	6,06	1,08

(*) Manual de la ABC vol. 4A tabla A0608_1. Factores de corrección por altura para estabilidad Marshall (Normativa AASHTO).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 53. Estabilidad corregida.

Identificación	Estabilidad (lb)	Factor de corrección por altura	Estabilidad corregida (lb)	Estabilidad promedio corregida (lb)
1	2744,59	1,01	2769,29	2979,41
2	2653,04	1,07	2849,36	
3	3062,34	1,08	3319,58	

Fuente: Elaboración propia.

3.6.9.2 Fluencia

Las lecturas de fluencia son lecturas directas por lo que sólo se saca un promedio de las tres briquetas estudiadas con el mismo porcentaje.

Tabla 3. 54. Resultados de fluencia.

Identificación	Fluencia (0,01 pulg)	
	Lectura del dial	Promedio
1	11	11,00
2	12	
3	10	

Fuente: Elaboración propia.

3.7 ANÁLISIS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON PORCENTAJES ÓPTIMOS DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN CONTENIDO DE CARBÓN MINERAL.

Una vez encontrado los porcentajes óptimos de cemento asfáltico, se podrá hacer un análisis de la influencia del carbón mineral como filler, para ello se realizaron 5 briquetas para cada contenido de carbón mineral, de las cuales se sacará un promedio para determinar el valor final de las propiedades Marshall.

A continuación, las dosificaciones para cada contenido de carbón mineral con su respectivo porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

3.7.1. Resultados de la mezcla con 0% carbón mineral

Los resultados de la mezcla con 0% carbón son:

Tabla 3. 55. Resultados de propiedades Marshall de la mezcla con 0% carbón mineral.

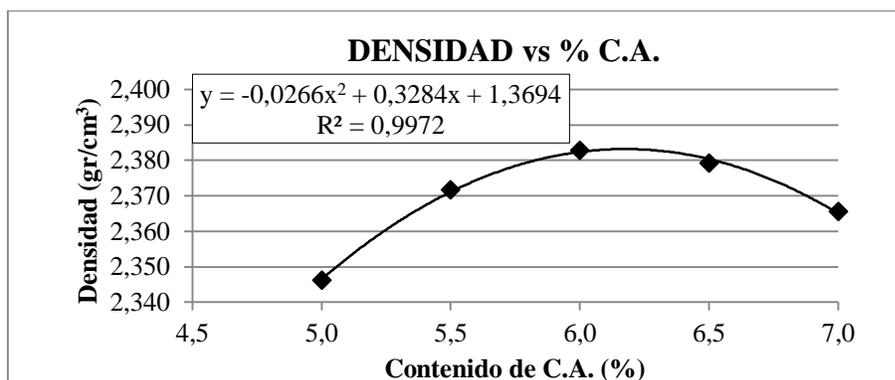
Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pulg)
5,0	2,346	4,98	16,52	69,84	2979,41	11,00
5,5	2,372	3,14	15,97	80,33	3759,23	10,33
6,0	2,383	1,87	15,93	88,27	3780,17	11,33
6,5	2,379	1,19	16,40	92,75	3416,14	16,67
7,0	2,366	0,92	17,21	94,63	2797,74	23,67

Fuente: Elaboración propia.

Obtenido todos estos valores se procedió a dibujar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones.

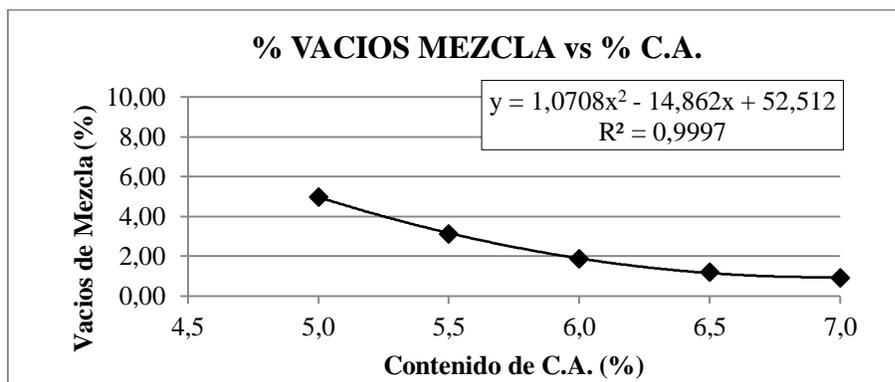
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. densidad de la briqueta.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. vacíos de agregado mineral (V.A.M.)
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. relación betún vacíos (R.B.V.)
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. estabilidad corregida.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. fluencia (flujo).

Gráfico 3. 12. Porcentaje de C.A. vs. densidad de la mezcla al 0% carbón mineral



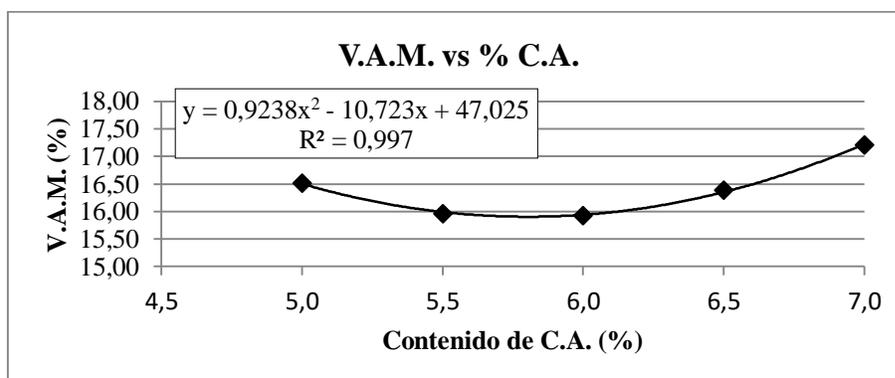
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 13. Porcentaje de C.A. vs. vacíos de la mezcla al 0% carbón mineral



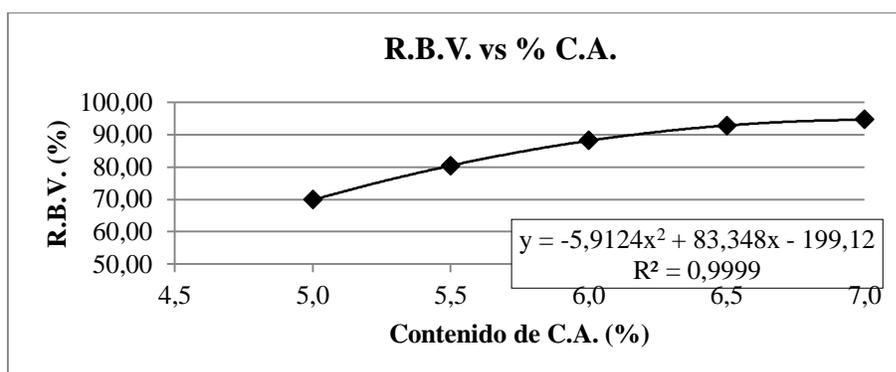
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 14. Porcentaje de C.A. vs. V.A.M. de la mezcla al 0% carbón mineral



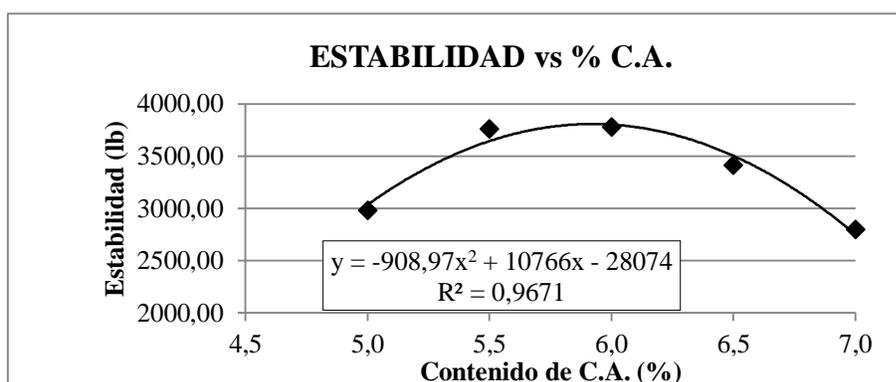
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 15. Porcentaje de C.A. vs. R.B.V. de la mezcla al 0% carbón mineral



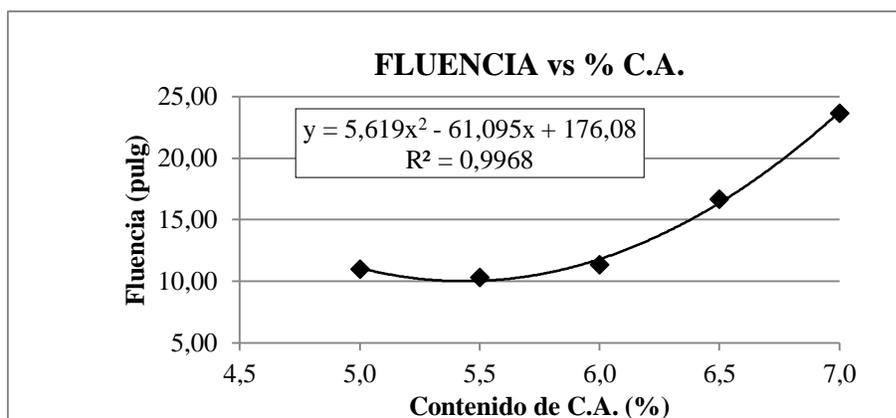
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 16. Porcentaje de C.A. vs. estabilidad de la mezcla al 0% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 17. Porcentaje de C.A. vs. fluencia de la mezcla al 0% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

A partir de las ecuaciones de los anteriores gráficos, se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla con 0% carbón mineral, según los siguientes criterios:

- C.A.₁= Contenido de cemento asfáltico de la estabilidad máxima.
- C.A.₂= Contenido de cemento asfáltico de la densidad máxima.
- C.A.₃= Contenido de cemento asfáltico del porcentaje de vacíos igual a 4%.

Cada C.A._i (en el eje x) tiene su valor de propiedad Marshall (en el eje y), determinado de acuerdo a sus respectivas ecuaciones. Luego el contenido óptimo de cemento asfáltico es el promedio de los tres contenidos de cemento asfáltico (C.A.) mencionados.

Tabla 3. 56. Resultado de % óptimo de C.A. la mezcla con 0% carbón mineral.

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,38	6,17
Estabilidad máxima (Lb)	3804,60	5,92
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,23
% Porcentaje óptimo de C.A. =		5,77

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el porcentaje óptimo de C.A. es de 5,77% para la mezcla con 0% carbón mineral.

3.7.2 Resultados de la mezcla con 1% carbón mineral

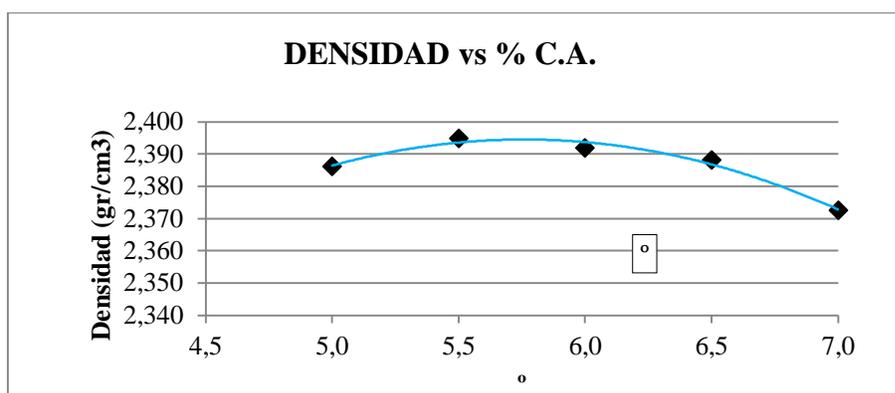
Obtenido todos los resultados de la mezcla con 1% carbón, se procedió igual que el anterior procedimiento a graficar las curvas de porcentaje C.A. vs. Propiedad Marshall.

Tabla 3. 57. Resultados de propiedades Marshall de la mezcla con 1% carbón mineral.

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pulg)
5,0	2,386	5,29	17,02	68,92	4043,57	13,00
5,5	2,395	4,12	17,07	75,85	4264,14	13,67
6,0	2,392	3,41	17,52	80,56	3987,68	15,67
6,5	2,388	2,72	17,98	84,89	3675,61	17,67
7,0	2,373	2,51	18,84	86,69	2948,83	20,33

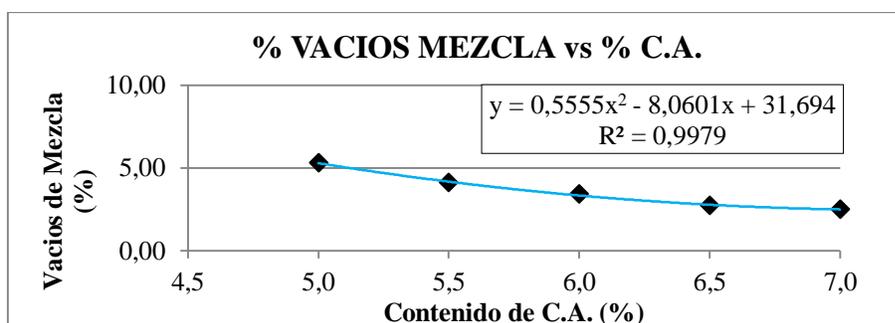
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 18. Porcentaje de C.A. vs. densidad de la mezcla al 1% carbón mineral



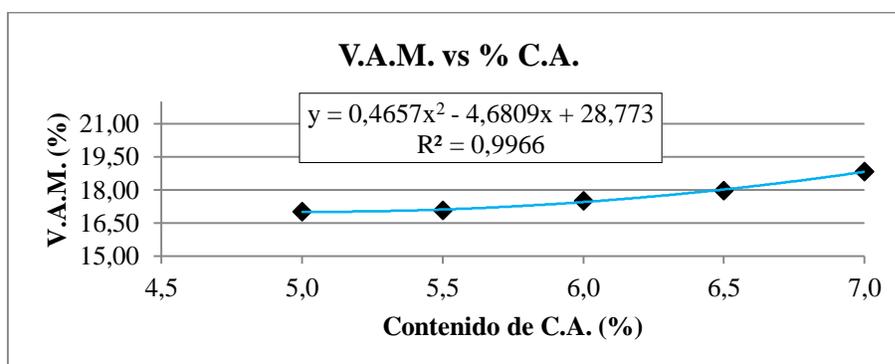
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 19. Porcentaje de C.A. vs. vacíos de la mezcla al 1% carbón mineral



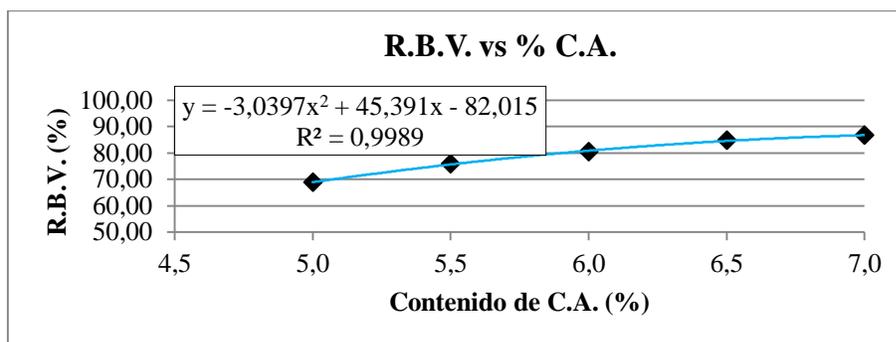
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 20. Porcentaje de C.A. vs. V.A.M. de la mezcla al 1% carbón mineral



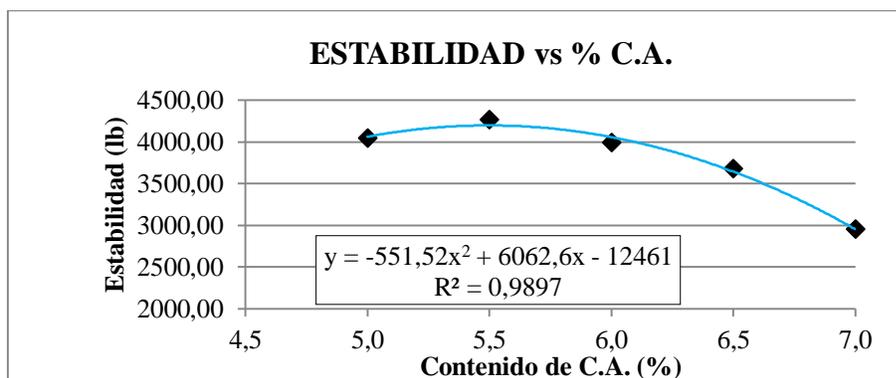
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 21. Porcentaje de C.A. vs. R.B.V. de la mezcla al 1% carbón mineral



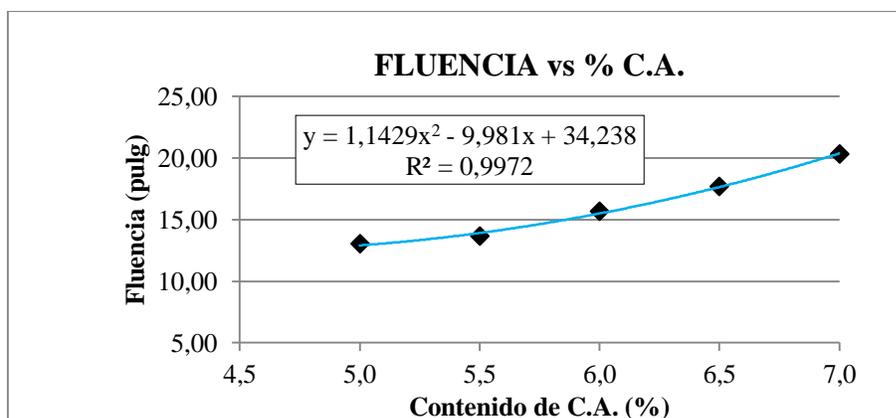
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 22. Porcentaje de C.A. vs. estabilidad de la mezcla al 1% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 23. Porcentaje de C.A. vs. fluencia de la mezcla al 1% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

A partir de las ecuaciones de los anteriores gráficos, se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla con 1% carbón mineral, según los siguientes criterios:

- C.A.₁= Contenido de cemento asfáltico de la estabilidad máxima.
- C.A.₂= Contenido de cemento asfáltico de la densidad máxima.
- C.A.₃= Contenido de cemento asfáltico del porcentaje de vacíos igual a 4%.

Cada C.A._i (en el eje x) tiene su valor de propiedad Marshall (en el eje y), determinado de acuerdo a sus respectivas ecuaciones. Luego el contenido óptimo de cemento asfáltico es el promedio de los tres contenidos de cemento asfáltico (C.A.) mencionados.

Tabla 3. 58. Resultado de % óptimo de C.A. la mezcla con 1% carbón mineral.

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,39	5,75
Estabilidad máxima (Lb)	4199,83	5,50
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,55
% Porcentaje óptimo de C.A. =		5,60

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el porcentaje óptimo de C.A. es de 5,60% para la mezcla con 1% carbón mineral.

3.7.3. Resultados de la mezcla con 2% carbón mineral

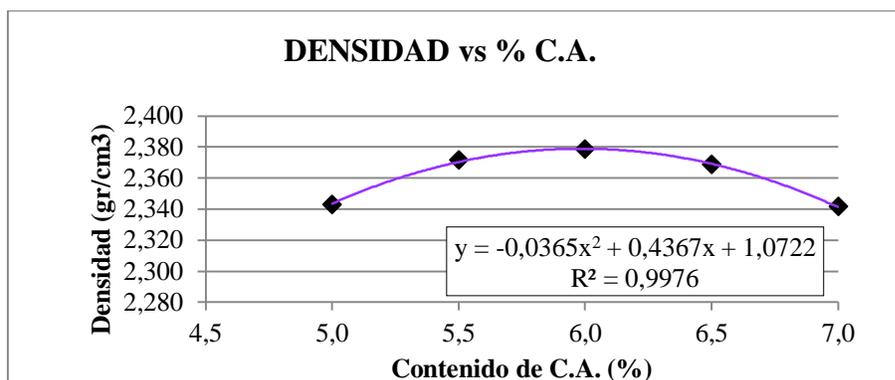
Obtenido todos los resultados de la mezcla con 2% carbón, se procedió igual que el anterior procedimiento a graficar las curvas de porcentaje C.A. vs. Propiedad Marshall.

Tabla 3. 59. Resultados de propiedades Marshall de la mezcla con 2% carbón mineral.

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pulg)
5,0	2,343	8,73	20,25	56,89	4197,47	13,33
5,5	2,372	6,78	19,61	65,41	4628,75	12,67
6,0	2,378	5,68	19,71	71,20	4438,89	14,67
6,5	2,368	5,23	20,36	74,34	3639,42	19,00
7,0	2,342	5,45	21,57	74,72	2879,03	22,00

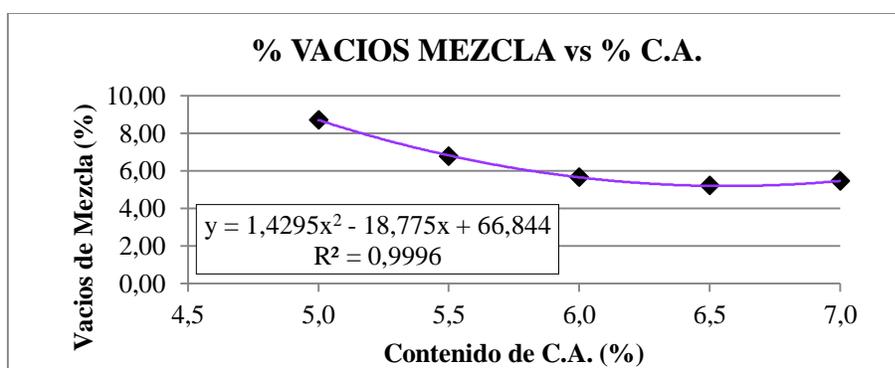
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 24. Porcentaje de C.A. vs. densidad de la mezcla al 2% carbón mineral



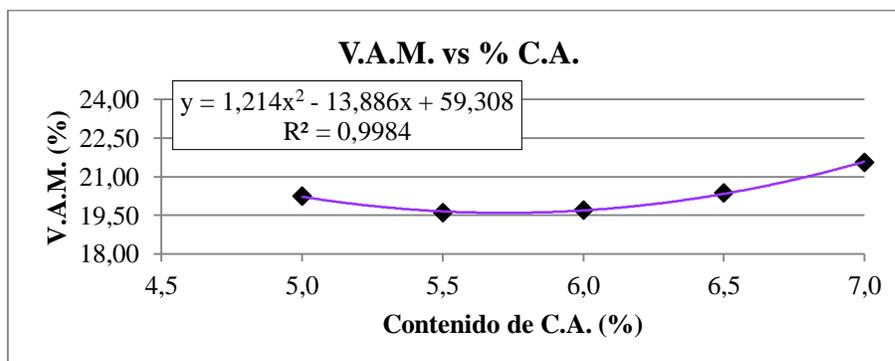
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 25. Porcentaje de C.A. vs. vacíos de la mezcla al 2% carbón mineral



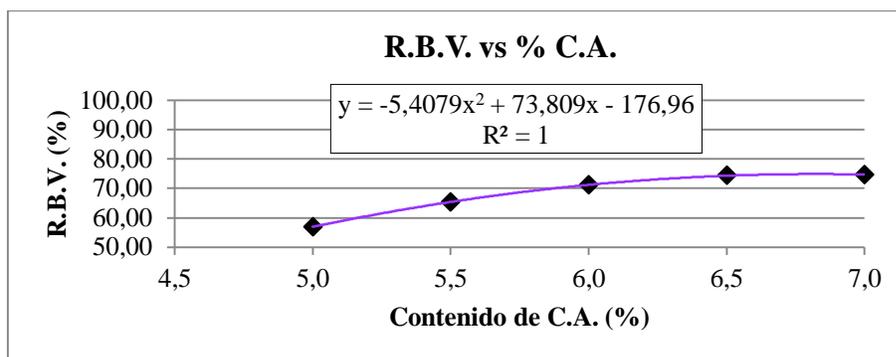
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 26. Porcentaje de C.A. vs. V.A.M. de la mezcla al 2% carbón mineral



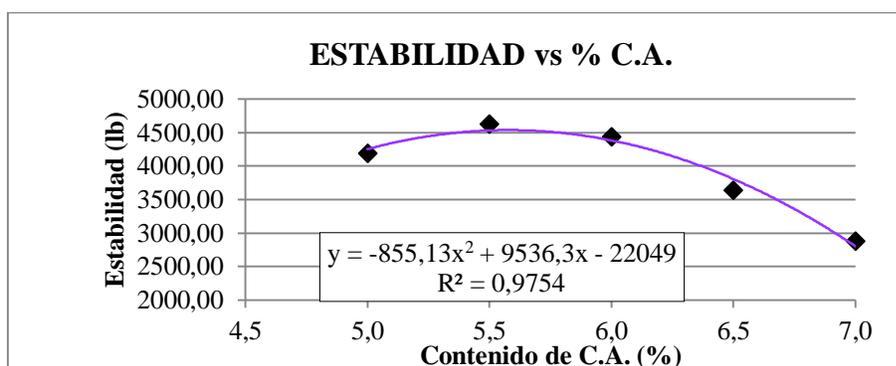
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 27. Porcentaje de C.A. vs. R.B.V. de la mezcla al 2% carbón mineral



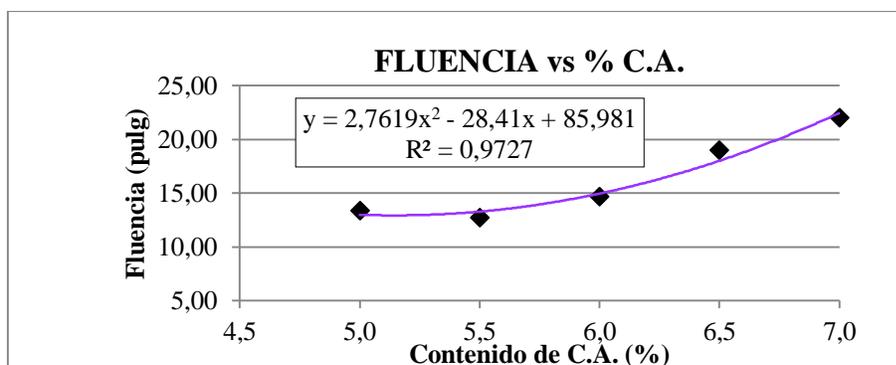
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 28. Porcentaje de C.A. vs. estabilidad de la mezcla al 2% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 29. Porcentaje de C.A. vs. fluencia de la mezcla al 2% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

A partir de las ecuaciones de los anteriores gráficos, se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla con 2% carbón mineral, según los siguientes criterios:

- C.A.₁= Contenido de cemento asfáltico de la estabilidad máxima.
- C.A.₂= Contenido de cemento asfáltico de la densidad máxima.
- C.A.₃= Contenido de cemento asfáltico del porcentaje de vacíos igual a 4%.

Cada C.A._i (en el eje x) tiene su valor de propiedad Marshall (en el eje y), determinado de acuerdo a sus respectivas ecuaciones. Luego el contenido óptimo de cemento asfáltico es el promedio de los tres contenidos de cemento asfáltico (C.A.) mencionados.

Tabla 3. 60. Resultado de % óptimo de C.A. de la mezcla con 2% carbón mineral.

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,38	5,98
Estabilidad máxima (Lb)	4537,90	5,58
Vacíos de la mezcla (%)	5,20	6,50
% Porcentaje óptimo de C.A. =		6,02

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el porcentaje óptimo de C.A. es de 6,02% para la mezcla con 2% carbón mineral.

3.7.4 Resultados de la mezcla con 3% carbón mineral

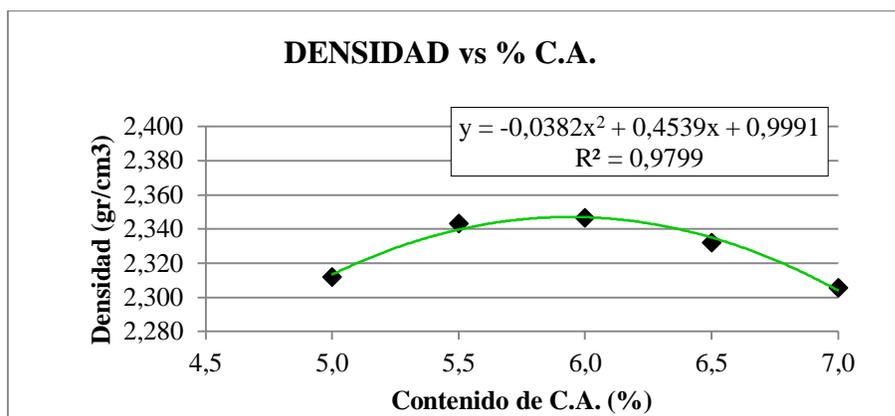
Obtenido todos los resultados de la mezcla con 3% carbón, se procedió igual que el anterior procedimiento a graficar las curvas de porcentaje C.A. vs. Propiedad Marshall.

Tabla 3. 61. Resultados de propiedades Marshall de la mezcla con 3% carbón mineral.

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pulg)
5,0	2,312	11,50	22,87	49,70	4338,40	12,33
5,5	2,343	9,46	22,14	57,25	5159,83	13,00
6,0	2,347	8,50	22,34	61,96	4897,65	15,33
6,5	2,332	8,22	23,13	64,44	3814,74	17,33
7,0	2,306	8,42	24,29	65,33	2718,38	22,00

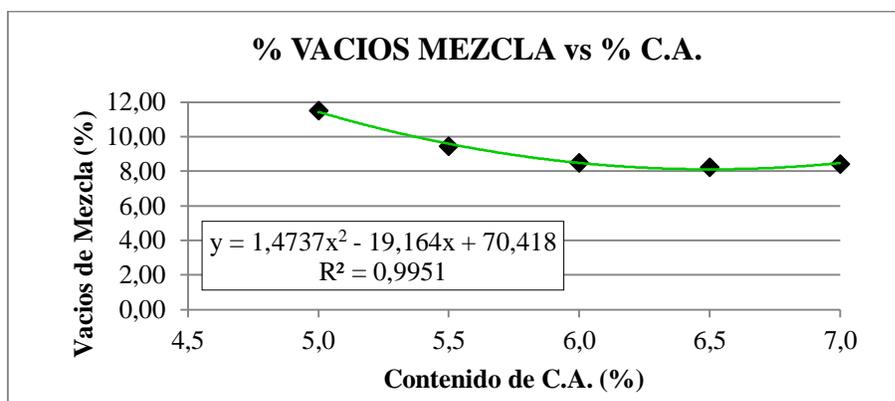
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 30. Porcentaje de C.A. vs. densidad de la mezcla al 3% carbón mineral



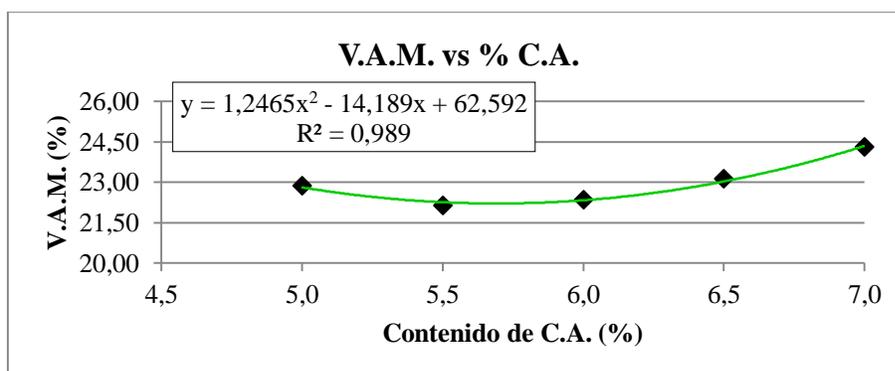
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 31. Porcentaje de C.A. vs. vacíos de la mezcla al 3% carbón mineral



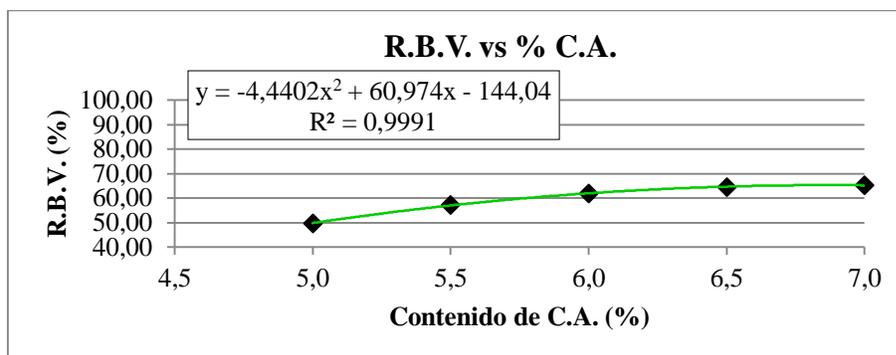
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 32. Porcentaje de C.A. vs. V.A.M. de la mezcla al 3% carbón mineral



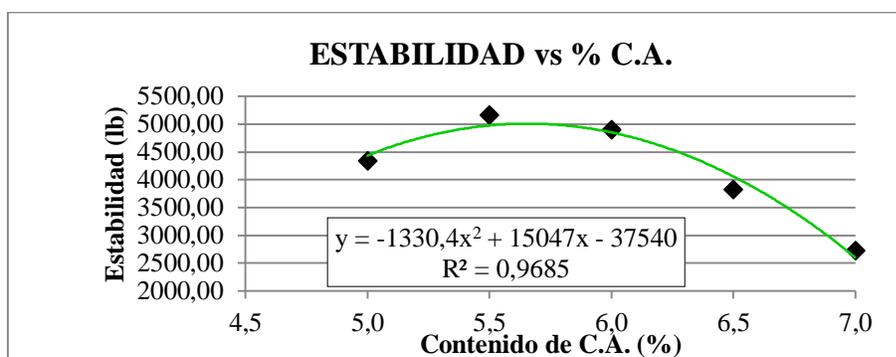
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 33. Porcentaje de C.A. vs. R.B.V. de la mezcla al 3% carbón mineral



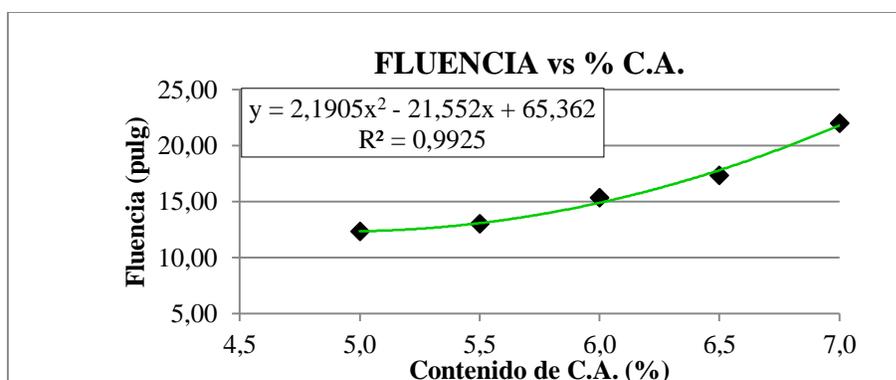
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 34. Porcentaje de C.A. vs. estabilidad de la mezcla al 3% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 35. Porcentaje de C.A. vs. fluencia de la mezcla al 3% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

A partir de las ecuaciones de los anteriores gráficos, se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla con 3% carbón mineral, según los siguientes criterios:

- C.A.₁= Contenido de cemento asfáltico de la estabilidad máxima.
- C.A.₂= Contenido de cemento asfáltico de la densidad máxima.
- C.A.₃= Contenido de cemento asfáltico del porcentaje de vacíos igual a 4%.

Cada C.A._i (en el eje x) tiene su valor de propiedad Marshall (en el eje y), determinado de acuerdo a sus respectivas ecuaciones. Luego el contenido óptimo de cemento asfáltico es el promedio de los tres contenidos de cemento asfáltico (C.A.) mencionados.

Tabla 3. 62. Resultado de % óptimo de C.A. de la mezcla con 3% carbón mineral.

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,35	5,94
Estabilidad máxima (Lb)	5005,89	5,66
Vacíos de la mezcla (%)	8,12	6,50
% Porcentaje óptimo de C.A. =		6,03

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el porcentaje óptimo de C.A. es de 6,03% para la mezcla con 3% carbón mineral.

3.7.5. Resultados de la mezcla con 4% carbón mineral

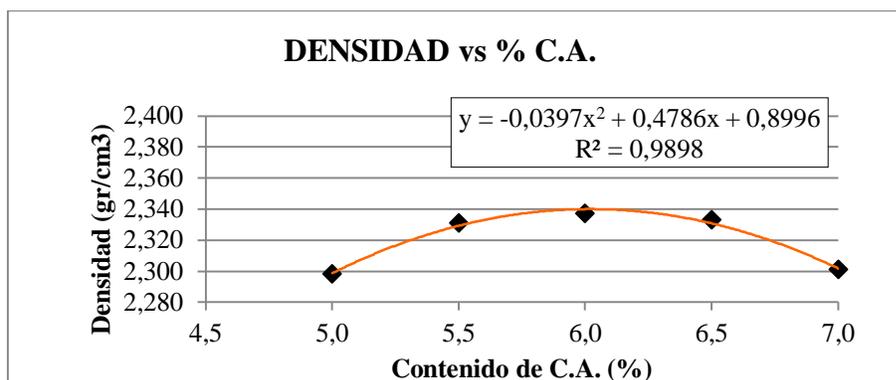
Obtenido todos los resultados de la mezcla con 4% carbón, se procedió igual que el anterior procedimiento a graficar las curvas de porcentaje C.A. vs. Propiedad Marshall.

Tabla 3. 63. Resultados de propiedades Marshall de la mezcla con 4% carbón mineral.

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pulg)
5,0	2,298	13,42	24,72	45,70	5981,30	17,33
5,5	2,331	11,37	23,98	52,58	6610,73	14,67
6,0	2,337	10,28	24,07	57,29	6244,16	14,00
6,5	2,333	9,60	24,51	60,83	5161,10	17,00
7,0	2,301	9,98	25,82	61,35	2955,75	21,67

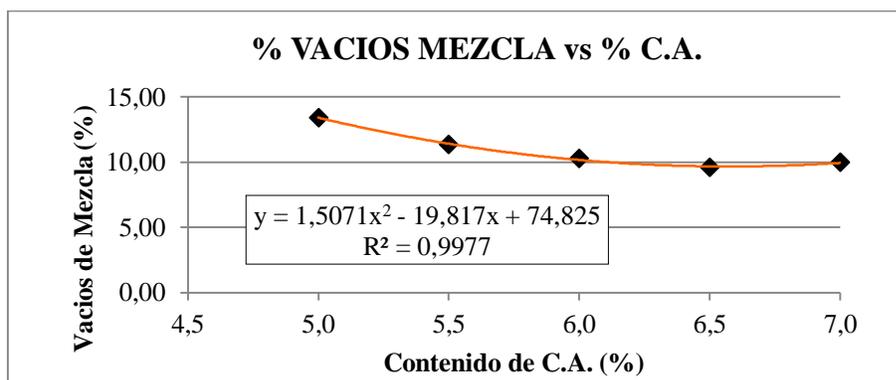
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 36. Porcentaje de C.A. vs. densidad de la mezcla al 4% carbón mineral



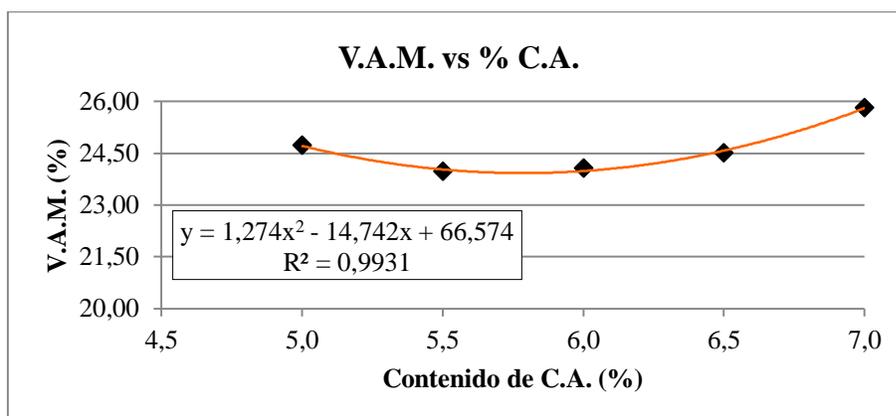
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 37. Porcentaje de C.A. vs. vacíos de la mezcla al 4% carbón mineral



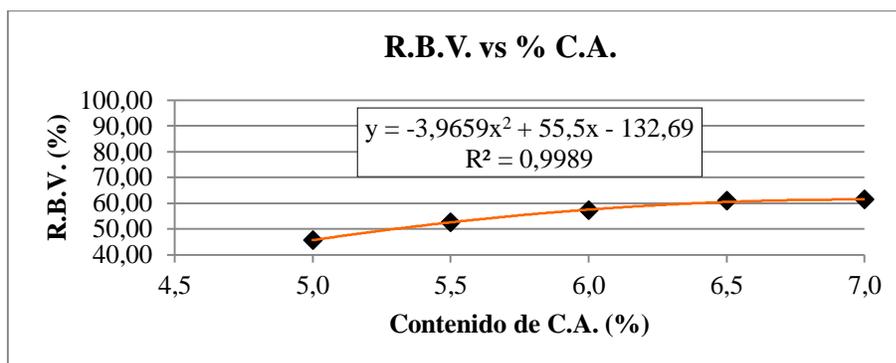
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 38. Porcentaje de C.A. vs. V.A.M. de la mezcla al 4% carbón mineral



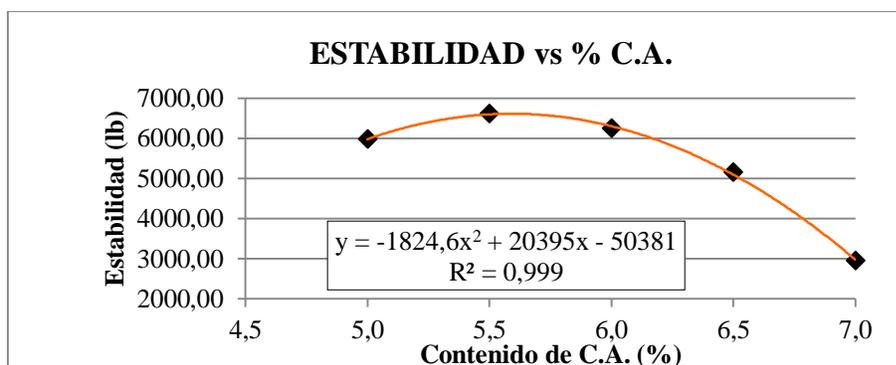
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 39. Porcentaje de C.A. vs. R.B.V. de la mezcla al 4% carbón mineral



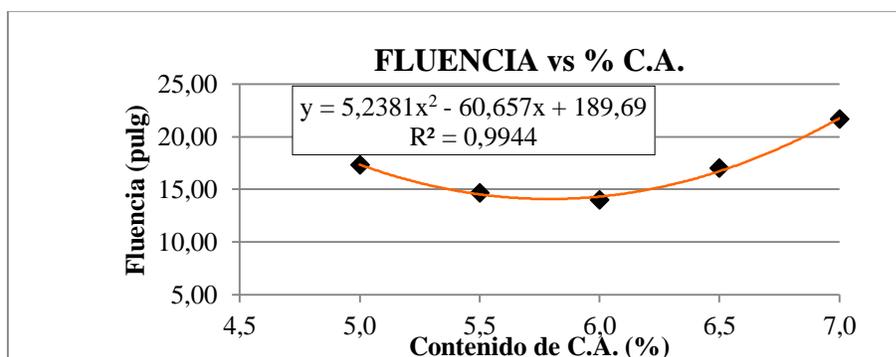
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 40. Porcentaje de C.A. vs. estabilidad de la mezcla al 4% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 41. Porcentaje de C.A. vs. fluencia de la mezcla al 4% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

A partir de las ecuaciones de los anteriores gráficos, se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla con 4% carbón mineral, según los siguientes criterios:

- C.A.₁= Contenido de cemento asfáltico de la estabilidad máxima.
- C.A.₂= Contenido de cemento asfáltico de la densidad máxima.
- C.A.₃= Contenido de cemento asfáltico del porcentaje de vacíos igual a 4%.

Cada C.A._i (en el eje x) tiene su valor de propiedad Marshall (en el eje y), determinado de acuerdo a sus respectivas ecuaciones. Luego el contenido óptimo de cemento asfáltico es el promedio de los tres contenidos de cemento asfáltico (C.A.) mencionados.

Tabla 3. 64. Resultado de % óptimo de C.A. de la mezcla con 4% carbón mineral.

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,34	6,03
Estabilidad máxima (Lb)	6611,77	5,59
Vacíos de la mezcla (%)	9,68	6,53
% Porcentaje óptimo de C.A. =		6,05

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el porcentaje óptimo de C.A. es de 6,05% para la mezcla con 4% carbón mineral.

3.7.6. Resultados de la mezcla con 5% carbón mineral

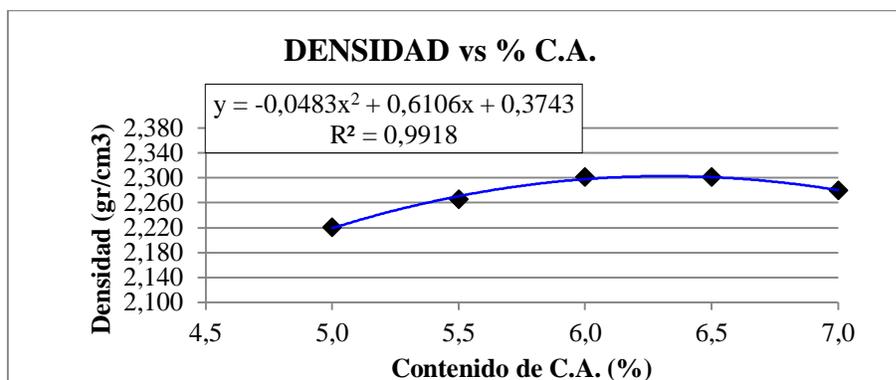
Obtenido todos los resultados de la mezcla con 5% carbón, se procedió igual que el anterior procedimiento a graficar las curvas de porcentaje C.A. vs. Propiedad Marshall.

Tabla 3. 65. Resultados de propiedades Marshall de la mezcla con 5% carbón mineral.

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pulg)
5,0	2,221	17,60	28,52	38,28	5871,73	14,00
5,5	2,266	15,11	27,37	44,78	6189,94	12,00
6,0	2,301	12,95	26,53	51,18	6175,35	11,33
6,5	2,302	12,09	26,80	54,88	4629,82	14,00
7,0	2,280	12,09	27,78	56,49	2741,09	20,00

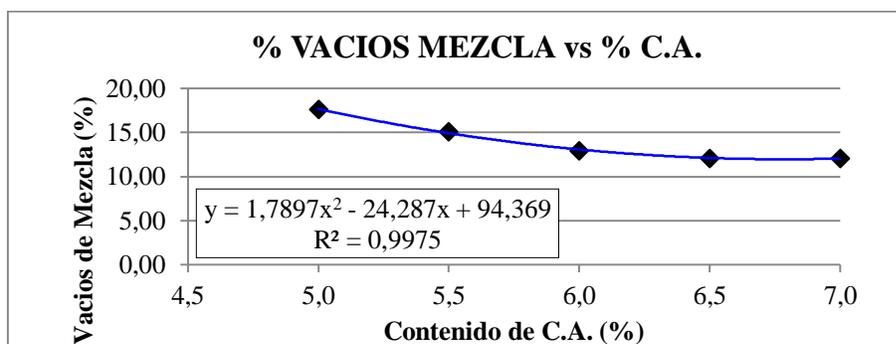
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 42. Porcentaje de C.A. vs. densidad de la mezcla al 5% carbón mineral



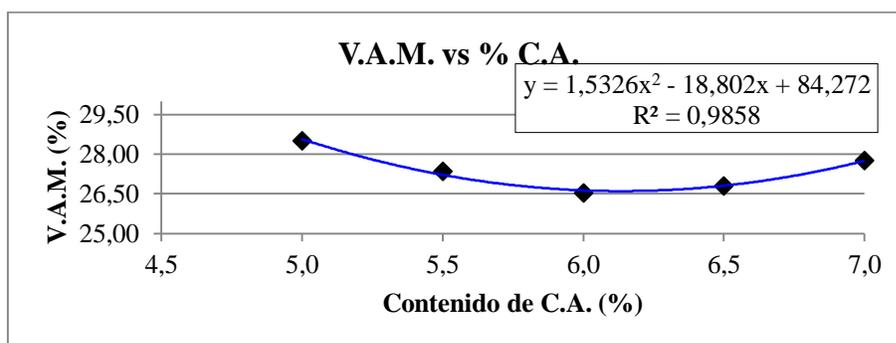
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 43. Porcentaje de C.A. vs. vacíos de la mezcla al 5% carbón mineral



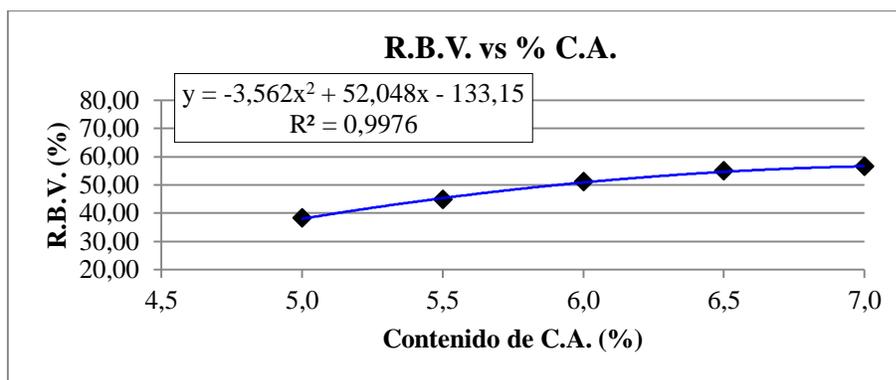
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 44. Porcentaje de C.A. vs. V.A.M. de la mezcla al 5% carbón mineral



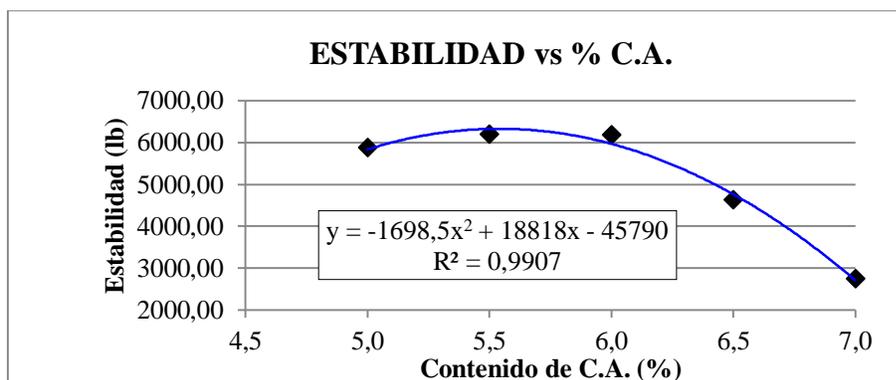
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 45. Porcentaje de C.A. vs. R.B.V. de la mezcla al 5% carbón mineral



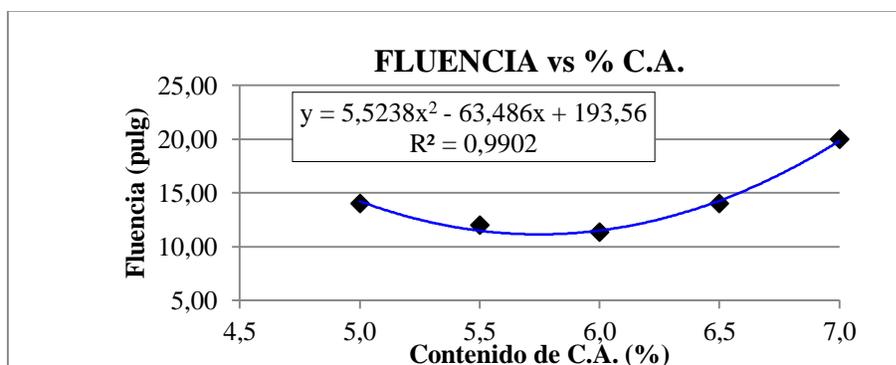
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 46. Porcentaje de C.A. vs. estabilidad de la mezcla al 5% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 47. Porcentaje de C.A. vs. fluencia de la mezcla al 5% carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

A partir de las ecuaciones de los anteriores gráficos, se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla con 5% carbón mineral, según los siguientes criterios:

- C.A.₁= Contenido de cemento asfáltico de la estabilidad máxima.
- C.A.₂= Contenido de cemento asfáltico de la densidad máxima.
- C.A.₃= Contenido de cemento asfáltico del porcentaje de vacíos igual a 4%.

Cada C.A._i (en el eje x) tiene su valor de propiedad Marshall (en el eje y), determinado de acuerdo a sus respectivas ecuaciones. Luego el contenido óptimo de cemento asfáltico es el promedio de los tres contenidos de cemento asfáltico (C.A.) mencionados.

Tabla 3. 66. Resultado de % óptimo de C.A. de la mezcla con 5% carbón mineral.

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,30	6,32
Estabilidad máxima (Lb)	6332,04	5,54
Vacíos de la mezcla (%)	11,97	6,75
% Porcentaje óptimo de C.A. =		6,20

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el porcentaje óptimo de C.A. es de 6,20% para la mezcla con 5% carbón mineral.

Tabla 3. 67. Dosificación con % óptimo de C.A. para cada variación de carbón mineral.

Ponderación de Filler (%)	Con carbón mineral					
	0%	1%	2%	3%	4%	5%
Contenido óptimo de cemento asfáltico	5,77%	5,60%	6,02%	6,03%	6,05%	6,20%
Porcentaje de Agregado (%)	94,23%	93,40%	91,98%	90,97%	89,95%	88,80%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	69,24	67,20	72,24	72,36	72,60	74,40
Peso de Grava (gr)	226,15	224,16	220,75	218,33	215,88	213,12
Peso de Gravilla (gr)	395,77	392,28	386,32	382,07	377,79	372,96
Peso de Arena (gr)	508,84	504,36	496,69	491,24	485,73	479,52
Peso de Carbón Mineral (gr)	0,00	12,00	24,00	36,00	48,00	60,00
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar las briquetas con la anterior dosificación, y de obtener datos para determinar las propiedades volumétricas Marshall, estabilidad y fluencia, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3. 68. Resultados de propiedades Marshall con contenido óptimo de la mezcla con 0% carbón mineral.

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pul g)
5,77	2,413	1,02	14,71	93,06	4097,61	12,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 69. Resultados de propiedades Marshall con contenido óptimo de la mezcla con 1% carbón mineral.

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pul g)
5,60	2,416	1,18	14,48	91,87	4555,37	15,60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 70. Resultados de propiedades Marshall con contenido óptimo de la mezcla con 2% carbón mineral.

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pul g)
6,02	2,389	1,58	15,72	89,94	4505,04	13,60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 71. Resultados de propiedades Marshall con contenido óptimo de la mezcla con 3% carbón mineral.

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pul g)
6,03	2,358	2,86	16,84	83,03	4949,88	15,80

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 72. Resultados de propiedades Marshall con contenido óptimo de la mezcla con 4% carbón mineral.

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pul g)
6,05	2,327	4,09	17,94	77,18	5610,57	10,20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 73. Resultados de propiedades Marshall con contenido óptimo de la mezcla con 5% carbón mineral.

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pul g)
6,20	2,298	5,03	19,04	73,58	7335,86	10,40

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, los resultados finales son:

Tabla 3. 74. Tabla resumen de propiedades Marshall con su contenido óptimo de C.A. para cada variación de carbón mineral.

Contenido de carbón mineral	Porcentajes óptimos de C.A. (%)	Densidad (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (%)	R.B.V. (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01pul g)
0%	5,77	2,413	1,02	14,71	93,06	4097,61	12,00
1%	5,60	2,416	1,18	14,48	91,87	4555,37	15,60
2%	6,02	2,389	1,58	15,72	89,94	4505,04	13,60
3%	6,03	2,358	2,86	16,84	83,03	4949,88	15,80
4%	6,05	2,327	4,09	17,94	77,18	5610,57	10,20
5%	6,20	2,298	5,03	19,04	73,58	7335,86	10,40

Fuente: Elaboración propia.

3.8 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS MARSHALL SEGÚN CONTENIDO DE ASFALTO PARA CADA VARIACIÓN DE CARBÓN MINERAL

Dentro de un estudio de propiedades volumétricas Marshall es necesario observar y analizar en conjunto lo que sucede para cada contenido de cemento asfáltico y carbón mineral. A continuación, en detalle análisis de cada propiedad volumétrica.

3.9 RESULTADOS DE PROPIEDADES MARSHALL DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Después de terminar con el proceso de cálculo para cada tipo de mezcla con su respectivo diseño granulométrico, se obtienen las siguientes tablas:

3.9.1 Análisis de la densidad

La densidad de una mezcla asfáltica es una de las propiedades más importantes y determinantes al momento de definir el contenido óptimo de cemento asfáltico, porque mientras mayor sea la densidad, mayor es su grado de resistencia a las cargas dinámicas vehiculares, por ello es necesario conocer el comportamiento que tienen al adicionarles diferentes porcentajes de carbón mineral.

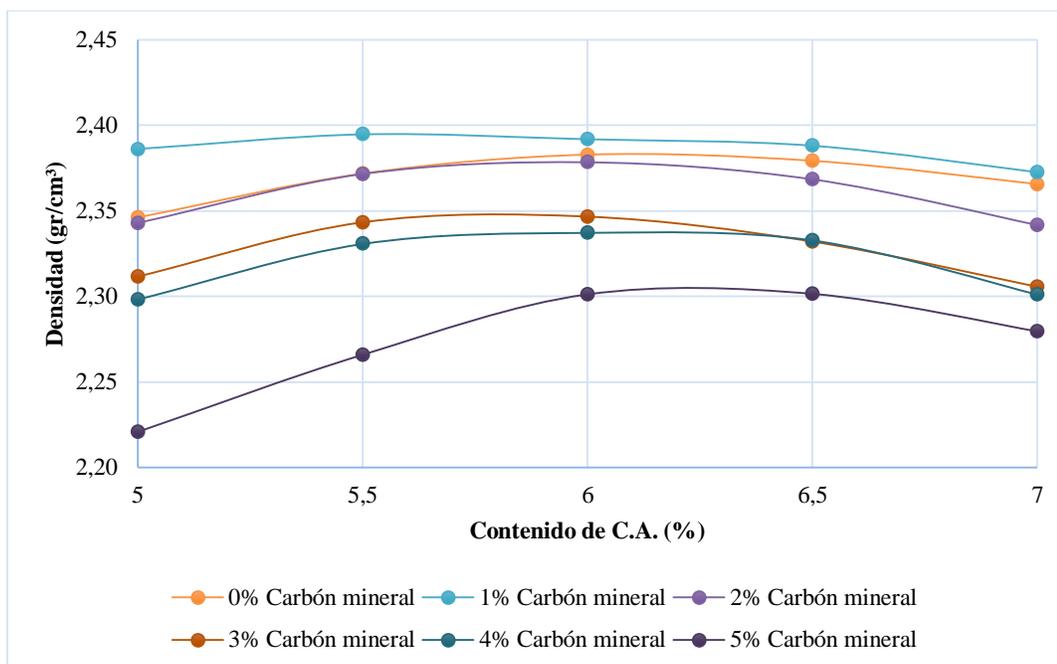
Primero es necesario analizar el comportamiento de la densidad con los diferentes porcentajes de cemento asfáltico (C.A.) para cada variación de carbón mineral, como se muestra en la siguiente tabla resumen con su respectivo gráfico:

Tabla 3. 75. Resumen de densidades para cada porcentaje de C.A. y carbón mineral

Porcentajes de cemento asfáltico (%)	Densidad (gr/cm ³)					
	Variación de carbón mineral (%)					
	0%	1%	2%	3%	4%	5%
5,0	2,346	2,386	2,343	2,312	2,298	2,221
5,5	2,372	2,395	2,372	2,343	2,331	2,266
6,0	2,383	2,392	2,378	2,347	2,337	2,301
6,5	2,379	2,388	2,368	2,332	2,333	2,302
7,0	2,366	2,373	2,342	2,306	2,301	2,280

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 48. Densidades para cada porcentaje de C.A. y carbón mineral.



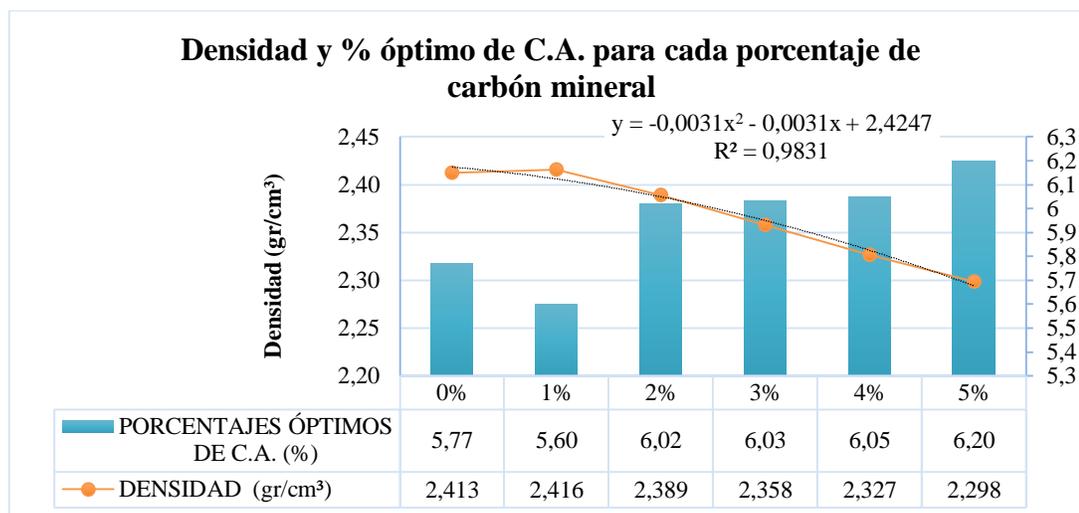
Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 3.48 se observa que la mezcla con 1% de carbón mineral proporciona la curva más elevada de densidad, superando a la mezcla de 0% de carbón mineral. Y, la mezcla con el 5% de carbón mineral proporciona la curva más baja de densidad.

Por otra parte, se observa que la densidad tiene una tendencia ascendente de abanico semicerrado respecto a la variación de carbón mineral, porque en el porcentaje del 5% de cemento asfáltico (C.A.) hay mayor amplitud de casi $0,20 \text{ gr/cm}^3$, y a medida que va aumentando el contenido de C.A. hasta el 7% de C.A., esta amplitud se reduce a casi $0,10 \text{ gr/cm}^3$ de forma ascendente. Sin embargo, cada curva genera una densidad máxima. Por lo tanto, esto refleja que los óptimos están dentro de los rangos medios de porcentaje de C.A., es decir entre 5,5 y 6,5 % de C.A.

Luego a partir de la tabla 3.73, con los resultados de densidad se obtiene el siguiente gráfico:

Gráfico 3. 49. Densidades y % óptimos de C.A. de cada variación de carbón mineral.



Fuente: Elaboración propia.

Si observamos el gráfico 3.49, se observa que la densidad tiene una curva de tendencia descendente ajustada al modelo matemático polinómico de segundo grado, cuyo coeficiente de determinación es 0,9831, lo que indica que hay una alta relación directa entre la densidad y el contenido de carbón mineral, es decir que, a mayor porcentaje de carbón mineral, menor es la densidad. Por otra parte, se observa que el porcentaje óptimo de asfalto sube a medida que aumenta el porcentaje de carbón mineral. Pero hay un resultado que llama la atención y es la mezcla con el 1% de carbón mineral, que genera la mayor densidad con el 2,416 gr/cm³ y el menor contenido de cemento asfáltico el 5,60%.

3.9.2 Análisis de los vacíos de la mezcla

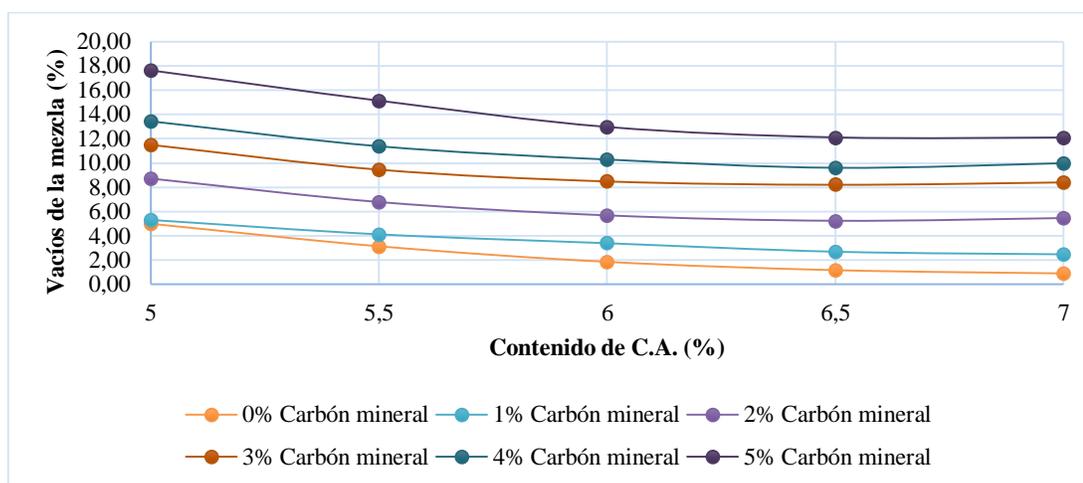
Los vacíos en una mezcla asfáltica, proporciona la clasificación de la misma, que según la cantidad de vacíos puede ser densa, semidensa, semiporosa o porosa, es decir que a mayores vacíos mayor será la porosidad y a menores vacíos más densa será la mezcla asfáltica. En el presente trabajo se estudian las mezclas densas con especificaciones de 3% a 5% de vacíos de la mezcla. Sin embargo, es necesario primero analizar el comportamiento de los vacíos de la mezcla con los diferentes porcentajes de cemento asfáltico (C.A.) para cada variación de carbón mineral, como se muestra en la siguiente tabla resumen con su respectivo gráfico:

Tabla 3. 76. Resumen de vacíos de la mezcla para cada % de C.A. y carbón mineral.

Porcentajes de cemento asfáltico (%)	Vacíos de la mezcla (%)					
	Variación de carbón mineral (%)					
	0%	1%	2%	3%	4%	5%
5,0	4,982	5,290	8,727	11,501	13,424	17,602
5,5	3,140	4,124	6,783	9,464	11,370	15,113
6,0	1,868	3,405	5,675	8,499	10,281	12,952
6,5	1,189	2,717	5,226	8,224	9,600	12,094
7,0	0,925	2,508	5,454	8,421	9,980	12,085

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 50. Vacíos de la mezcla para cada % de C.A. y carbón mineral.

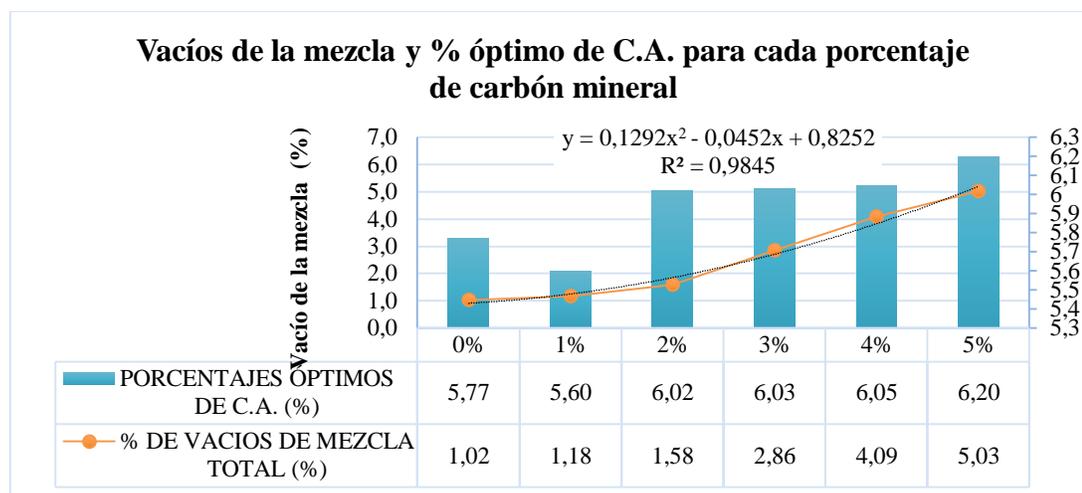


Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 3.50 se observa que la mezcla con 5% de carbón mineral proporciona la curva más elevada de vacíos de la mezcla, y la mezcla con el 0% de carbón mineral proporciona la curva más baja de vacíos de la mezcla, superando por poco la mezcla de 1% de carbón mineral. Por otra parte, se observa que los vacíos de la mezcla tienen una tendencia descendente respecto a la variación de carbón mineral, porque en el porcentaje del 5% de cemento asfáltico (C.A.) hay mayor porcentaje de vacíos de la mezcla, y a medida que va aumentando el contenido de C.A., va disminuyendo los vacíos de la mezcla.

Luego a partir de la tabla 3.74, con los resultados de vacíos de la mezcla se obtiene el siguiente gráfico:

Gráfico 3. 51. Vacíos de la mezcla y % óptimos de C.A. de cada variación de carbón mineral.



Fuente: Elaboración propia.

Si observamos el gráfico 3.51, se observa que los vacíos de la mezcla tienen una curva de tendencia ascendente ajustada al modelo matemático polinómico de segundo grado, cuyo coeficiente de determinación es 0,9845, lo que indica que hay una alta relación directa entre los vacíos de la mezcla y el contenido de carbón mineral, es decir que, a mayor porcentaje de carbón mineral, mayores son los vacíos en la mezcla.

Por otra parte, se observa que el porcentaje óptimo de asfalto sube a medida que aumenta el porcentaje de carbón mineral.

Así también si analizamos los rangos de la norma de 3% a 5% de vacíos de una mezcla densa, especifica que para una mezcla densa ideal es igual al 4% (promedio entre 3% y 5%) de vacíos, y si observamos este valor del 4% de vacíos, la mezcla que más cerca se encuentra es la mezcla con el 4% de carbón mineral.

3.9.3 Análisis de los vacíos del agregado mineral (V.A.M.)

Los vacíos del agregado mineral (V.A.M.), se refiere exclusivamente a los vacíos que generan los agregados sin presencia del ligante asfáltico, y se lo determina a partir de la dosificación granulométrica y los pesos específicos de los agregados. La norma específica que una mezcla asfáltica densa debe tener mínimamente el 13% de vacíos del agregado mineral, para que el ligante asfáltico pueda ocupar fácilmente parte de ese porcentaje.

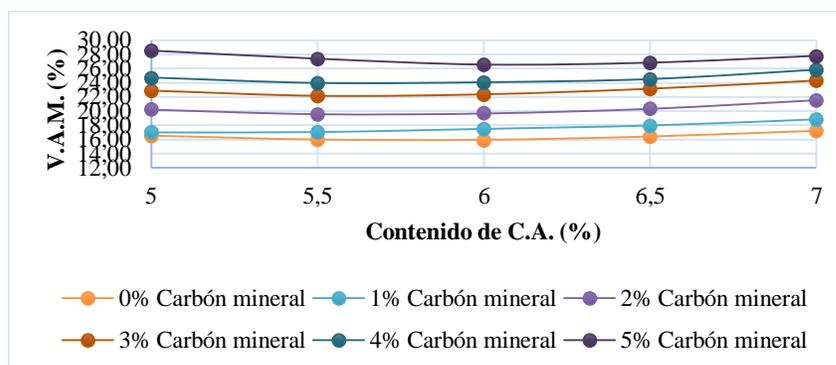
Sin embargo, es necesario analizar el comportamiento de los vacíos del agregado mineral con los diferentes porcentajes de cemento asfáltico (C.A.) para cada variación de carbón mineral, como se muestra en la siguiente tabla resumen con su respectivo gráfico:

Tabla 3. 77. Resumen de vacíos del agregado mineral para cada % de C.A. y carbón mineral.

Porcentajes de cemento asfáltico (%)	Vacíos del agregado mineral V.A.M. (%)					
	Variación de carbón mineral (%)					
	0%	1%	2%	3%	4%	5%
5,0	16,517	17,022	20,246	22,866	24,724	28,521
5,5	15,966	17,075	19,609	22,136	23,976	27,368
6,0	15,926	17,517	19,708	22,343	24,070	26,529
6,5	16,396	17,981	20,364	23,129	24,510	26,804
7,0	17,207	18,838	21,572	24,291	25,819	27,776

Fuente: Elaboración propia.

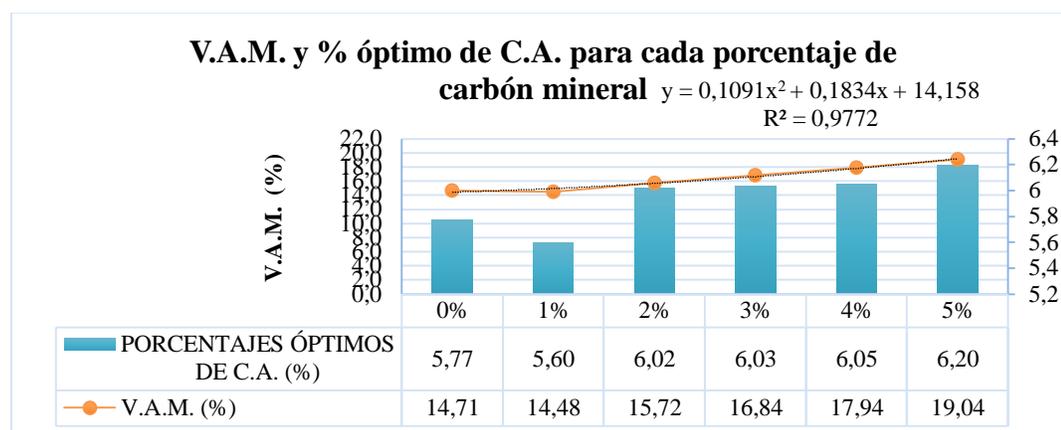
Gráfico 3. 52. Vacíos del agregado mineral V.A.M. para cada % de C.A. y carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 3.52 se observa que la mezcla con 5% de carbón mineral proporciona la curva más elevada de vacíos del agregado mineral, y la mezcla con el 0% de carbón mineral proporciona la curva más baja de vacíos del agregado mineral. Por otra parte, se observa que los vacíos del agregado mineral aumentan muy poco a medida que aumenta el contenido de cemento asfáltico, quedando con un comportamiento en algunos casos casi lineal. Luego a partir de la tabla 3.68, con los resultados de vacíos de la mezcla se obtiene el siguiente gráfico:

Gráfico 3. 53. Vacíos del agregado mineral y % óptimos de C.A. de cada variación de carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

Si observamos el gráfico 3.53, se observa que los vacíos del agregado mineral tienen una curva de tendencia ascendente ajustada al modelo matemático polinómico de segundo grado, cuyo coeficiente de determinación es 0,9772, lo que indica que hay una alta relación directa entre los vacíos del agregado mineral y el contenido de carbón mineral, es decir que, a mayor porcentaje de carbón mineral, mayores son los vacíos del agregado mineral. Por otra parte, se observa que el porcentaje óptimo de asfalto sube a medida que aumenta el porcentaje de carbón mineral.

Así también si analizamos con las especificaciones de la norma donde exige un mínimo de 13 % de vacíos de agregado mineral, entonces todas las mezclas cumplen con las especificaciones siendo la mezcla con el 1% de carbón mineral, la mezcla que menos vacíos

del agregado mineral tiene con el 14,48% y la mezcla con mayores vacíos del agregado mineral es la mezcla al 5% de carbón mineral.

3.9.4 Análisis de la relación betún vacíos (R.B.V.)

La relación betún vacíos (R.B.V.), se refiere a el porcentaje que ocupa el ligante asfáltico los vacíos del agregado mineral (V.A.M.), La norma específica que una mezcla asfáltica densa debe llenar los vacíos del agregado mineral entre el 75% al 82%.

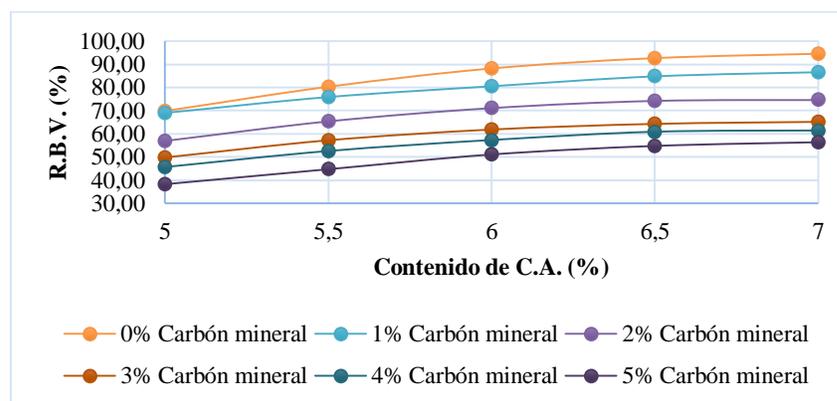
Sin embargo, es necesario analizar el comportamiento de la relación betún vacíos (R.B.V.) con los diferentes porcentajes de cemento asfáltico (C.A.) para cada variación de carbón mineral, como se muestra en la siguiente tabla resumen con su respectivo gráfico:

Tabla 3. 78. Resumen de la relación betún vacíos para cada % de C.A. y carbón mineral.

Porcentajes de cemento asfáltico (%)	Relación betún vacíos R.B.V. (%)					
	Variación de carbón mineral (%)					
	0%	1%	2%	3%	4%	5%
5,0	69,836	68,921	56,894	49,702	45,704	38,283
5,5	80,334	75,848	65,408	57,246	52,575	44,778
6,0	88,269	80,560	71,202	61,961	57,288	51,178
6,5	92,746	84,887	74,335	64,441	60,833	54,882
7,0	94,626	86,687	74,716	65,332	61,348	56,491

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 54. Relación betún vacíos R.B.V. para cada % de C.A. y carbón mineral.



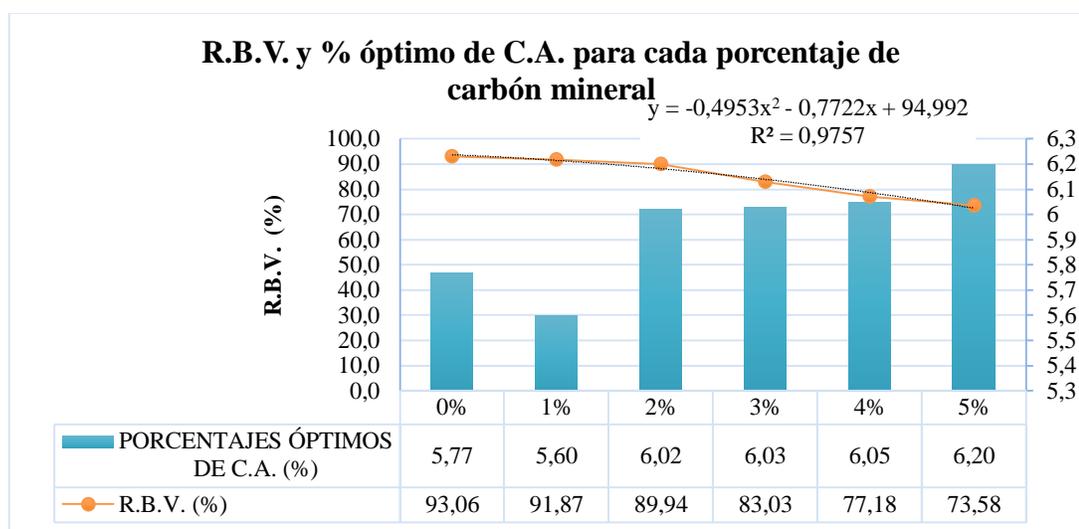
Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 3.54 se observa que la mezcla con 5% de carbón mineral proporciona la curva más baja de la relación betún vacíos (R.B.V.), y la mezcla con el 0% de carbón mineral proporciona la curva más alta de vacíos del agregado mineral.

Por otra parte, se observa que la relación betún vacíos aumenta de forma ascendente a medida que aumenta el contenido de cemento asfáltico, de un 20 a 30%.

Luego a partir de la tabla 3.76, con los resultados de vacíos de la mezcla se obtiene el siguiente gráfico:

Gráfico 3.55. Relación betún vacíos y % óptimos de C.A. de cada variación de carbón mineral



Fuente: Elaboración propia.

Si observamos el gráfico 3.55, se observa que los vacíos del agregado mineral tienen una curva de tendencia descendente ajustada al modelo matemático polinómico de segundo grado, cuyo coeficiente de determinación es 0,9757, lo que indica que hay una alta relación directa entre la relación betún vacíos y el contenido de carbón mineral, es decir que, a mayor porcentaje de carbón mineral, menor es la relación betún vacíos. Por otra parte, se observa que el porcentaje óptimo de asfalto sube a medida que aumenta el porcentaje de carbón mineral.

Así también si analizamos con las especificaciones de la norma donde exige un rango de 75% a 82% de relación betún vacíos, podemos observar que sólo la mezcla con el 4% de carbón mineral las especificaciones.

3.10. ANÁLISIS PARA DETERMINAR EL CONTENIDO ÓPTIMO DE CARBÓN MINERAL Y CEMENTO ASFÁLTICO

Considerando el análisis de las propiedades volumétricas Marshall, y a partir de criterios de cumplimiento de la norma y que tenga el más bajo contenido de cemento asfáltico, se obtienen los siguientes datos para determinar el contenido óptimo de carbón mineral.

Tabla 3. 79. Contenido óptimo de carbón mineral y cemento asfáltico.

Propiedad volumétrica Marshall	Valor	Cemento asfáltico (%)	Carbón mineral (%)
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,416	5,600	1,000
Vacíos de la mezcla 3-5% (%)	4,090	6,050	4,000
V.A.M. mín. 13% (%)	14,480	5,600	1,000
R.B.V. 75-82% (%)	77,180	6,050	4,000
Promedio =		5,825	2,500

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, después de un análisis de calidad con bajo contenido de cemento asfáltico de cada propiedad volumétrica Marshall, se determina un valor de cemento asfáltico con su respectivo porcentaje de carbón mineral. El resultado de las cuatro propiedades se observa en la tabla 3.77, y sus promedios generan el contenido óptimo final de cemento asfáltico igual a 5,825% y de carbón mineral igual a 2,5 %.

3.11 ANÁLISIS DE RESULTADOS CON CONTENIDO ÓPTIMO DE CARBÓN MINERAL

Una vez determinado el contenido óptimo de cemento asfáltico igual al 5,825% y el contenido óptimo de carbón mineral igual a 2,5 %, se procede a aplicarlo en un nuevo diseño de mezcla asfáltica para corroborar si estos valores cumplen con las especificaciones volumétricas Marshall, para ello se procede a realizar 30 briquetas con esos parámetros de diseño.

A continuación, los porcentajes finales de agregado en la mezcla son:

Tabla 3. 80. Ponderación granulométrica final.

Agregado	Porcentaje en la mezcla
Grava	20,0%
Gravilla	35,0%
Arena	42,5%
Carbón mineral	2,5%
Total	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 81. Dosificación final.

Contenido óptimo de carbón mineral (%)	2,5%
Contenido óptimo de cemento asfáltico (%)	5,825%
Porcentaje de agregado (%)	94,18%
Peso del cemento asfáltico (gr)	69,90
Peso de grava (gr)	226,02
Peso de gravilla (gr)	395,54
Peso de arena (gr)	480,29
Peso de carbón mineral (gr)	28,25
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Los pesos obtenidos tanto de los agregados, como del filler y del cemento asfáltico, son en base a los porcentajes de participación dentro de la mezcla asfáltica final.

Figura 3. 6. Compactando de briquetas con óptimos finales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 7. Briquetas compactadas con óptimos finales.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 82. Resultados finales de briquetas con contenidos óptimos de carbón mineral y cemento asfáltico

N° de briqueta	densidad real	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betún vacíos)	Estabilidad	Fluencia
	gr/cm ³	%	%	%	libras	0,01 pulg
1	2,32	4,77	18,05	73,59	3472,62	10
2	2,32	4,60	17,90	74,32	3167,49	18
3	2,34	3,95	17,35	77,24	3188,93	13
4	2,30	5,53	18,71	70,45	2773,12	14
5	2,32	4,87	18,14	73,15	3309,43	18
6	2,33	4,14	17,51	76,38	3452,60	9
7	2,30	5,63	18,79	70,03	3383,04	8
8	2,31	5,24	18,46	71,59	3045,18	12
9	2,35	3,68	17,12	78,48	3670,49	14
10	2,35	3,65	17,09	78,62	3013,44	16
11	2,32	4,62	17,93	74,22	3181,66	19
12	2,33	4,14	17,51	76,35	3035,41	13
13	2,32	4,78	18,06	73,53	2682,64	18
14	2,30	5,57	18,74	70,26	2449,57	17
15	2,32	4,90	18,16	73,03	2870,97	15
16	2,31	4,97	18,22	72,75	2780,27	11
17	2,31	5,09	18,33	72,25	2560,18	12
18	2,32	4,57	17,88	74,45	2922,70	10
19	2,34	3,74	17,17	78,20	3255,71	11
20	2,34	4,06	17,44	76,71	3851,98	11
21	2,33	4,18	17,54	76,18	3329,39	9
22	2,35	3,33	16,82	80,18	3807,10	8
23	2,33	4,29	17,64	75,68	3903,79	12
24	2,36	3,29	16,78	80,40	3851,56	14
25	2,31	5,32	18,52	71,30	3152,00	16
26	2,35	3,68	17,11	78,50	3369,03	14
27	2,33	4,51	17,83	74,72	2858,84	13
28	2,31	5,26	18,48	71,53	2833,85	13
29	2,34	4,02	17,41	76,89	3308,11	14
30	2,33	4,44	17,77	75,02	2999,21	17
Promedio	2,326	4,49	17,82	74,87	3182,67	13,3

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 3.4)

Con los resultados obtenidos de la estadística descriptiva se realiza la prueba de validación de datos, para cada una de las propiedades volumétricas incluidas la estabilidad y fluencia de una mezcla asfáltica.

Tabla 3. 83. Tabla de validación de resultados finales

Propiedades Marshall	Unidad	Valor promedio obtenido	Especificaciones de norma	Validación
Densidad	gr/cm ³	2,326	Mín. 2,25	Cumple
Vacíos de la mezcla	%	4,49	3 - 5	Cumple
Vacíos del agregado mineral	%	17,82	Mín. 13	Cumple
Relación betún - vacíos	%	74,87	65 - 75	Cumple
Estabilidad	lb	3182,67	Mín. 1800	Cumple
Fluencia	pulg	13,3	8 - 14	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.83, se observa claramente que los resultados de todas las propiedades Marshall, cumplen todas las especificaciones de la norma, por lo tanto, se validan los resultados obtenidos de la investigación.

3.12. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

El tratamiento estadístico, se enfoca en determinar los datos estadísticos, ordenarlos de menor a mayor, para luego determinar la estadística descriptiva e inferencial.

3.12.1 Datos estadísticos

Para realizar el análisis estadístico se realizaron 30 briquetas con el óptimo de cemento asfáltico igual a 5,825% y el óptimo de carbón mineral igual a 2,5%, como se observa en la tabla 3.80.

Luego por su mayor importancia, los resultados de estabilidades de las 30 briquetas, serán los datos que se considera en el tratamiento estadístico descriptivo e inferencial, como se observa en la tabla 3.84.

Tabla 3. 84. Datos para tratamiento estadístico.

N° de muestra	Estabilidad (lb)	N° de muestra	Estabilidad (lb)
1	3472,62	16	2780,27
2	3167,49	17	2560,18
3	3188,93	18	2922,70
4	2773,12	19	3255,71
5	3309,43	20	3851,98
6	3452,60	21	3329,39
7	3383,04	22	3807,10
8	3045,18	23	3903,79
9	3670,49	24	3851,56
10	3013,44	25	3152,00
11	3181,66	26	3369,03
12	3035,41	27	2858,84
13	2682,64	28	2833,85
14	2449,57	29	3308,11
15	2870,97	30	2999,21

Fuente: Elaboración propia.

3.12.2 Estadística descriptiva

La estadística descriptiva proporciona valores que permiten describir el estado de los datos a través de medidas de tendencia central. Primero se realiza un ordenamiento de datos:

Tabla 3. 85. Datos ordenados para tratamiento estadístico.

N° de muestra	Estabilidad (lb)	N° de muestra	Estabilidad (lb)
1	2449,57	16	3181,66
2	2560,18	17	3188,93
3	2682,64	18	3255,71
4	2773,12	19	3308,11
5	2780,27	20	3309,43
6	2833,85	21	3329,39
7	2858,84	22	3369,03
8	2870,97	23	3383,04
9	2922,70	24	3452,60
10	2999,21	25	3472,62
11	3013,44	26	3670,49
12	3035,41	27	3807,10
13	3045,18	28	3851,56
14	3152,00	29	3851,98
15	3167,49	30	3903,79

Fuente: Elaboración propia.

Después con estos datos se calcula los valores de la estadística descriptiva, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3. 86. Valores de estadística descriptiva

Media	3182,68 lb
Error típico	70,58 lb
Mediana	3174,58 lb
Moda	-
Desviación estándar	386,57 lb
Varianza de la muestra	149439,60 lb
Rango	1454,21 lb
Mínimo	2449,57 lb
Máximo	3903,79 lb
Número de datos	30
Número de clases	6
Amplitud de intervalos	242,37 lb

Fuente: Elaboración propia.

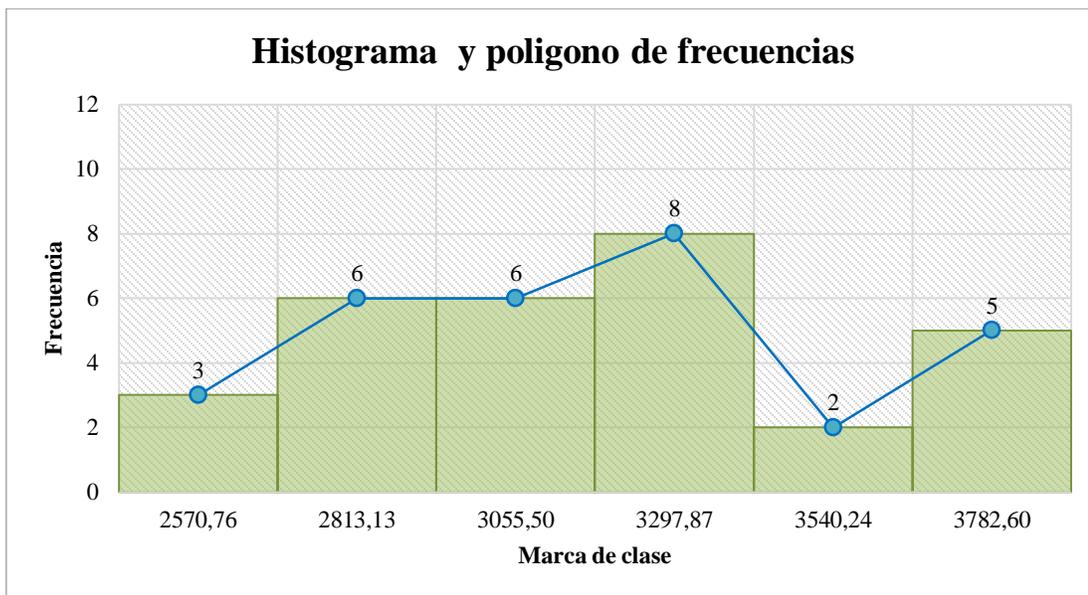
Una vez calculado el rango, los valores máximo y mínimo, el número de clases y la amplitud de intervalos, se procede a calcular las frecuencias con sus respectivos histogramas.

Tabla 3. 87. Marca de clase y frecuencias de datos

N° de clase	Intervalos de clase		Marca	Frecuencia observada	F Acumulada	% de F	% F Acumulado
	Límite inferior	Límite superior					
1	2449,57	2691,94	2570,76	3	3	10,00%	10,00%
2	2691,94	2934,31	2813,13	6	9	20,00%	30,00%
3	2934,31	3176,68	3055,50	6	15	20,00%	50,00%
4	3176,68	3419,05	3297,87	8	23	26,67%	76,67%
5	3419,05	3661,42	3540,24	2	25	6,67%	83,33%
6	3661,42	3903,79	3782,60	5	30	16,67%	100,00%

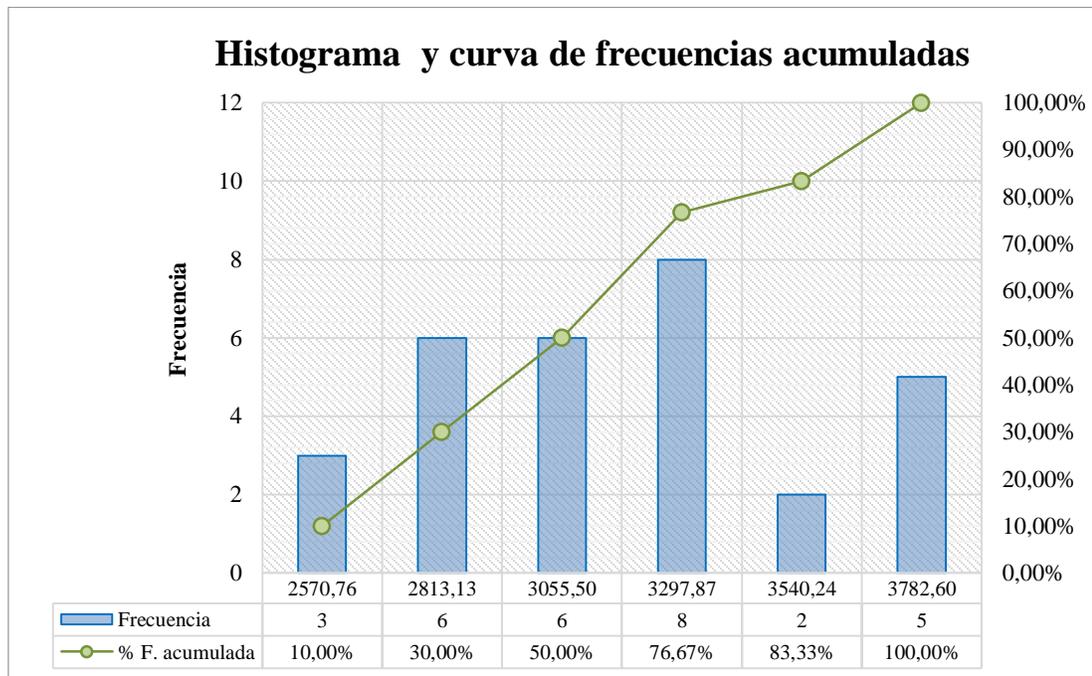
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 56. Histograma y polígono de frecuencias



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 57. Histograma y curva de frecuencias acumuladas



Fuente: Elaboración propia.

En el histograma se observa la marca de clase con mayor cantidad de datos es la marca igual a 3297,87 lb con 8 datos entre el intervalo 3176,68 lb – 3419,05 lb. Luego la marca con menor cantidad de datos, es la marca de 3540,24 lb, que sólo cuenta con 2 datos en el intervalo de 3419,05 lb – 3661,42 lb.

3.12.3. Estadística inferencial

También llamada estadística inductiva, inferencia estadística o teoría de muestras. Abarca un conjunto de procedimientos estadísticos que se utilizan para hacer generalizaciones sobre una población a partir de los datos obtenidos de las 30 muestras analizadas.

Para ello primero se realiza el cálculo de los errores medido de la media:

Tabla 3. 88. Cálculo de error

Número de muestras	n = 30
Desviación estándar	S = 386,57 lb
Rango	r = 1454,21 lb
Nivel de confianza	NC = 95 %
	Z = 1,96
Error típico	Ex = 70,58 lb
Error probable	Ep = 138,33 lb
	Ep = 9,51 %

Fuente: Elaboración propia.

Después se calculan los intervalos de confianza:

$$Va = X \pm Ep$$

Donde

Va = Intervalo de confianza (lb)

X = Media aritmética (3182,68 lb)

Ep = Error probable (138,33 lb)

$$Va = 3182,68 \text{ lb} + 138,33 \text{ lb} = 3321,01 \text{ lb} \rightarrow \text{máximo}$$

$$Va = 3182,68 \text{ lb} - 138,33 \text{ lb} = 3044,34 \text{ lb} \rightarrow \text{mínimo}$$

El intervalo para un nivel de confianza igual al 95 % es de 3044,34 lb a 3321,01 lb.

Después realizamos la prueba de bondad de ajuste por el método de Smirnov Kolmogorov, para ello necesitamos los siguientes datos:

Tabla 3. 89. Datos para el método Smirnov Kolmogorov

Probabilidad	P = 95%
Nivel de significación	NS = 0,05
Número de datos	n = 30
Error probable	Ep = 9,51 % = 0,0951

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. 58. Tabla de valores de α en función del nivel de significancia y del tamaño de la muestra

TAMAÑO DE MUESTRA	NIVEL DE SIGNIFICANCIA α				
	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
n					
1	0.9	0.1	0.975	0.99	0.995
2	0.684	0.776	0.842	0.9	0.929
3	0.565	0.636	0.708	0.689	0.829
4	0.493	0.565	0.624	0.689	0.829
5	0.477	0.509	0.563	0.627	0.669
6	0.41	0.468	0.519	0.577	0.617
7	0.381	0.436	0.483	0.538	0.576
8	0.359	0.41	0.454	0.507	0.542
9	0.339	0.387	0.43	0.48	0.513
10	0.323	0.369	0.409	0.457	0.486
11	0.308	0.352	0.391	0.437	0.468
12	0.295	0.338	0.375	0.419	0.449
13	0.285	0.325	0.361	0.404	0.432
14	0.275	0.314	0.349	0.39	0.418
15	0.266	0.304	0.338	0.377	0.404
20	0.232	0.265	0.294	0.329	0.352
25	0.208	0.238	0.264	0.295	0.317
30	0.19	0.218	0.242	0.27	0.29
40	0.165	0.189	0.21	0.235	0.252
n grande	$1.07/n^{1/2}$	$1.22/n^{1/2}$	$1.36/n^{1/2}$	$1.52/n^{1/2}$	$1.63/n^{1/2}$

Fuente: Fundamentos de hidrología de superficial Aparicio F. 1992

Cálculo del ajuste máximo:

$$\Delta = \frac{1,36}{\sqrt{n}}$$

Donde

Δ = Ajuste máximo propuesto por Smirnov Kolmogorov

n = Número de muestras

$$\Delta = \frac{1,36}{\sqrt{30}} = 0,248$$

Después verificamos la prueba de bondad de ajuste, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.89. Prueba bondad de ajuste por el método Smirnov Kolmogorov

Tipo de medida	Valor	Ajuste máximo (Δ)	¿ $\Delta > \text{Error}$?	Sí = cumple No = no cumple bondad de ajuste
Error probable	0,0951	0,248	Sí	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la anterior tabla, los datos obtenidos sí cumple con la prueba de bondad de ajuste, por lo tanto, nuestros datos son confiables al 95 % de probabilidad de ocurrencia de datos.

- Conclusión

Nuestro error probable es menor al ajuste máximo propuesto p por Smirnov Kolmogorov

$$0,248 > 0,0951$$

3.13 ANÁLISIS DE COSTOS

Para conocer la factibilidad del uso del carbón mineral como filler, además de conocer la mejora de sus propiedades físico mecánicas, es necesario saber el costo que proporciona su aplicación en obra y compararla con una mezcla convencional.

3.13.1 Dosificación para la mezcla asfáltica

Se realizó dos cálculo para una producción de 1 m³ tanto para una mezcla asfáltica convencional como para una mezcla asfáltica con carbón mineral.

El peso unitario estandarizado para el calculo de dosificaciones es: 2250 kg/ m³

a) Descripción de datos:

Tipo de ligante asfáltico = Cemento Asfáltico 85/100

Procedencia del agregado = Charajas

Mezcla asfáltica = Convencional

Tabla 3. 90. Dosificación: Mezcla asfáltica con filler convencional

Componente	Proporción en la Mezcla (%)
Grava	20
Gravilla	35
Arena	45
Ligante Asfáltico	5,77

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 91. Dosificación de la mezcla asfáltica convencional para un metro cubico

Agregado	Proporción de diseño granulométrico (%)	Cantidad (Kg)	Peso específico (%)	Volumen (m ³)
Grava	20,0	450,00	2.631	0,171
Gravilla	35,0	787,50	2.699	0,292
Arena	45	1012,50	2.687	0,377
Ligante asfaltico	5,77	129,83	1.017	-

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtienen los rendimientos por m³, para cada componente de la mezcla asfáltica:

Tabla 3. 92. Rendimiento final por m³ de carpeta asfáltica

Componente	Rendimiento	Unidad
Ligante Asfáltico	129,83	Kg
Grava	0,171	m ³
Gravilla	0,292	m ³
Arena	0,377	m ³
Filler	0,000	m ³

Fuente: Elaboración propia.

b) Descripción de datos:

Tipo de ligante asfáltico = Cemento Asfáltico 85/100

Procedencia del agregado = Charajas

Mezcla asfáltica = Carbon mineral

Tabla 3. 93. Dosificación: Mezcla con filler carbón mineral

Componente	Proporción en la Mezcla (%)
Grava	20
Gravilla	35
Arena	42,5
Carbon mineral	2,5
Ligante Asfáltico	5,825

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 94. Dosificación de la mezcla asfáltica con carbón mineral para un metro cubico

Agregado	Proporción de diseño granulométrico (%)	Cantidad (Kg)	Peso específico (%)	Volumen (m ³)
Grava	20,0	450,00	2.631	0,171
Gravilla	35,0	787,50	2.699	0,292
Arena	42,5	956,25	2.687	0,356
Carbon mineral	2,5	56,25	8.808	0,006
Ligante asfaltico	5,825	131,06	1.017	-

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtienen los rendimientos por m³, para cada componente de la mezcla asfáltica:

Tabla 3. 95. Rendimiento final por m³ de carpeta asfáltica

Componente	Rendimiento	Unidad
Ligante Asfáltico	131,06	Kg
Grava	0,171	m ³
Gravilla	0,292	m ³
Arena	0,356	m ³
Filler	0,006	m ³

Fuente: Elaboración propia.

Con los rendimientos obtenidos, se procede a realizar el cálculo de los precios unitarios para dos casos, el primero considerando un filler convencional polvo de roca, y el segundo considerando como filler al Carbón Mineral, para ambos casos se obtienen la siguiente planilla de precios unitarios de producción de mezcla asfáltica compactada, para 1 m³, (Ver anexo 4).

Con estos resultados podemos analizar el siguiente resultado de costos:

Tabla 3. 96. Resultado final de costos.

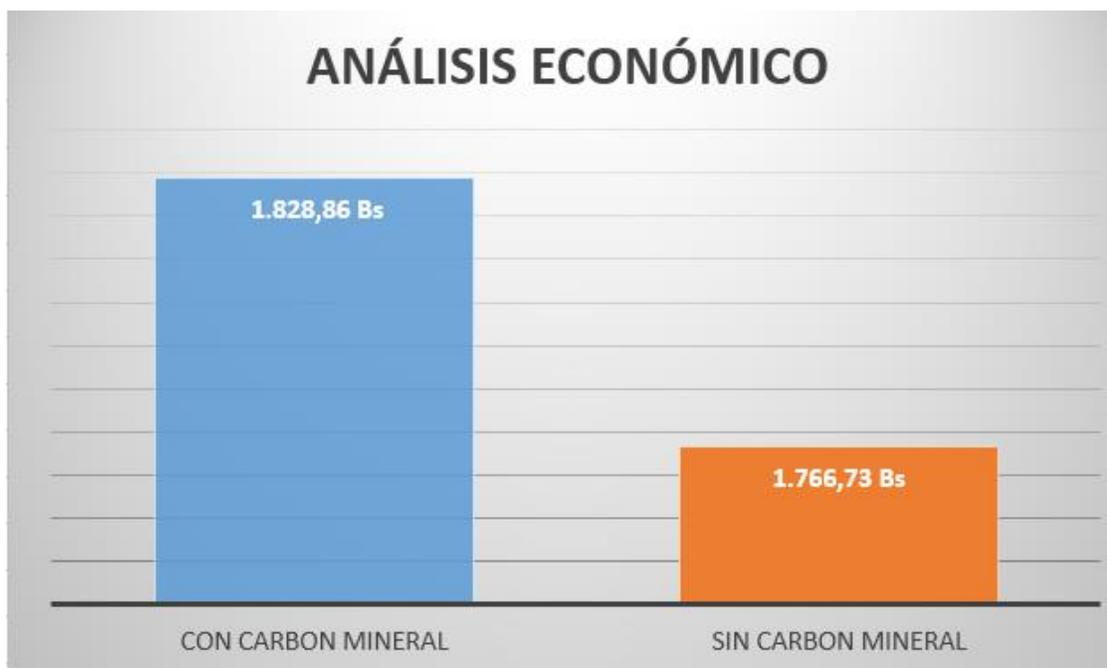
Descripción	Precio Unitario para 1 m³ (Bs.)
Carpeta asfáltica con filler convencional	1.766,73
Carpeta asfáltica filler Carbón Mineral,	1.828,86

Fuente: Elaboración propia. (Anexo 4)

Como se observa en la tabla 3.96, se puede evidenciar que para 1 m³ de producción de mezcla asfáltica compactada con filler convencional polvo de roca cuesta 1.766,73 bs y filler Carbón Mineral cuesta 1.828,86 bs, lo que implica que la mezcla con Carbón Mineral

es más cara en un 3,52 %, sin embargo, proporciona mejores beneficios técnicos de calidad.

Gráfico 3. 59. Análisis económico de la mezcla asfáltica



CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Una vez terminada la investigación se tienen las siguientes conclusiones:

- Se realizó con normalidad los diferentes ensayos de caracterización de los agregados pétreos, agregado artificial y cemento asfáltico. Donde se pudo verificar que los mismos cumplen con las especificaciones de las normas AASHTO y ASTM para el diseño de mezclas asfálticas.
- Se realizó el diseño de las mezclas asfálticas empleando el método de diseño Marshall, donde se utilizó el carbón mineral para cada diseño.
- De acuerdo a los ensayos realizados en laboratorio se determinó que las mezclas asfálticas con porcentaje ideal sería cemento asfáltico igual al 5,825% y carbón mineral igual a 2,5 %, esto se puede evidenciar en la **tabla 3.82**.
- Del análisis de las propiedades volumétricas, se concluye que a mayor contenido de carbón mineral: menor es su densidad, mayores son los vacíos de la mezcla, mayores son los vacíos del agregado mineral y menor es la relación betún vacíos. Esto significa que el carbón mineral al ser un filler limoso, no cumple su misión como llenante mineral, porque no ocupa los vacíos esperados, más al contrario, genera mayores vacíos y es por eso que la densidad baja a mayor presencia de carbón mineral.
- Del análisis de las propiedades Marshall se observó los resultados de estabilidad, donde el carbón mineral aumenta hasta un 100% respecto a los valores de la mezcla sin carbón mineral. Esto probablemente se debe a que el carbón mineral sufre una reacción química al contacto con el cemento asfáltico, logrando resultados muy positivos y favorables para poder aplicarlo en la imprimación de carpetas asfálticas de cualquier carretera de nuestro medio, **tabla 3.73**.
- Desde el punto de vista económico, en la **gráfica 3.59** se puede evidenciar que los precios para las mezclas asfálticas con carbón mineral, son más elevados en

comparación con la mezcla asfáltica normal debido al costo de este material artificial, sin embargo, proporciona mejores beneficios de mejor calidad y durabilidad.

- De acuerdo a la hipótesis planteada se concluye que, si diseñamos una mezcla asfáltica utilizando como agregado el carbón mineral, sus propiedades cumplen con las especificaciones de diseño por lo tanto este agregado artificial puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas, con las especificaciones de las normas AASHTO y ASTM para el diseño de mezclas

4.2 RECOMENDACIONES

Una vez concluido el trabajo de investigación se tienen las siguientes recomendaciones:

- Se debe seguir lo expuesto en la norma AASTHO y ASTM, tanto de caracterización de los componentes de la mezcla asfáltica, como del diseño granulométrico, para garantizar la calidad de la mezcla asfáltica.
- Se debe considerar con anticipación la dotación del carbón mineral, ya que este producto es proporcionado en yacimientos mineros según requerimiento.
- Para facilitar la trabajabilidad al momento de realizar las briquetas, se debe realizar un pesado previo de los agregados a utilizar en su fabricación y separarlas en bolsas o recipientes, reduciendo el tiempo de fabricación.
- Uniformizar la compactación de las briquetas, ya sea con martillo automático o con martillo manual tratando de mantener altura y velocidad constante, para evitar variación de resultados.
- Evitar sobrecalentar varias veces el cemento asfáltico debido a que pierde sus propiedades, por lo que se debe calentar el material solo al momento de realizar los ensayos.