

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

La ceniza orgánica es un subproducto de la quema de madera muerta en la producción de ladrillos artesanales. Cuando se adiciona la ceniza orgánica en la mezcla asfáltica caliente como filler (material que pasa por el tamiz N°200), este material puede afectar el comportamiento de la mezcla. La influencia de la ceniza orgánica en las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas se puede determinar mediante diferentes metodologías, como el método Marshall.

La utilización de cenizas orgánicas provenientes de hornos que producen ladrillos artesanales como filler, en mezclas asfálticas calientes permite evaluar el impacto de estas cenizas en las propiedades de la mezcla, tales como la estabilidad y el flujo. Para evaluar estas propiedades, se utiliza el ensayo del método Marshall. Además, se evalúa la adherencia mediante el ensayo de conexión en bandeja. En conclusión, las cenizas orgánicas mejoran la estabilidad y el flujo cuando se añaden en un porcentaje del 2.00%, mientras que la adherencia se mejora con una adición del 7.00% de cenizas orgánicas como aditivo en la mezcla asfáltica. (Matos Neyra, 2018)

En la presente investigación se propone analizar los efectos de la adición de ceniza orgánica (como filler), un subproducto de la quema de madera en hornos utilizada en la producción de ladrillos artesanales, en los vacíos de agregado mineral (V.A.M.) de las mezclas asfálticas en caliente por la metodología Marshall, con el fin de conocer si el aditivo puede utilizarse técnicamente en mezclas asfálticas.

La elaboración de la investigación se basa en la teoría científica y normativas correspondientes al área de obras viales en mezclas asfálticas, que se describen más adelante.

La aplicación de la ceniza orgánica como reemplazo de agregado mineral en mezclas asfálticas de obras viales, podría ser una alternativa favorable para utilizar este material y garantizar una obra de buena calidad y durabilidad. De esta manera, se pueden brindar a la sociedad obras viales eficientes y sostenibles en su tiempo de servicio.

1.2. Antecedentes

García (2021), “Análisis de la influencia en las propiedades volumétricas de mezclas asfálticas en caliente con carbón mineral”. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija.

Su objetivo es 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. De su 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. La relación que posee esta investigación respecto a la presente, es el análisis en la variable dependiente que son los vacíos de agregado mineral en las mezclas asfálticas, que son modificadas en sustitución de filler.

Pomari (2022), “Influencia de la ceniza del tronco de eucalipto en las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente”, Universidad César Vallejo, Puno-Perú.

Su objetivo de la investigación es analizar la influencia de la ceniza del tronco de eucalipto en porcentajes de 1.0%, 2.0% y 3.0% en el comportamiento de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente. Obteniendo como resultado que el reemplazo de la ceniza del tronco de eucalipto en la mezcla asfáltica, es técnicamente eficiente en el comportamiento de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente realizado en laboratorio mediante el ensayo Marshall. Siendo así tiene relación con la presente investigación respecto al manejo de aplicación de la variable independiente ceniza de eucalipto.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación académica

La modificación de la mezcla asfáltica es esencial para mejorar sus propiedades y adaptarlas a diferentes condiciones de uso.

De acuerdo al Manual de Diseño de Pavimentos; la llenante mineral se incorpora a la mezcla, con el fin de disminuir el porcentaje de asfalto necesario para obtener un determinado porcentaje de vacíos en la mezcla.

Declarando que; la disminución del porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica produce una disminución de la porosidad y en consecuencia una disminución de la penetrabilidad del aire y del agua en el pavimento.

El presente estudio permite realizar ensayos experimentales bajo el concepto teórico definido en la normativa que rige sobre los diseños de mezclas asfálticas definidas en el Manual técnico para el diseño de carreteras en Bolivia, Vol.4.

1.3.2. Justificación sobre la técnica - práctica

En la ciudad de Tarija existe la industria ladrillera artesanal, la cual genera como subproducto la ceniza orgánica residual, siendo éste material muy fino y tiene como característica que cumple con los requerimientos granulométricos del filler o llenante mineral el cual es importante en el diseño de mezclas asfálticas en caliente; ya que este material ayuda a complementar la curva granulométrica del agregado fino.

Las cenizas orgánicas son utilizadas como estabilizadoras en capas subrasante de obras viales, más aún si el suelo suele ser arcilloso; debido a que las cenizas orgánicas mejoran sus propiedades, de acuerdo con una investigación de Mamani y Yataco, 2017.

La selección adecuada del filler puede ayudar a optimizar los costos de producción de mezclas asfálticas. Al elegir un filler alternativo, se pueden reducir los gastos sin comprometer la calidad del pavimento.

1.3.3. Justificación e importancia social

Al utilizar la ceniza orgánica como filler, se podría reciclar este material debido a que la industria ladrillera artesanal de Cercado-Tarija, genera aproximadamente 50 Tn/año de ceniza orgánica volante, cuando éste solo es desechado sobre el suelo en la misma industria.

La cantidad de ceniza orgánica obtenida es de 4 Tn/mes, siendo un llenante mineral óptimo para las mezclas asfálticas, este podría ser utilizado para la construcción aproximada de 2 a 4 km por mes de carreteras en Tarija.

1.4. Planteamiento del problema

1.4.1. Situación problemática

En el diseño de mezclas asfálticas en caliente, la dosificación se realiza con agregados pétreos y cemento asfáltico. Es común añadir aditivos con el fin de modificar sus propiedades. Además, el reemplazo del filler o pasante del tamiz N°200 se utiliza para llenar los vacíos entre los agregados, lo que influiría en las propiedades volumétricas. Esto se logra a través de la aplicación de diferentes metodologías.

En las mezclas asfálticas, la adición de ceniza orgánica subproducto de quema de madera en ladrilleras artesanales como filler, no da certeza en los resultados de los vacíos del agregado mineral (V.A.M.) de las propiedades volumétricas.

El no realizar la presente investigación, quedará la incertidumbre en los resultados de los vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica modificada.

Para conocer los resultados de los efectos de la adición de ceniza orgánica como filler en los vacíos de agregado mineral se debe realizar un análisis en la mezcla asfáltica en caliente mediante el método Marshall.

1.4.2. Delimitación temporal

La aplicación de la presente investigación no interfiere en el transcurso del tiempo, puede ser aplicada en cualquier momento siempre y cuando se cumpla con las especificaciones del material a utilizar.

La delimitación temporal de la investigación se observa en la siguiente tabla:

Tabla 1.1. Delimitación temporal

Fecha aproximada	Evento	¿Cómo tributa este dato?
9 de agosto del 2023	Exploración del tema.	Debido a las constantes fallas en la mezcla asfáltica, existe la necesidad de mejorar este aspecto.
25 septiembre del 2023	Se inicia la planificación.	En base a propiedades que posee la ceniza orgánica se determina la adición a la mezcla asfáltica.
8 de noviembre del 2023	Se da procedente el título de la investigación.	Esto es en junta de departamento.
20 de diciembre del 2023	Se aprueba la asignatura CIV 501.	Perfil de investigación aprobado en el diseño; teórico y metodológico.

22 de febrero del 2024	Se inicia los trámites de solicitudes.	Se refiere a la obtención de permisos institucionales necesarios para la ocupación de laboratorios.
11 de marzo del 2024	Se comienza con el relevamiento de datos.	Con el debido conocimiento de técnicas y normas de estudio de materiales de la mezcla asfáltica, en los laboratorios se realiza la caracterización de materiales.
9 de abril del 2024	Se comienza con el pre diseño	Considerando cuatro combinaciones.
29 de abril del 2024	Se realiza el diseño final.	Con el contenido óptimo de ceniza orgánica se realiza el diseño final de investigación.
2 de mayo del 2024	Análisis de resultados	Se verifica la validez de la investigación.
20 de mayo del 2024	Entrega de borrador	Borrador completo para ser revisado aprobado por el docente.
10 de Junio del 2024	Entrega de proyecto final	La entrega final y corregida las observaciones mencionadas por el docente.
3 de Julio del 2024	Pre defensa	Pre defensa con tribunales
10 de Julio	Correcciones	Puntos observados por tribunal a corregir.
Diciembre	Defensa Pública	Defensa final con tribunales.

Fuente: Elaboración propia

1.4.3. Delimitación del espacio

El desarrollo del proyecto de investigación se realiza en base a:

- La base de operaciones, es el Laboratorio de Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.
- El área temática principal; son las mezclas asfálticas densas.

La aplicación del proyecto de investigación se localiza en el departamento de Tarija, provincia Cercado; de la cual a continuación, se delimita la selección de componentes de la mezcla asfáltica, como ser: los agregados pétreos, el cemento asfáltico y la ceniza orgánica subproducto de ladrilleras artesanales.

Selección de agregados pétreos

En la presente investigación, los agregados pétreos serán proporcionados por la Posta Municipal de Tarija, la cual proviene de la planta chancadora Garzón.

Selección del cemento asfáltico

El cemento asfáltico será obtenido de la planta asfáltica ubicada en la Posta Municipal de Tarija. El cemento asfáltico convencional PEN 85/100 es de procedencia Ventanilla, Refinería La Pampilla REPSOL S.A., Perú.

Selección de ceniza orgánica

En la presente investigación se trabajará con la ceniza orgánica de ladrilleras artesanales del valle central de la ciudad Tarija.

1.4.4. Formulación del problema

¿Cuál es el efecto de la adición de ceniza orgánica como filler en los vacíos de agregado mineral de una mezcla asfáltica densa en caliente?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Analizar los efectos de la adición de ceniza orgánica, subproducto de ladrilleras artesanales como filler en los vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica en caliente por medio del método Marshall; de tal manera que, se logre conocer si el aditivo puede utilizarse técnicamente.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar las características de los agregados pétreos, ceniza orgánica y cemento asfáltico.
- Diseñar las mezclas asfálticas en caliente mediante la metodología Marshall.
- Identificar los cambios en los vacíos de agregado mineral respecto a la ceniza orgánica, determinando sus contenidos óptimos.
- Realizar un análisis de la adición de ceniza orgánica que se puede utilizar en la mezcla asfáltica.

1.6. Hipótesis

La adición de ceniza orgánica como filler en la dosificación de mezclas asfálticas en caliente; tiene un efecto favorable en los valores de vacíos de agregado mineral de las propiedades volumétricas Marshall.

1.6.1. Identificación de variables

- Variable independiente:

X = La cantidad de ceniza orgánica expresada en porcentaje (%)

- Variable dependiente:

Y = El valor de vacíos de agregado mineral (V.A.M.) expresada en porcentaje (%)

1.7. Conceptualización y operacionalización de variables

Tabla 1.2. Operacionalización de la variable independiente

Variable independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Cantidad de ceniza orgánica.	Se refiere al incremento gradual de ceniza orgánica a la mezcla asfáltica.	Se adiciona a la mezcla asfáltica como polvo mineral pasante el tamiz N°200.	Porcentaje [%]	Porcentaje propuesto para la mezcla asfáltica.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.3. Operacionalización de la variable dependiente

Variable Dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Vacíos de agregado mineral (V.A.M.)	Se refiere a la variación de porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.	Vacíos de aire	Porcentaje [%]	Porcentaje del volumen de vacíos no penetrantes en la mezcla.
		Contenido de cemento asfáltico.	Porcentaje [%]	Cantidad aplicada de acuerdo a metodología.

Fuente: Elaboración propia

1.8. Alcance y tipo de investigación

El alcance de la presente investigación adopta un Diseño Experimental, debido a la manipulación de variables en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

La investigación tiene un enfoque de tipo causal explicativo. Puesto que la variable independiente, ceniza orgánica; y la variable dependiente, vacíos de agregado mineral (V.A.M.) de la mezcla asfáltica en caliente, establece la relación de causa y efecto; lo que lleva a analizar su relación de forma explicativa del por qué ocurre y debido a qué, cumpliendo con las especificaciones técnicas de mezclas asfálticas para la construcción de pavimentos.

El diseño de la mezcla asfáltica con la adición de ceniza orgánica, subproducto de ladrillera artesanal, se llevará a cabo con el fin de determinar si la manipulación de porcentajes de este material, cuando se añade como filler en la mezcla total, refleja resultados favorables en los vacíos de agregado mineral (V.A.M.). La investigación se realizará a nivel de laboratorio. Para ello se seguirá el Método de Diseño Marshall, el cual comprende la caracterización de materiales que componen la mezcla asfáltica bajo normas ASTM-AASHTO, realizando la elaboración de briquetas de pre diseño que a través de pruebas de densidad, estabilidad y flujo Marshall mediante sus gráficas de resultados se determinará el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y ceniza orgánica de la mezcla asfáltica densa en caliente.

Posteriormente, se llevarán a cabo un número confiable de muestras de mezcla asfáltica, utilizando los resultados obtenidos del pre diseño, para aplicarlas a las pruebas finales del método Marshall. Finalmente, mediante un tratamiento estadístico se validarán los resultados en los vacíos de agregado mineral (V.A.M.).

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

❖ Marco conceptual

2.1. Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica se puede definir como una combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente el comportamiento funcional de la misma como pavimento. (Garnica, 2005, p. 1)

2.1.1. Clasificación de mezclas asfálticas

La clasificación de la mezcla asfáltica en caliente se divide en 4, siendo la primera de acuerdo a su posición relativa, de acuerdo a la granulometría, de acuerdo a la cantidad de huecos en la mezcla y de acuerdo al proceso constructivo; tal como se muestra en la siguiente tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación de mezclas asfálticas

De acuerdo a su posición relativa	Carpeta de rodadura	Es una capa aglomerada de agregados pétreos y asfalto, generalmente semi cerrada o cerrada diseñada para resistir la abrasión y desintegración por efectos ambientales.
	Capa intermedia	Mezcla generalmente abierta y graduada densa o gruesa colocada sobre la base.
	Base asfáltica	Mezcla generalmente abierta colocada sobre la base granular o subrasante, a la cual se le superpone la capa intermedia o rodadura.
De acuerdo a la granulometría	Abierta	Porcentaje que pasa tamiz N° 8: 5-20
	Gruesa	Porcentaje que pasa tamiz N° 8: 20-35
	Semi densa	Porcentaje que pasa tamiz N° 8: 28-42
	Densa	Porcentaje que pasa tamiz N° 8: 35-50
	Fina	Porcentaje que pasa tamiz N° 8: >50

De acuerdo a la cantidad de huecos en la mezcla	Abierta	Huecos >6%
	Mezcla semi densa o densa	Huecos menores o igual al 6%
De acuerdo al proceso constructivo		En caliente En frío

Fuente: Adatao, 2019

2.1.2. Mezcla asfáltica densa en caliente

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como “mezcla asfáltica” en caliente, la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante, los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior al ambiente. (Padilla, 2019, p. 47)

Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos, aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en volumen de agregados pétreos. (Padilla, 2019, p. 47)

2.2. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría del agregado a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas en la mezcla y se satisfagan los requisitos específicos del proyecto. La selección apropiada de los materiales (con la calidad suficiente) que constituirán la mezcla y de sus proporciones correctas, requiere el conocimiento de las propiedades más significativas de las mezclas, y de su influencia en el comportamiento del pavimento. (Garnica, p. 2, 2005, citado por Cepeda, 2002)

Para una aplicación específica e independientemente del procedimiento de diseño empleado, las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica en caliente son:

2.2.1. Estabilidad o resistencia a las deformaciones plásticas

Esta propiedad se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento, debidos a las cargas que resultan del tránsito vehicular. Un pavimento es estable cuando conserva su forma; y es inestable cuando desarrolla deformaciones permanentes, corrugaciones y otros signos de desplazamiento de la mezcla. (Garnica, 2005, p. 2)

La estabilidad depende, sobre todo, de la fricción interna y la cohesión. La fricción interna depende de la textura superficial, forma de la partícula, y granulometría del agregado; así como de la densidad de la mezcla, y la cantidad y tipo de asfalto; mientras que la cohesión depende del contenido de asfalto. La cohesión se incrementa con el incremento del contenido de asfalto, hasta un punto óptimo, después del cual el aumento en el contenido de asfalto forma una película demasiado gruesa en las partículas de asfalto, lo que produce una pérdida de fricción entre las partículas de agregado. (Garnica, 2005, p. 2)

2.2.2. Durabilidad

Es la propiedad de la mezcla asfáltica que describe su capacidad para resistir los efectos perjudiciales del aire, agua, temperatura y tránsito que pueden provocar envejecimiento del asfalto, desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado. Una buena mezcla asfáltica no debe sufrir envejecimiento excesivo durante la vida en servicio. Esta propiedad se relaciona con el espesor de la película de asfalto, y con los vacíos de aire. (Garnica, 2005, p. 3)

2.2.3. Flexibilidad

“Es la capacidad de la mezcla asfáltica para amoldarse, sin sufrir agrietamiento o fisuración, a los asentamientos y movimientos graduales de la base y la subrasante. En ocasiones esta propiedad presenta conflictos con los requerimientos de estabilidad”. (Garnica, 2005, p. 3)

2.2.4. Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir cargas repetidas causadas por el paso de los vehículos. El agrietamiento por fatiga está relacionado con el contenido y la rigidez del asfalto. Por su parte, los contenidos de asfalto muy altos harán que la mezcla tienda

más a deformarse elásticamente (o a deformarse menos) que a fracturarse bajo carga repetida. Aunque también debe señalarse que la resistencia a la fatiga depende en gran medida de la relación entre el espesor estructural de la capa y la carga. (Garnica, 2005, p. 3)

2.2.5. Resistencia al fracturamiento por baja temperatura

“Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no agrietarse en condiciones de bajas temperaturas. Depende principalmente de la rigidez del asfalto a bajas temperaturas”. (Garnica, 2005, p. 3)

2.2.6. Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad

Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento. (Garnica, 2005, p. 3)

2.2.7. Resistencia al deslizamiento

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento, en particular cuando está húmeda. Una resistencia al deslizamiento baja se relaciona generalmente con las características del agregado y el contenido de asfalto. (Garnica, 2005, p. 3)

2.2.8. Trabajabilidad

Es la propiedad relacionada con la facilidad con que la mezcla asfáltica es colocada y compactada in situ. Una buena mezcla debe ser capaz de permitir su colocación y compactación, sin que se requiera un esfuerzo demasiado grande. Esta propiedad, generalmente depende de uno, o una combinación, de los siguientes factores: características del agregado, la granulometría, el contenido, y la viscosidad del asfalto (Garnica, p. 4, 2005, citado por Cepeda, 2002)

2.3. Componentes de la mezcla asfáltica

2.3.1. Cemento asfáltico

“Material obtenido por refinación de residuos de petróleo y que debe satisfacer los requerimientos establecidos para su uso en la construcción de pavimentos”. (Pérez, 2005, p. 2)

Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación. (UMSS, 2019, p. 37)

2.3.2. Agregados pétreos

Los agregados son el componente principal de las mezclas asfálticas, representando alrededor del 95% de la mezcla. Los agregados se dividen en tres categorías principales: agregados gruesos, agregados finos y polvo mineral.

- **Agregado grueso.** Cantidad de agregado retenido en el tamiz No. 4 (4,75 mm). En la mezcla asfáltica, el agregado grueso ayuda a brindar resistencia mecánica al conjunto mineral que la conforma, además, regula el rozamiento interno entre las partículas debido a la exigencia de su angularidad, evitando que la mezcla sufra de fragmentación o desgaste. (Ganchozo y Rodriguez, 2022, p. 31)
- **Agregado Fino.** Material pasante del tamiz de No. 4 (4,75 mm) y material retenido en el tamiz de No. 200 (75 μ m). El agregado fino proviene de trituración de piedras de canteras, grava o arena natural de yacimientos. (Ganchozo y Rodriguez, 2022, p. 31)
- **Polvo Mineral.** Es un material no arcilloso que pasa el tamiz No. 200. Se incorpora a la mezcla con el fin de aumentar la estabilidad, y disminuir el porcentaje de asfalto necesario para obtener un determinado porcentaje de vacíos en la mezcla. Es suficiente una cantidad muy pequeña para aumentar la estabilidad, mientras el índice de flujo permanece prácticamente constante. (UMSS, 2019, p. 260)

“Una pequeña cantidad de llenante mineral, puede reducir el contenido óptimo de asfalto. El llenante mineral es un factor importante que afecta a la durabilidad, por esta razón se debe controlar estrictamente su cantidad y su calidad”. (UMSS, 2019, p. 260)

2.3.3. Ceniza orgánica

Para Morales, D. (2015), las cenizas orgánicas se pueden dividir en cenizas de fondo, cenizas volantes (definidas así por la norma ASTM) y combinados; las cenizas de fondo son residuos que se encuentran en el fondo de los hornos y poseen diámetros de partícula mayores a 0.075 mm (retenido malla N°200) característicos del carbón quemado, este residuo es más usado en estudios como material de filler (del inglés “relleno”), ya que posee un alto potencial puzolánico; las cenizas volantes son residuos que quedan atrapados en los filtros de los hornos y poseen diámetros menores a los 0.075 mm (pasante malla N° 200); este ha demostrado lograr reacciones en microestructuras cristalinas y amorfas a partir de la síntesis de aluminosilicatos alcalinos con una solución activadora de hidróxido alcalino y silicato alcalino, a este producto se le llama geopolímeros, que obtiene propiedades puzolánicas similares a las del cemento Portland.

Mientras que para Mamani (2017), las cenizas orgánicas de fondo comprenden la fracción gruesa que se produce en la cámara de combustión y se aloja en la cámara inferior de un horno de cocción, a menudo se mezcla con impurezas minerales contenidas en el combustible, como lodos, residuo transportado por los ases de combustión en un horno”. El material cae al fondo del horno y se separa mecánicamente, la ceniza de fondo constituye la mayor parte, aproximadamente un 60 % del total de cenizas producidas por la combustión de madera de eucalipto y carbón mineral.

Figura 2.1 Ceniza orgánica



Fuente: Elaboración propia

Las características de las cenizas dependen de múltiples factores como el tipo de madera, el sistema de quemado y el proceso de vaciado del horno, por lo cual se hace muy difícil establecer propiedades generales, esto hace que no exista una referencia universal; sin embargo, existe una excepción a lo antes mencionado y es que se sabe que las cenizas orgánicas tienen un alto contenido de sílice dentro de su composición química, por lo que se puede establecer que las cenizas son de características puzolánicas. (Matos, 2018, p. 29)

2.3.3.1. Origen y proceso de obtención de la ceniza orgánica

Swisscontac (2013). El estudio denominado “Diagnóstico de Mercado del sector Ladrillero Artesanal a nivel Nacional”, reportó que en el departamento de Tarija existen zonas potenciales de producción de ladrillos, en las cuales operan 56 hornos, que representan el 2 por ciento de los hornos en Bolivia. Ese documento también señala que los 56 hornos aportan el 2,4 % de la producción de ladrillo Gambote y Tubular, los insumos principales para la producción es aserrín y arcilla. Asimismo, reportó que la producción estimada en Tarija es de 18.612.000 ladrillos gambote por año, que utiliza como combustible leña, lo que representa el 4,35 % de la producción nacional. En Cercado Tarija existen 16 ladrilleras artesanales con hornos de bocas transversales que se tomaron en cuenta en la auditoría, once están en Villa Busch, cuatro en Turumayo y una en el barrio 1ro de Mayo.

Figura 2.2. Horno de ladrillera artesanal



Fuente: Elaboración propia

La ceniza orgánica es un subproducto de la combustión de especies forestales que existen en la región (eucalipto, pino, sauce), de madera de construcción en desuso y recortes de los aserraderos. La ceniza de fondo se obtiene después de 2 a 3 días de enfriamiento de los hornos, el acopio de ceniza se realiza en forma manual a través de una pala, que permite remover la ceniza, amontonándola para meterla en sacos. (Swisscontac, 2013, p. 17)

2.3.3.2. Propiedades físicas de la ceniza orgánica

“La forma, fineza, distribución, densidad y composición de las partículas de cenizas orgánicas influyen en las características del producto para uso final; en la tabla 2.2 se muestra las principales propiedades físicas de la ceniza orgánica”. (Matos, 2018, p. 32)

Tabla 2.2. Propiedades físicas de las cenizas orgánicas

PROPIEDADES FÍSICAS	RANGO DE VALORES
Aspecto Externo	polvo fino grisáceo
Tamaño de partícula	1 - 200 μm
Superficie específica	0,2 - 25 m^2/g
Densidad	0,5 - 0,8 g/cm^3
Peso específico	1,9 - 2,8 g/cm^3
Fusión	950 - 1550 $^{\circ}\text{C}$
Absorción de líquido	20 - 30 % de agua

Fuente: Adaptada de Roa Parra (2016)

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:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos
- Vacíos en el agregado mineral
- Contenido de asfalto efectivo

2.4.1.Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. (Instituto de Asfalto, 1982, p. 57)

En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ, logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio. (Instituto de Asfalto, 1982, p. 58)

2.4.2. Vacíos de aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3% y 5%, dependiendo del diseño específico. (Instituto de Asfalto, 1982, p. 58)

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie. (Instituto de Asfalto, 1982, p. 58)

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente menos del 8 %. (Instituto de Asfalto, 1982, p. 58)

2.4.3. Vacíos en el agregado mineral

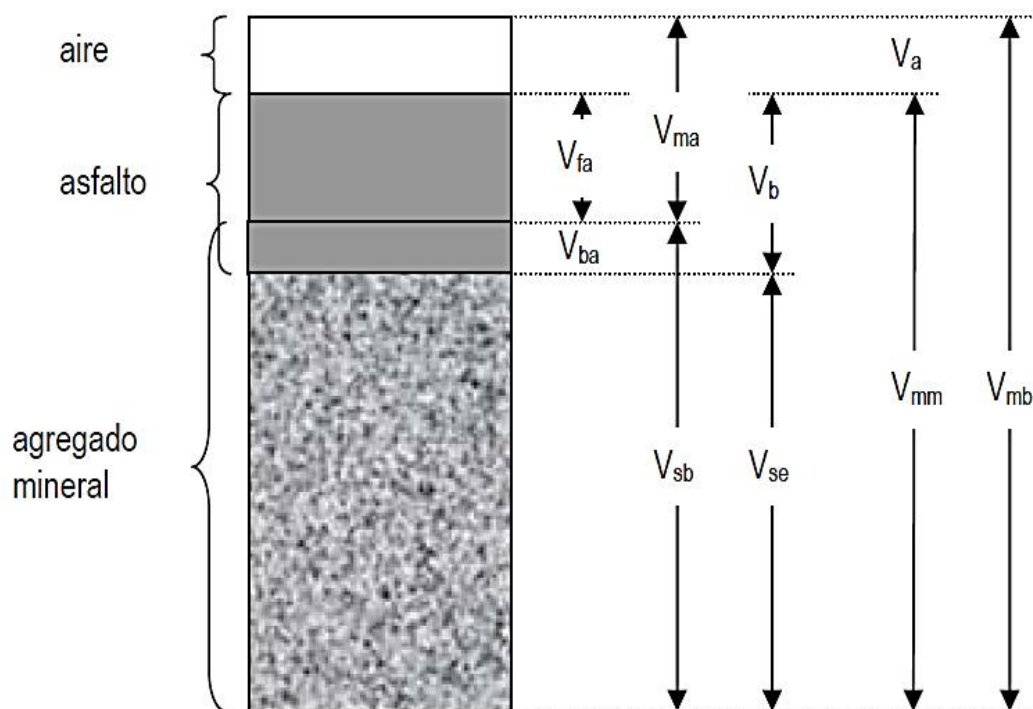
Los vacíos en el agregado mineral (VAM) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla. La figura 2.3 ilustra el concepto de VAM y la tabla 2.3 presenta los valores requeridos. (Instituto de Asfalto, 1982, p. 58)

2.4.4. Contenido de asfalto efectivo

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). (Instituto de Asfalto, 1982, p. 60)

Figura 2.3. Esquema de una mezcla asfáltica compactada



Fuente: Minaya & Huamán, 2006

V_{ma} = volumen de vacíos en agregado mineral

V_{mb} = volumen bulk de la mezcla compactada

V_{mm} = volumen de vacíos de la mezcla de pavimentación

V_{fa} = volumen de vacíos llenos con asfalto

V_a = volumen de vacíos de aire

V_b = volumen de asfalto

V_{ba} = volumen de asfalto absorbido

V_{sb} = volumen de agregado mineral bruto

V_{se} = volumen de agregado mineral específico

Tabla 2.3. Porcentaje mínimo de VAM

TAMAÑO MÁXIMO EN MM PORCENTAJE		V.A.M. MÍNIMO, POR CIENTO		
		Vacíos de diseño, por ciento³		
mm	pulg	3,0	4,0	5,0
1,18	No. 16	21,5	22,5	23,5
2,36	No. 8	19,0	20,0	21,0
4,75	No. 4	16,0	17,0	18,0
9,5	3/8	14,0	15,0	16,0
12,5	1/2	13,0	14,0	15,0
19,0	3/4	12,0	13,0	14,0
25,0	1,0	11,0	12,0	13,0
37,5	1,5	10,0	11,0	12,0
50,0	2,0	9,5	10,5	11,5
63,0	2,5	9,0	10,0	11,0

¹Especificación Normal para Tamaño de Tamices usados en pruebas AASHTO M 92 (ASTM E11).

²El tamaño máximo nominal de la partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% del material.

³Interpolar el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentre entre los que están listados.

2.5. Tratamiento estadístico

Entendemos por Estadística “la disciplina científica que trata de la recolección, análisis, y presentación de datos”, la Estadística se divide en Estadística Descriptiva (Tabulación) y Estadística Inferencial (Análisis o contraste de hipótesis).

2.5.1. Estadística descriptiva

“Se denomina estadística descriptiva, al conjunto de métodos estadísticos que se relacionan con el resumen y descripción de los datos, como tablas, gráficos y el análisis mediante algunos cálculos”. (Córdova, 2003, p. 1)

Tabla 2.4. Estadísticos descriptivos y gráficos

Grupo	Estadístico
Tendencia Central	Moda (M_o)
	Mediana (M_e)
	Media ($\bar{X}$)
Dispersión	Rango o amplitud (A)
	Varianza (S^2)
	Desviación típica (S)
	Coeficiente de variación (CV)
Forma	Asimetría (g_1)
	Apuntalamiento (g_2)
Otros	Tabla de frecuencias
	Percentiles
	Momentos
Gráficos	Diagrama de barras
	Histograma
	Polígono de frecuencias

Fuente: Carlos de la Puente, 2009

La decisión de qué estadístico aplicar a cada variable, está en función del nivel de medida de la misma. A las variables cualitativas o categóricas, sólo se le puede aplicar la tabla de frecuencias y el diagrama de barras, siendo posible, aunque no imprescindible la moda para las nominales y la mediana para las ordinales. (De la Puente, 2009, p. 45)

Todos los demás estadísticos, el histograma y el polígono de frecuencias se pueden aplicar a las variables cuantitativas o numéricas. La moda, mediana, tabla de frecuencias y el diagrama de barras es estadísticamente apropiado aplicarlos, aunque a veces no es conveniente por la cantidad de valores distintos que tienen los datos de las variables, no resumen lo suficiente, y es una de las finalidades de la estadística. (De la Puente, 2009, p. 46)

2.5.2. Estadística inferencial

Se denomina estadística inferencial al conjunto de métodos con los que se hacen la generalización o la inferencia sobre una población utilizando una muestra. La inferencia puede contener conclusiones que pueden no ser ciertos en forma absoluta, por lo que es

necesario que éstas sean dadas con una medida de confiabilidad que es la probabilidad. Relación entre población y la muestra. (Córdova, 2003, p. 2)

La población y la muestra están representadas por valores. En la primera se denominan parámetros y en la segunda estadísticos.

Tabla 2.5. Valores de la población y de la muestra

	Muestra	Población
	Estadísticos	Parámetros
Números de casos	n	N
Media	$\bar{X}$	μ
Varianza	S^2	σ^2
Desviación típica	S	σ
Porcentaje o proporción	p	P

Fuente: Carlos de la Puente, 2009

Entre la población y la muestra existe una relación cualitativa y otra cuantitativa. La primera significa que la muestra debe ser heterogénea como la población, esto es, debe tener las mismas características que la población. (De la Puente, 2009, p. 48)

2.5.2.1. Tipos de pruebas: paramétricas y no paramétricas

Según el comportamiento de los datos observados, estos pueden definir el tipo de prueba a utilizar, siempre y cuando se cumplan algunas condiciones que se detallan a continuación:

Tabla 2.6. Tipo de pruebas

Pruebas paramétricas	Pruebas no paramétricas
Variables cuantitativas, de intervalo o razón.	Variables cuantitativas, nominales u ordinales.
Distribución normal.	Distribución libre, no necesariamente normal.
Muestras grandes ($n > 30$).	Muestras pequeñas ($n < 30$).

Fuente: Yurquina, 2024

2.5.2.2. Método de los intervalos de confianza

El intervalo de confianza es un método de estimación de parámetros bastante usado en el campo de estadística inferencial. Se trata de encontrar un par de números que formaran un intervalo donde estará inserto el parámetro buscado, considerando un estimador que puede ser la media o la desviación estándar. (Banco Finandina, 2019)

Los componentes de un intervalo de confianza se describen a continuación:

- El tamaño de la muestra (n)
- El nivel de confianza (NC)
- El margen de error (α) de la estimación
- Estimación de la muestra; media, varianza, diferencia de las medias.

$$\text{Intervalo de confianza} = \text{media} \pm \text{margen de error}$$

2.5.2.3. La hipótesis y su formulación de hipótesis

Las hipótesis de investigación son formuladas como resultado de la ocurrencia de eventos que hacen pensar que éstos tienen influencia sobre alguna variable de interés que se ha estudiado ya sea a corto o incluso a largo plazo.

La prueba de hipótesis formula dos hipótesis estadísticas que deben anunciarse explícitamente: hipótesis nula y alternativa:

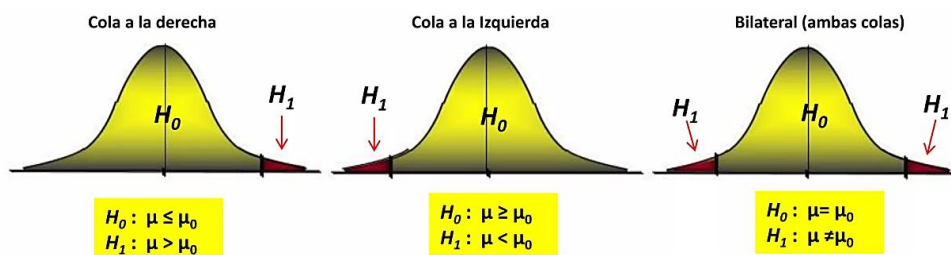
La hipótesis nula, se designa por el símbolo H_0 . Esta hipótesis se conoce también como la hipótesis de no diferencia, ya que es una proposición de conformidad con características que se suponen ciertas en la población de interés. Esta hipótesis siempre se opone a la hipótesis del investigador. (Yurquina, 2024, p.111)

La hipótesis alternativa, identificada mediante el símbolo H_1 , es una proposición que se creará cierta si los datos de la muestra siguieren que llevan al rechazo de la H_0 es falsa. Por lo general, la H_1 y la hipótesis de investigación son la misma y, de hecho; se utilizan los dos términos indistintamente. (Yurquina, 2024, p.110)

2.5.2.4. Distribución normal ($n \geq 30$)

- Planteamiento de hipótesis

Figura 2.4. Alternativas de hipótesis para medias

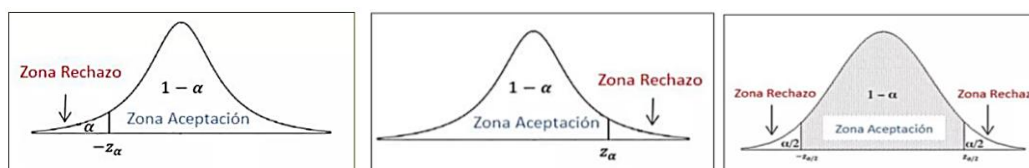


Fuente: Solis, 2017

- Selección del nivel de significancia (α)

El nivel de significancia α , designa el área bajo la curva de la distribución de la prueba que está por encima de los valores, sobre el eje horizontal; que constituyen la región de rechazo. Y un valor calculado para la estadística de prueba que cae dentro de la región de rechazo se dice que es significativo. (Yurquina, 2024, p.112)

Figura 2.5. Nivel de significancia



Fuente: Solis, 2017

- Se identifica el estadístico de prueba

El cálculo del estadístico (Z) con una sola muestra: $Z_c = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$

Donde: $\bar{X}$ = media de la muestra μ = media poblacional

σ = desviación estándar n = tamaño de los datos observados

- La condición final: se hace con la comparación $\longrightarrow$ Si $Z_c > Z$

$Z \longrightarrow$ extraída de tablas de variable estandarizada

❖ **Marco Normativo****2.6. Caracterización de los componentes de la mezcla asfáltica****2.6.1. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico****Tabla 2.7. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico**

Ensayos de laboratorio para el cemento asfáltico	Norma	Propósito
Viscosidad Saybolt Furol	AASHTO 201 ASTM E 102	En el diseño de mezcla asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el asfalto, ya que la trabajabilidad de mezclas asfálticas se ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los cementos asfálticos a viscosidad 130°C mide la consistencia de los cementos asfálticos.
Penetración	AASHTO T 49 ASTM D 5	Clasifica los asfaltos en grados según la dureza o consistencia medida en décimas de milímetros. Valores altos de penetración, indica consistencia suaves.
Punto de inflamación	AASHTO T 79 ASTM D 1310	Tiene un propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide el ensayo en copa abierta de Cleveland.
Punto de ablandamiento	AASHTO T 53 ASTM D 36	La temperatura determinada como ablandamiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzará un determinado estado de fluidez. Extendiéndose consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de ablandamiento es una pérdida de resistencia de deformación del cemento asfáltico y también una prueba de viscosidad.
Peso específico	AASHTO T 229 ASTM T 71	El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra, pero existe dos razones por las cuales se debe conocer su valor, son: • Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura - volumen. • Es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado. Se determina normalmente por el método del picnómetro.
Ductilidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	Provee de una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como capacidad que tienen el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura a 25 °C.

Fuente: Instituto de asfalto, 1982

Tabla 2.8. Requisitos para 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, 100 gr, 5 seg.	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Ensayo de Cleveland (°C)	232	-	232	-	232	-	218	-	177	-
Ensayo de Cleveland (°F)	450	-	450	-	450	-	425	-	350	-
Ductilidad 25 °C 5cm/mm, cm	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-
Solubilidad en tricloro etileno, (%)	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
Perdida por calentamiento, (%) a 163 °C en 5 hrs.	-	0,8	-	0,8	-	1,0	-	1,3	-	1,5
Penetración del residuo a 25°C 5cm/min, cm	58	-	54	-	50	-	46	-	40	-
Ductilidad de residuo a 25°C 5cm/min, cm	-	-	50	-	100	-	100	-	100	-

Fuente: Escobar & Alvarenga, 2011

2.6.2. Ensayos de caracterización de los agregados pétreos

Tabla 2.9. Ensayos de caracterización de agregados

Ensayos de laboratorio para agregados	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La deformación de la composición de un material pétreo que se pretenda emplear en la elaboración de la mezcla asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano la clase de textura que tendrá la mezcla.
Desgaste de los Ángeles	AASHTO T 96 ASTM C 131	El objetivo es determinar la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea para el grado de alteración del agregado o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta caracterización es esencial cuando el agregado va estar sujeto a desgaste por abrasión como el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comporta el agregado, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperie que poseen los agregados.
Equivalente de Arena	AASHTO T 176 ASTM D 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido de separar las partículas más finas (arcillosas de los granos más gruesos o de arena).
Gravedad específica y absorción del agregado grueso y fino	AASHTO T 84 ASTM C 127 AASHTO T 85 ASTM C 128	La gravedad específica o aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyentes, no se incluye aquí los espacios, vacíos que contienen las partículas los cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usada para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituye el material comparando con la condición seca se evalúa el comportamiento del agregado en el agua durante el periodo largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.
Peso unitario	AASHTO T 19 ASTM C 29 M	En la practica el valor de peso unitario es muy utilizado a realizar conversiones de volúmenes a pesos de agregado a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de la mezcla de agregados para mezclas de superficie en pavimentos pueden realizarse utilizando el método de peso unitario, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del próctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.

Fuente: Instituto de Asfalto, 1982

Tabla 2.10. Requisitos de caracterización de agregados

Características	Valor
Densidad relativa	mín. 2,25
Desgaste de los Ángeles, (%)	< 35
Equivalente de arena, (%)	> 50

Fuente: Instituto de Asfalto, 1982

2.7. Diseño De Mezclas Asfálticas en caliente Método Marshall

2.7.1.Consideraciones generales

Las mezclas asfálticas están formadas por un material pétreo bien graduado y cemento asfáltico como ligante. Se elaboran en una planta que calienta el material pétreo a una temperatura de 140 ó 150 °C y el cemento asfáltico a una temperatura de 110 a 130 °C.

Después que el material pétreo esté caliente y seco se mezclan sus componentes de acuerdo a una composición granulométrica aprobada, incorporándole a continuación el cemento asfáltico en una cantidad previamente definida.

Las mezclas terminadas se extienden en capas uniformes en el espesor y ancho requeridos, para luego ser compactadas a temperaturas superiores a los 90 °C.

Un pavimento de concreto asfáltico debe cumplir los siguientes objetivos principales:

- a. Suficiente estabilidad en la mezcla como para satisfacer las exigencias del servicio y las demandas del tránsito sin distorsiones o desplazamientos.
- b. Suficiente asfalto para asegurar la obtención de un pavimento durable, que resulte del recubrimiento completo de las partículas de agregado pétreo, impermeabilizando y ligando las mismas entre sí, bajo una compactación adecuada.
- c. Suficiente trabajabilidad como para permitir una eficiente operación constructiva en la elaboración de la mezcla y su compactación.
- d. Suficientes vacíos en la mezcla compactada, para proveer una reserva que impida, al producirse una pequeña compactación adicional, afloramientos de asfalto y pérdidas de estabilidad (UMSS, 2019, p. 255).

2.8. Método de diseño Marshall

2.8.1.Metodología

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. (Garnica, 2004, p.3)

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½”) 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. (Garnica, 2004, p.3)

2.8.2. 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 2.11). 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 (Garnica, 2004, p 14).

Tabla 2.11. Criterio de diseño de mezclas Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
Criterio de mezcla	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad, (N) (lb)	3336	-	5338	-	8006	-
	750	-	1200	-	1800	-
Flujo, (0,25 mm) (0,01 pulg)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje vacíos de agregado mineral	Tabla 2.3					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Garnica, 2004

2.9. Parámetros volumétricos

Para evaluar el comportamiento y desempeño de una MAC preparada en laboratorio y cuando sea puesta en servicio, es necesario definir algunas características principales dentro de sus propiedades volumétricas que se determinan usando medidas de masa y/o volumen de la mezcla y/o sus componentes individuales, tanto del asfalto como del agregado. (Garnica, 2004, p. 17)

2.9.1. Gravedad específica neta del agregado

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino, y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica neta para el agregado total se calcula usando:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

G_{sb} = gravedad específica neta para el agregado total

P_1, P_2, P_n = porcentajes individuales por masa de agregado

G_1, G_2, G_n = gravedad específica neta individual del agregado

“La gravedad específica neta del filler es difícil de determinar correctamente. De cualquier modo, si la gravedad específica aparente del filler es estimada, el error es usualmente insignificante” (Garnica, 2004, p. 21).

2.9.2. Gravedad específica efectiva del agregado

“Cuando se basa en la gravedad específica máxima de una mezcla de pavimento, G_{mm} , la gravedad específica efectiva del agregado, G_{se} , incluye todos los espacios de vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto” (Garnica, 2004, p. 20).

G_{se} se determina usando:

$$G_{se} = \frac{\frac{P_{mm} - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}{\frac{P_{mm} - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado

G_{mm} = gravedad específica máxima (ASTM D 2041/AASHTO T 209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire)

P_{mm} = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100

P_b = contenido de asfalto con el cual ASTM D 2041/AASHTO T 209 desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla

G_b = gravedad específica del asfalto

2.9.3. Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

La gravedad específica máxima puede determinarse para cada contenido de asfalto mediante ASTM D 2041/ASSHTO T 209.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire)

P_{mm} = porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100

P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla

P_b = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado

G_b = gravedad específica del asfalto

2.9.4. Absorción del asfalto

La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado, más que como un porcentaje del total de la masa de la mezcla (Garnica, 2004, p. 22)

La absorción del asfalto, P_{ba} , se determina mediante:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b$$

Donde:

P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado

G_{sb} = gravedad específica neta del agregado

G_b = gravedad específica del asfalto

2.9.5. Contenido de asfalto efectivo

El contenido de asfalto efectivo, P_{be} , de una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto, menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y es el contenido de asfalto que gobierna el desempeño de una mezcla asfáltica. (Garnica, 2004, p. 22)

$$P_{be} = P_b - (P_{ba} \times \frac{P_s}{100})$$

Donde:

P_{be} = contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla

P_b = contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla

P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

P_s = contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla

2.9.6. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM)

La composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

VMA = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)

G_{sb} = gravedad específica neta del total de agregado

G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 o D 2726/AASHTO T 166)

P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

2.9.7. Porcentaje de vacíos de aire (V_a)

“Los vacíos de aire, V_a , en la mezcla asfáltica compactada consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado” (Garnica, 2004, p. 23). El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse usando:

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

V_a = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

2.9.8. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA)

“El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, VFA, no incluyendo el asfalto absorbido” (Garnica, 2004, p. 24), se determina usando:

$$VFA = 100 \times \frac{VAM - V_a}{VAM}$$

Donde:

VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM

VAM = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

V_a = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

2.10. Pruebas a las mezclas asfálticas

Para analizar la influencia del método de compactación, se utilizarán diferentes tipos de pruebas en la mezcla asfáltica, las cuales estarán divididas en dos fases:

2.10.1. Pruebas volumétricas

Un factor que debe tenerse en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica es el de las proporciones volumétricas de los componentes, el ligante asfáltico y el agregado. A continuación se menciona las pruebas que más influyen en los resultados de la volumetría y los parámetros a evaluar en este estudio. (Garnica, 2004, p. 40)

- Gravedad específica del agregado grueso
- Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada
- Gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica

2.10.2. Pruebas mecánicas

Prueba de estabilidad y flujo Marshall: Esta prueba se realiza con el propósito de conocer los valores de cohesión (estabilidad) y fricción (flujo) de la mezcla asfáltica, mediante la aplicación de una carga a deformación controlada de 50.8 mm/min. Esta prueba es solamente para probetas fabricadas con el martillo Marshall y consiste en sumergir la probeta en baño maría a una temperatura de 60 °C de 30 a 40 min, para después ensayarla en la máquina Marshall, los valores obtenidos se utilizan para la determinar el contenido óptimo de asfalto. (Garnica, 2004, p. 43)

❖ Marco referencial

2.11. Otros estudios relacionados con la presente investigación

En la actualidad existen una variedad de investigaciones internacionales que tienen relación al tema de la presente investigación, y con el objetivo de ampliar los conocimientos a continuación se presenta variedad de información utilizada en la investigación.

De las publicaciones N°246 y N°247 del Instituto Mexicano del Transporte, se puede conocer desde la parte conceptual de una mezcla asfáltica, sus propiedades geomecánicas las cuales son consideradas en el diseño de una mezcla asfáltica; como ser la estabilidad, durabilidad, flexibilidad y otros, los cuales son fallas en la carpeta asfáltica provocada por diversas situaciones, también presenta las características y comportamiento general de la mezcla asfáltica, con esto se conoce la variedad de problemas existentes en la línea de investigación.

En la investigación realizada por Adauto Rosario de Lima-Perú, que realizó un estudio en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica con adición de ceniza de caña de maíz, realizando un diseño asfáltico con adiciones desde 0,2 % a 4% de forma gradual, el cual tiene como resultados mejoras en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica a partir de 1% de ceniza, llegando a afirmar que la ceniza de caña de maíz posee propiedades puzolánicas. Debido a esta investigación se puede afirmar que las cenizas orgánicas poseen varias propiedades favorables para una mezcla asfáltica.

Considerando la investigación por Mamani y Yataco titulada, Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de madera de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de Ayacucho-Perú; se puede verificar que la ceniza de fondo de hornos ladrilleros son aptos para un mejor comportamiento mecánico en la estabilización de suelos arcillosos; con este proyecto se llegó a evidenciar como parámetros sus propiedades físicas de la ceniza orgánica como ser: la densidad, peso específico el tamaño de partícula y otros.

Así mismo en una investigación realizada en Huancayo-Perú por Matos Neyra de la influencia de la adición de ceniza orgánica como filler en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente, elaborando las briquetas correspondientes con adición de ceniza y su análisis de mejoras sobre las propiedades mecánicas de la mezcla se llegó a tener como resultados, que con 2% de adición de ceniza mejoran la estabilidad.

Del manual de ensayos de suelos y asfaltos ABC, se extrajo la parte correspondiente a los ensayos de caracterización de agregados que componen la mezcla asfáltica y los ensayos propios del asfalto; todos ellos regidos bajo normas AASHTO y ASTM.

En el manual completo de diseño de pavimentos de la Universidad Mayor San Simón de Cochabamba, se determina de manera precisa la parte metodológica Marshall y toda la parte práctica e instrumentación del ensayo.

2.12. Análisis del aporte teórico

En los proyectos de construcción vial, el material más utilizado es el pavimento asfáltico, el cual comprende una estructura de varias capas. La carpeta de rodadura de mezcla asfáltica es la que debe cumplir las mayores exigencias de las capas del pavimento asfáltico para su óptimo servicio. A las mezclas asfálticas se les realiza un control debido a varios aspectos siendo la más importante es su resistencia y adhesividad (estabilidad Marshall) y sin dejar de mencionar que las propiedades volumétricas son también una parte fundamental del cuerpo de la mezcla asfáltica. Para obtener mejores resultados, se utiliza comúnmente la mezcla asfáltica densa en caliente; por ello, se realizan diferentes análisis para conocer su comportamiento, como la densidad, los vacíos de aire, los vacíos de agregado mineral y el contenido de asfalto efectivo.

En la composición de la mezcla asfáltica están los agregados pétreos, cemento asfáltico y aditivo ceniza orgánica. En laboratorio, se realiza la caracterización de cada elemento para cumplir con las especificaciones ASTM-AASHTO y por la factibilidad de la investigación, se aplica la Metodología Marshall, la cual se da a conocer sus consideraciones generales y especificaciones a cumplir. A este tipo de mezclas asfálticas elaboradas por compactación con 75 golpes por cara, se realizan pruebas volumétricas y mecánicas de las briquetas realizadas.

Para analizar los vacíos de agregado mineral (VAM) de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, estos se calculan en términos de gravedad específica y porcentaje de materiales componentes.

Como se observa, el estado del conocimiento se centra en el diseño de mezclas asfálticas, modificando con la adición de ceniza orgánica como filler en la composición de la mezcla asfáltica densa en caliente, también así delimitando las normas a seguir por la metodología que se aplica AASHTO - ASTM; y su debido proceso de tratamiento estadístico de resultados la cual se determina que, para un trabajo de investigación se realiza al 95% de probabilidad que tenga validez externa.

CAPÍTULO III

**DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO
DE LA INFORMACIÓN**

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Selección de los componentes de la mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica se compone de agregados pétreos triturados, cemento asfáltico y ceniza orgánica subproducto de ladrillera artesanal como filler, la selección se realizó de la siguiente manera:

3.1.1. Selección de agregados pétreos

En la presente investigación los agregados pétreos fueron proporcionados por la Posta Municipal de Tarija, la cual proviene de la planta chancadora Garzón, ubicada en las siguientes coordenadas geográficas:

Latitud: 21°28'14.70" S.

Longitud: 64°45'2.37" O.

Los materiales triturados adquiridos son de tamaño: grava (3/4"), gravilla (3/8") y arena (3/16") y pasa tamiz N°200 (filler natural convencional polvo de roca).

Figura 3.1. Ubicación de la Posta Municipal de Tarija



Fuente: Google Earth

3.1.2. Selección del cemento asfáltico

El cemento asfáltico fue obtenido de la planta asfáltica ubicada en la Posta Municipal de Tarija. El cemento asfáltico convencional 85/100 es de procedencia Ventanilla, Refinería La Pampilla REPSOL S.A., Perú; con las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del cemento asfáltico

PROPIEDADES	MÉTODO	RESULTADO
	ASTM/OTROS	
PENETRACIÓN		
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	D5 / AASHTO T 49	90
DUCTILIDAD		
Ductilidad a 25°C, 5cm/min, cm	D 113 / AASHTO T 51	>150
VOLATILIDAD		
Gravedad Específica a 15,6 °C/15,6°C	D 70 / AASHTO T 228	1,0112
Punto de Inflamación, °C	D 92 / AASHTO T 48	312
FLUIDEZ		
Punto de Ablandamiento, °C	D 36	46
Viscosidad cinemática a 100°C, cSt	D 445	2618
Viscosidad cinemática a 135°C, cSt	D 2170 / AASHTO T 201	322
ENSAYOS DE PELÍCULA FINA		
Pérdida por calentamiento, % m	D 1754 / AASHTO T 179	0,14
Penetración requerida, 100g. 5s, 1/10 mm,% de original	D 5 /AASHTO T 49	55,8
Ductilidad del residuo a 25°C, 5cm/min,cm	D 113 / AASHTO T 51	>150
SOLUBILIDAD		
Solubilidad en tricloroetileno, % m	D 2042/AASHTO T 44	99,91

Fuente: Ficha técnica del Cemento Asfáltico, Laboratorio de Asfaltos, Posta Municipal de Tarija

3.1.3. Selección de ceniza orgánica como filler

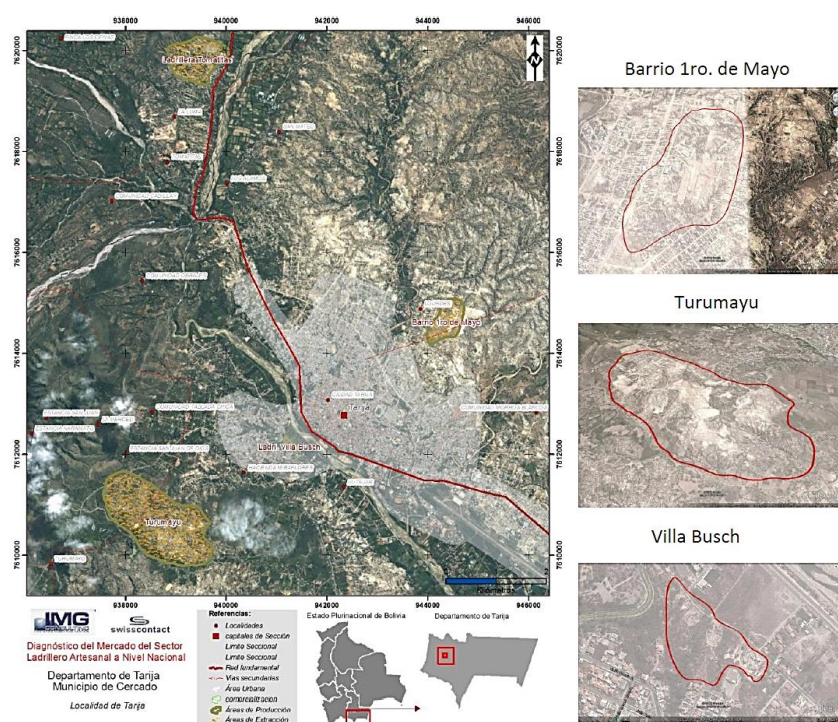
La ceniza orgánica subproducto de industria ladrillera es un material que presenta características puzolánicas.

En la presente investigación, la ceniza orgánica se obtuvo de las ladrilleras ubicadas en el Valle Central de Tarija específicamente de la zona de Villa Bush, ubicada en las siguientes coordenadas:

Latitud: 21°32'19,5" N

Longitud: 64°44'29,1" O

Figura 3.2. Ubicación de las zonas ladrilleras en el Municipio de Tarija



Fuente: Swisscontac, 2013

3.2. Criterios de diseño metodológico

3.2.1. Unidad de muestra, población y muestra

Unidad de muestra: Ensayos de laboratorio de mezclas asfálticas.

Población: Ensayos de laboratorio de mezclas asfálticas según su porcentaje de vacíos.

Todas las mezclas
asfálticas

- Cerradas o densas ($h < 6\%$)
- Semi cerradas ($6\% < h < 12\%$)
- Abiertas ($h > 12\%$)
- Porosas ($h > 20\%$)

Muestra: Ensayos de laboratorio de mezclas asfálticas, densas con adición de ceniza orgánica.

3.2.2. Tamaño confiable de muestra

Considerando una población infinita y la muestra, se asigna un nivel de confianza del 95% y por la metodología estratificada se puede determinar números lógicos para realizar un ajuste en el total de número de ensayos a ejecutar en la investigación.

Tabla 3.2. Nivel de confianza

Nivel de confianza %	Nivel de significancia Z
50	0,57
80	1,28
85	1,44
90	1,64
95	1,96
99	2,68

Muestra estratificada por fijación proporcional

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N}}$$

N_i = Población Inicial

n = Muestra

NC = Nivel de confianza 95%

Z = Nivel de significancia 1,96 (tabla 3.2)

e = Error 5% = 0.05

Se adopta una varianza de ($\sigma^2=0,15$) en función al tiempo que requiere la investigación en promedio de 6 meses.

Tabla 3.3. Estimación del número de ensayos para la investigación

Fase de la investigación	Nombre de los ensayos	Número estimado de ensayos (N_i)
Pruebas del cemento asfáltico	Penetración	12
	Punto de inflamación	12
	Peso específico	12
	Ductilidad	12
	Punto de ablandamiento	12
Caracterización del agregado triturado	Granulometría de agregado grueso	12
	Granulometría de agregado intermedio	12
	Granulometría de agregado fino	12
	Peso esp. y absorción de agregado grueso	12
	Peso esp. y absorción de agregado intermedio	12
	Peso esp. y absorción de agregado fino	12
	Desgaste de los Ángeles de agregado grueso	12
	Desgaste de los Ángeles de agregado grueso	12
	Peso unitario de agregado grueso	12
	Peso unitario de agregado intermedio	12
	Peso unitario de agregado fino	12
	Equivalente de arena	12
Caracterización de ceniza orgánica (reemplazo de filler)	Peso específico	12
	Granulometría	12
	Granulometría por Hidrómetro	12
Pruebas de pre diseño para determinar el (%) óptimo de CA y ceniza	Densidad, Estabilidad y flujo	370
Pruebas finales	Densidad, Estabilidad y flujo	121
TOTAL		731

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4. Planilla de ajuste de número de ensayos:

Estrato	Ensayos	N_i	σ²	N_iσ²	Fi	ni
1	Penetración	12	0,15	1,80	0,01642	3
2	Punto de inflamación	12	0,15	1,80	0,01642	3
3	Peso específico	12	0,15	1,80	0,01642	3
4	Ductilidad	12	0,15	1,80	0,01642	3
5	Punto de ablandamiento	12	0,15	1,80	0,01642	3
6	Granulometría de agregado grueso	12	0,15	1,80	0,01642	3
7	Granulometría de agregado intermedio	12	0,15	1,80	0,01642	3
8	Granulometría de agregado fino	12	0,15	1,80	0,01642	3
9	Peso esp. y absorción de agregado grueso	12	0,15	1,80	0,01642	3

Estrato	Ensayos	N _i	σ ²	N _i σ ²	Fi	ni
10	Peso esp. y absorción de agregado intermedio	12	0,15	1,80	0,01642	3
11	Peso esp. y absorción de agregado fino	12	0,15	1,80	0,01642	3
12	Desgaste de los Ángeles de agregado grueso	12	0,15	1,80	0,01642	3
13	Desgaste de los Ángeles de agregado grueso	12	0,15	1,80	0,01642	3
14	Peso unitario de agregado grueso	12	0,15	1,80	0,01642	3
15	Peso unitario de agregado intermedio	12	0,15	1,80	0,01642	3
16	Peso unitario de agregado fino	12	0,15	1,80	0,01642	3
17	Equivalente de arena	12	0,15	1,80	0,01642	3
18	Peso específico de ceniza orgánica	12	0,15	1,80	0,01642	3
19	Granulometría de la ceniza	12	0,15	1,80	0,01642	3
20	Granulometría por Hidrómetro de ceniza	12	0,15	1,80	0,01642	3
21	Densidad, estabilidad y flujo (pre diseño)	370	0,15	55,50	0,50616	90
22	Densidad, Estabilidad y flujo (final)	121	0,15	18,15	0,16553	30
		731		109,65		180

Fuente: Elaboración propia

Cálculo del número de ensayos a realizar:

$$n = \frac{109,65}{731\left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{109,65}{731}} = 175,26 \rightarrow n \cong 176 \text{ ensayos}$$

Observando en la tabla 3.4 se define que en la investigación se realizará 180 ensayos.

3.3. Caracterización de los componentes de la mezcla asfáltica

3.3.1. Caracterización de los agregados pétreos

Los ensayos de caracterización del material pétreo son realizados para la obtención de valores para un respectivo control de las características físico-mecánicas de la grava, gravilla y arena para una mezcla asfáltica densa.

Nota: El procedimiento de los ensayos realizados se detallará en los ANEXOS.

3.3.1.1. Análisis granulométrico de los agregados (AASHTO T 27 /ASTM C-136)

El análisis granulométrico, se refiere a la distribución en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido.

Mediante este método se obtiene el porcentaje de material que pasa cada tamiz de la serie de tamices estándar y graficar la curva granulométrica para determinar los tamaños de las partículas de los agregados gruesos y finos de un material seco.

Cálculos:

Muestra 1: Granulometría del agregado grueso

Peso retenido acumulado:

$$\text{Retenido acumulado} = \text{Retenido acumulado}_i + \text{Peso retenido}_{i-1}$$

$$\text{Retenido acumulado} = 1490,40 \text{ g}_{(3/4") + 0,00 \text{ g}_{(1")}$$

$$\text{Retenido acumulado} = 1490,40 \text{ g}$$

Porcentaje retenido:

$$\% \text{Retenido} = \frac{\text{Retenido acumulado}_i}{\text{Peso total seco}} * 100$$

$$\% \text{Retenido} = \frac{1490,40 \text{ g}}{10000 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{Retenido} = 14,90 \%$$

Porcentaje que pasa del total:

$$\% \text{Que pasa del total} = 100\% - \% \text{ Retenido}$$

$$\% \text{Que pasa del total} = 100\% - 14,90\%$$

$$\% \text{Que pasa del total} = 85,10 \%$$

Figura 3.3. Granulometría de agregado grueso



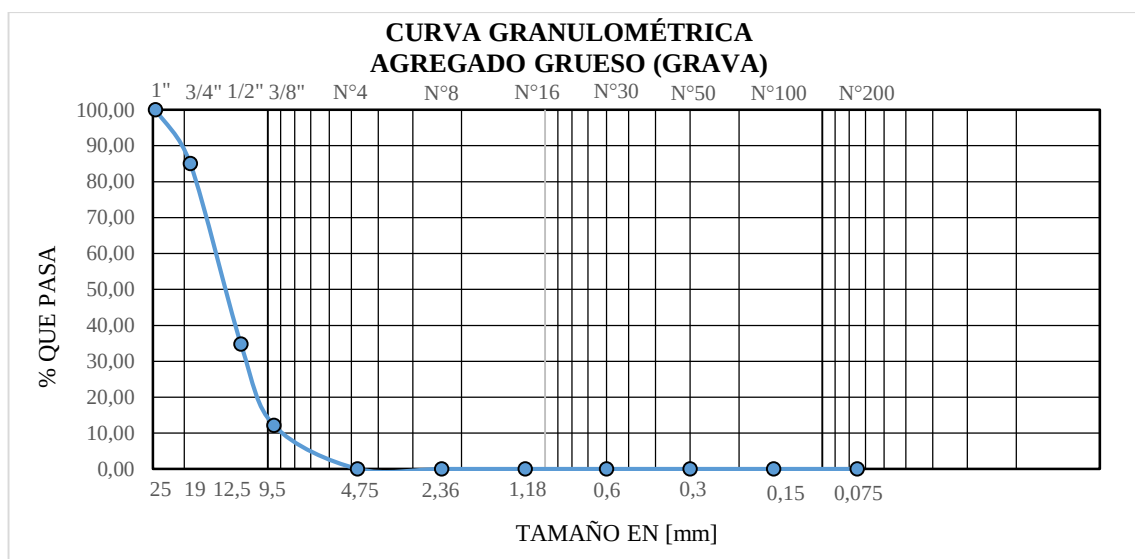
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5. Resultado de la granulometría promedio de la grava

Peso Total (g)			10000,00		
Tamices	Tamaño Mm	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que pasa del total
1"	25	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19	1490,40	1490,40	14,90	85,10
1/2"	12,5	5034,47	6524,87	65,25	34,75
3/8"	9,5	2261,47	8786,33	87,86	12,14
N°4	4,75	1206,67	9993,00	99,93	0,07
N°8	2,36	2,87	9995,87	99,96	0,04
N°16	1,18	0,00	9995,87	99,96	0,04
N°30	0,6	0,00	9995,87	99,96	0,04
N°50	0,3	0,00	9995,87	99,96	0,04
N°100	0,15	0,00	9995,87	99,96	0,04
N°200	0,075	0,00	9995,87	99,96	0,04
Base	-	4,13	10000,00	100,00	0,00
SUMA		10000,00			
PÉRDIDAS		0,00			
MF=		8,68			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1. Curva granulométrica del agregado grueso (Grava)



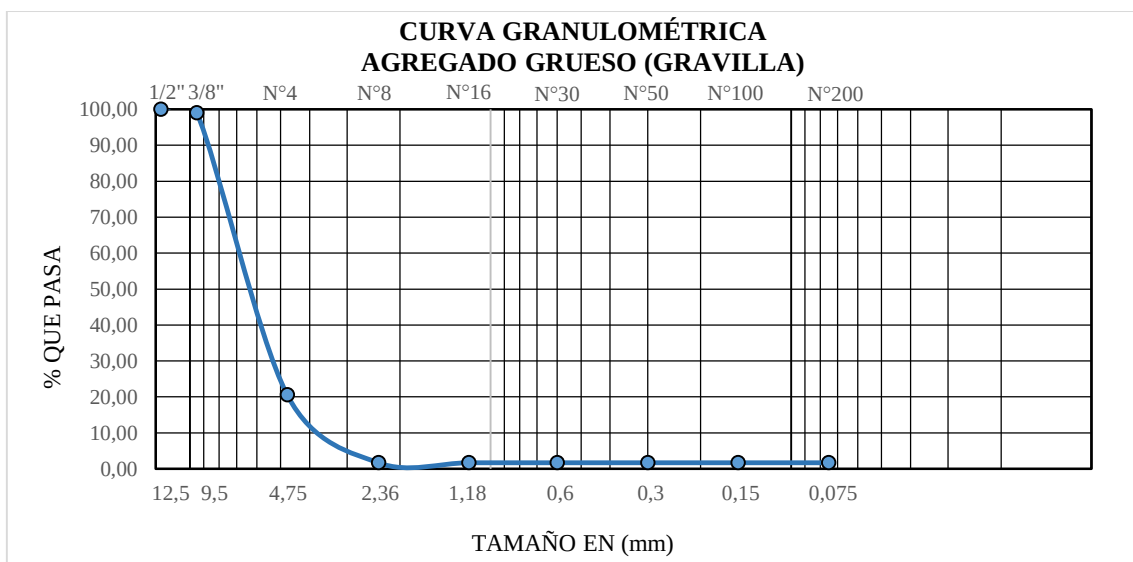
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6. Resultado de la granulometría promedio de la gravilla

Peso Total (g)			10000,00		
Tamices	Tamaño Mm	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que pasa del total
1"	25	0,0	0,0	0,0	100,00
3/4"	19	0,0	0,0	0,0	100,00
1/2"	12,5	0,0	0,0	0,0	100,00
3/8"	9,5	97,9	97,9	1,0	99,02
N°4	4,75	7846,9	7944,9	79,4	20,55
N°8	2,36	1887,1	9831,9	98,3	1,68
N°16	1,18	0,0	9831,9	98,3	1,68
N°30	0,6	0,0	9831,9	98,3	1,68
N°50	0,3	0,0	9831,9	98,3	1,68
N°100	0,15	0,0	9831,9	98,3	1,68
N°200	0,075	0,0	9831,9	98,3	1,68
Base	-	168,1	10000,0	100,0	0,00
SUMA		10000,0			
PÉRDIDAS		0,0			
MF=		6,70			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2. Curva granulométrica del agregado grueso (Gravilla)



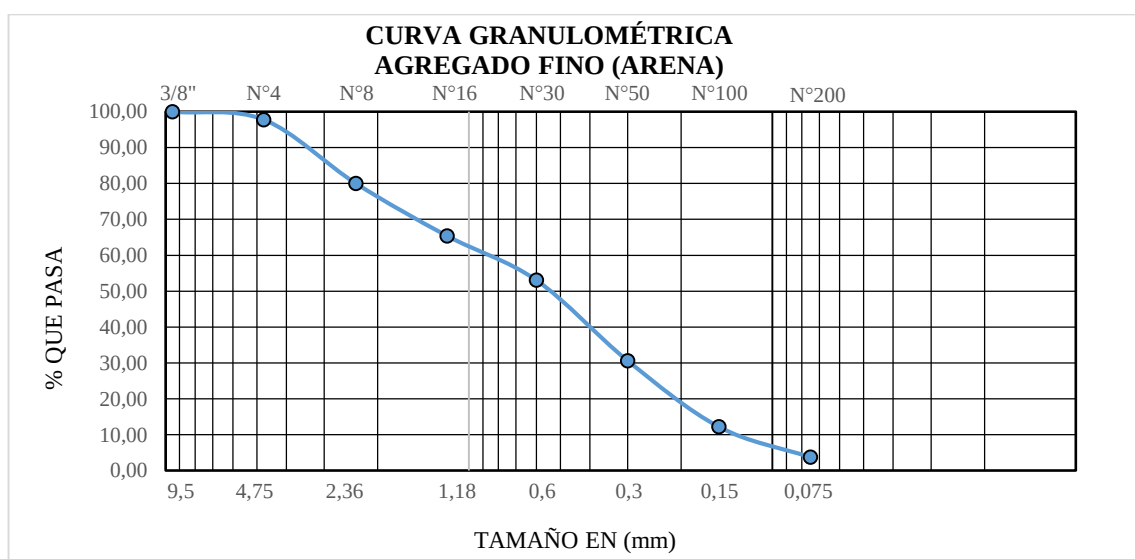
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7. Resultado de la granulometría promedio de la arena

Peso Total (g)			2000,00		
Tamices	Tamaño Mm	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que pasa del total
1"	25	0,0	0,00	0,0	100,00
3/4"	19	0,0	0,00	0,0	100,00
1/2"	12,5	0,0	0,00	0,0	100,00
3/8"	9,5	0,0	0,00	0,0	100,00
N°4	4,75	43,9	43,87	2,2	97,81
N°8	2,36	355,2	399,07	20,0	80,05
N°16	1,18	292,7	691,80	34,6	65,41
N°30	0,6	246,3	938,07	46,9	53,10
N°50	0,3	448,8	1386,87	69,3	30,66
N°100	0,15	368,6	1755,47	87,8	12,23
N°200	0,075	169,2	1924,67	96,2	3,77
Base	-	75,3	2000,00	100,0	0,00
SUMA		2000,0			
PÉRDIDAS		0,0			
MF=		3,57			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.3. Curva granulométrica del agregado fino (Arena)



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2. Peso específico y de absorción de agua en agregados gruesos (AASHTO T 85/ASTM C-127)

Este método tiene por objeto la determinación del peso específico a granel, aparente y la absorción de agua expresada en porcentaje, que presenta el agregado cuando se sumerge un periodo de 24 horas.

Procedimiento:

En agregados gruesos con tamaño igual o mayor a 4,75 mm (tamiz N°4), en éste caso es el mismo procedimiento para la grava y gravilla. Se comienza lavando el agregado para eliminar residuos de polvo y cualquier otra sustancia, posteriormente dejándolo secar en el horno a 110 ± 5 °C.

Una vez seca la muestra se sumerge en agua por un tiempo de 24 horas, para luego secar superficialmente con un paño y pesar la muestra saturada superficialmente seca.

Finalmente, la muestra se lleva a pesar en la balanza de sumersión en agua, a una temperatura de 25°C aproximadamente.

Figura 3.4 Sumersión y secado de grava y gravilla



Fuente: Elaboración propia

$$\text{P. E. a granel} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{P. E. saturado sup. seco} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{P. E. aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B - A}{A} * 100\%$$

Donde:

P.E. = Peso específico (g/cm³).

A = Masa del agregado seco (g).

B = Masa del agregado saturado superficialmente seco (g).

C = Masa de agregado sumergido (g).

(B – C) = Término que representa pérdida de peso de la muestra sumergido y significa por lo tanto el volumen de agua desplazado o el volumen de la muestra.

Cálculos

Muestra 1: peso específico de agregado grueso

Peso específico a granel del agregado seco:

$$\text{P. E. a granel} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{P. E. a granel} = \frac{2956,7}{3000 - 1855}$$

$$\text{P. E. a granel} = 2,58 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Peso específico saturado superficialmente seco:

$$\text{P. E. saturado sup. seco} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{P. E. saturado sup. seco} = \frac{3000}{3000 - 1855}$$

$$\text{P. E. saturado sup. seco} = 2,62 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Peso específico aparente:

$$\text{P. E. aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$P.E. \text{ aparente} = \frac{2956,7}{2956,7 - 1855}$$

$$P.E. \text{ aparente} = 2,68 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Porcentaje de absorción:

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B - A}{A} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{3000 - 2956,7}{2956,7} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorción} = 1,46 \%$$

Tabla 3.8. Peso específico y absorción del agregado grueso (Grava)

Muestra N°	Peso muestra seca "A" (g)	Peso muestra sat y sup seca "B" (g)	Peso muestra sumergida "C" (g)	Peso específico a granel (g/cm³)	Peso específico saturada sup. seca (g/cm³)	Peso específico aparente (g/cm³)	% de absorción
1	2956,7	3000	1855	2,58	2,62	2,68	1,46
2	2954,4	3000	1851	2,57	2,61	2,68	1,54
3	2954,1	3000	1846	2,56	2,60	2,67	1,55
PROMEDIO				2,57	2,61	2,68	1,52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9. Peso específico y absorción del agregado grueso (Gravilla)

Muestra N°	Peso muestra seca "A" (g)	Peso muestra sat y sup seca "B" (g)	Peso muestra sumergida "C" (g)	Peso específico a granel (g/cm³)	Peso específico saturada sup. seca (g/cm³)	Peso específico aparente (g/cm³)	% de absorción
1	2942,5	3000	1855	2,57	2,62	2,71	1,95
2	2939,3	3000	1855	2,57	2,62	2,71	2,07
3	2941,7	3000	1851	2,56	2,61	2,70	1,98
PROMEDIO				2,57	2,62	2,70	2,00

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3. Peso específico y de absorción de agua en agregados finos (AASHTO T 84/ASTM C-128)

Este método tiene por objetivo determinar el peso específico a granel, saturado superficialmente seco y el aparente, también el porcentaje de absorción en áridos finos una vez sumergido en agua por un tiempo de 24 horas.

Procedimiento:

Se comienza realizando la homogenización de la muestra eliminando el material retenido del tamiz N°4, se selecciona mínimamente 1000 g para saturar en agua por 24 horas.

Secar la muestra superficialmente con una secadora para colocar en un molde cónico donde se apisona con 25 golpes en capas, luego se enrasa y retira el molde para observar que debe desmoronarse uniformemente sus paredes.

Se toma la muestra de 500 g para llevarlo al matraz y llenarlo de agua hasta la marca de medición 500 ml, se elimina las burbujas de aire haciendo rodar el matraz con cuidado y luego se pesa.

Vaciar la muestra para llevarlo a secar al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, una vez seca se obtiene el peso seco.

Figura 3.5. Ensayo de peso específico y absorción de la arena



Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Muestra 1

Peso específico a granel seco:

$$P. E. a granel = \frac{A}{V - W}$$

$$P. E. a granel = \frac{490,80}{500,0 - 282,40}$$

$$P. E. a granel = 2,26 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Peso específico saturado superficialmente seco:

$$P. E. saturado sup. seco = \frac{\text{Peso de muestra}}{V - W}$$

$$P. E. saturado sup. seco = \frac{500,0}{500,0 - 282,40}$$

$$P. E. saturado sup. seco = 2,30 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Peso específico aparente:

$$P. E. aparente = \frac{A}{(V - W) - (P. muestra - A)}$$

$$P. E. aparente = \frac{490,80}{(500,0 - 282,40) - (500,0 - 490,80)}$$

$$P. E. aparente = 2,36 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Porcentaje de absorción:

$$\% \text{ de absorción} = \frac{\text{Peso de la muestra} - A}{\text{Peso de la muestra}} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{500,0 - 490,80}{500,0} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorción} = 1,87 \%$$

Donde:

A = Peso en aire de la muestra secada al horno (g).

V = Volumen del frasco (ml).

W = Peso del agua agregado al frasco (g).

Tabla 3.10. Datos las muestras del agregado fino

Muestra N°	Peso muestra sat. (g)	Peso de matraz (g)	Muestra+ matraz +agua (g)	Peso del agua agregado al matraz (g) "W"	Peso muestra secada (g) "A"	Volumen del matraz (ml) "V"
1	500,00	196,10	978,50	282,40	490,80	500,00
2	500,00	177,60	986,40	308,80	490,70	500,00
3	500,00	167,00	975,60	308,60	491,40	500,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11. Resultados del Peso específico y absorción del agregado fino (Arena)

Muestra N°	P.E. a granel (g/cm³)	P.E. saturado sup. seca (g/cm³)	P.E. aparente (g/cm³)	% de absorción
1	2,26	2,30	2,36	1,87
2	2,57	2,62	2,70	1,90
3	2,57	2,61	2,69	1,75
PROMEDIO	2,46	2,51	2,58	1,84

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4. Método para determinar el porcentaje de desgaste del agregado grueso por medio de la máquina de los ángeles (AASHTO T-96/ASTM C-131)

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la máquina de los ángeles consecuencia de la acción combinada de la abrasión, machaqueo e impacto.

Procedimiento:

La muestra de ensayo consistirá de agregado limpio que ha sido secado en un horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta peso constante y tendrá una de las gradaciones que indica la tabla N°3.12.

Pesar y registrar el total del agregado por ensayar como masa inicial de muestra (mi), aproximado a 0,01 g.

Colocar la muestra en el tambor de la máquina de los ángeles con el número de esferas y número de revoluciones correspondientes a la gradación.

Posteriormente pasar toda la muestra por el tamiz N°12 y lavar lo que se retiene para llevarlo al horno a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, para finalmente pesar el material seco como masa final (mf).

Figura 3.6. Ensayo de desgaste de los ángeles de agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12. Pesos de agregado y número de esferas según la gradación

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (g)			
Pasa	Retenido	1250±25	2500±10	2500±10	5000±10
1 1/2"	1"				
1"	3/4"				
3/4"	1/2"				
1/2"	3/8"				
3/8"	1/4"				
1/4"	N°4				
N°4	N°8				
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Número de esferas		12	11	8	6
N° de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación (min)		15	15	15	15

Fuente: Norma ASTM, C 131

Cálculos:

Muestra 1: Agregado grueso, gradación B

$$\text{Porcentaje de desgaste} = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100$$

$$\text{Porcentaje de desgaste} = \frac{5000,2 - 3889,8}{5000,2} * 100$$

$$\text{Porcentaje de desgaste} = 22,58 \%$$

Donde:

m_i = Masa inicial de la muestra (g).

m_f = Masa final de la muestra (g).

Tabla 3.13. Datos para el desgaste de los ángeles (Grava)

Datos de laboratorio				
Gradación "B"				
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido (1)	Peso retenido (2)	Peso retenido (3)
3/4"	1/2"	2500,2	2500,0	2500,1
1/2"	3/8"	2500,0	2500,2	2499,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14. Resultados de desgaste de los ángeles (Grava)

Muestra	Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Promedio (%)	Especificación ASTM
1	B	5000,2	3889,8	22,21	22,58	35% MÁX
2		5000,2	3889,5	22,21		
3		5000,0	3834,4	23,31		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15. Datos para el desgaste de los ángeles (Gravilla)

Datos de laboratorio				
Gradación "C"				
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido (1)	Peso retenido (2)	Peso retenido (3)
3/8"	1/4"	2500,1	2500,1	2500,0
1/4"	N°4	2500,0	2500,0	2500,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16. Resultados de desgaste de los ángeles (Gravilla)

Muestra	Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Promedio (%)	Especificación ASTM
1	C	5000,1	3786,9	24,26	24,76	35% MÁX
2		5000,1	3737,6	25,25		
3		5000,2	3752,2	24,96		

Fuente: Elaboración propia

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

Este ensayo tiene por objeto determinar la masa de un volumen unitario de agregado, teniendo en cuenta tanto las partículas individuales como los espacios vacíos entre ellas. Este parámetro es importante para el diseño de mezclas y para las conversiones de masa a volumen.

Procedimiento:

Para medir el peso unitario con agregado suelto, se llena el molde de dimensiones medibles mediante el procedimiento normalizado y se determina el peso del contenido en el molde cilíndrico.

Para medir el peso compactado, se llena el molde en tres capas apisonadas 25 veces cada capa; las partículas de la superficie se deben enrasar con la varilla teniendo como guía el borde del molde.

Figura 3.7. Ensayo de peso unitario de agregados

Fuente: Elaboración propia

Cálculo:

Muestra 1: Agregado grueso

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

$$\text{Peso unitario} = \frac{14005,0}{10107,03}$$

$$\text{Peso unitario} = 1,39 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Tabla 3.17. Resultados del ensayo de peso unitario suelto (Grava)

Muestra N°	Peso Recipiente (g)	Volumen Recipiente (cm³)	Peso recip. + muestra suelta (g)	Peso muestra suelta (g)	Peso Unitario suelto (g/cm³)
1	5720,00	10107,03	19725,00	14005,00	1,39
2	5720,00	10107,03	19650,00	13930,00	1,38
3	5720,00	10107,03	19615,00	13895,00	1,37
Promedio					1,38

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18. Resultados del ensayo de peso unitario compactado (Grava)

Muestra N°	Peso Recipiente (g)	Volumen Recipiente (cm³)	Peso recip. + muestra suelta (g)	Peso muestra compacta (g)	Peso Unitario suelto (g/cm³)
1	5720,00	10107,03	20715,00	14995,00	1,48
2	5720,00	10107,03	20910,00	15190,00	1,50
3	5720,00	10107,03	20870,00	15150,00	1,50
Promedio					1,50

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19. Resultados del ensayo de peso unitario suelto (Gravilla)

Muestra N°	Peso Recipiente (g)	Volumen Recipiente (cm³)	Peso recip. + muestra suelta (g)	Peso muestra suelta (g)	Peso Unitario suelto (g/cm³)
1	5720,00	10107,03	19585,00	13865,00	1,37
2	5720,00	10107,03	19380,00	13660,00	1,35
3	5720,00	10107,03	19385,00	13665,00	1,35
Promedio					1,36

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20. Resultados del ensayo de peso unitario compactado (Gravilla)

Muestra N°	Peso Recipiente (g)	Volumen Recipiente (cm³)	Peso recip. + muestra suelta (g)	Peso muestra compacta (g)	Peso Unitario suelto (g/cm³)
1	5720,00	10107,03	20705,00	14985,00	1,48
2	5720,00	10107,03	20610,00	14890,00	1,47
3	5720,00	10107,03	20540,00	14820,00	1,47
Promedio					1,47

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21. Resultados del ensayo de peso unitario suelto (Arena)

Muestra N°	Peso Recipiente (g)	Volumen Recipiente (cm³)	Peso recip. + muestra suelta (g)	Peso muestra suelta (g)	Peso Unitario suelto (g/cm³)
1	2600,00	3033,59	7325,00	4725,00	1,56
2	2600,00	3033,59	7340,00	4740,00	1,56
3	2600,00	3033,59	7370,00	4770,00	1,57
Promedio					1,56

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.22. Resultados del ensayo de peso unitario compactado (Arena)

Muestra N°	Peso Recipiente (g)	Volumen Recipiente (cm³)	Peso recip. + muestra suelta (g)	Peso muestra compacta (g)	Peso Unitario suelto (g/cm³)
1	2600,00	3033,59	7685,00	5085,00	1,68
2	2600,00	3033,59	7750,00	5150,00	1,70
3	2600,00	3033,59	7790,00	5190,00	1,71
Promedio					1,69

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.6. Ensayo de equivalente de arena (ASTM D-2419)

Este ensayo tiene como objetivo determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo o material arcilloso en los suelos o agregados finos.

Procedimiento:

Se toman dos porciones de muestra, cada una de aproximadamente 120 gramos, que pasan por el tamiz N°4. Estas muestras se colocan en probetas previamente llenas con solución defloculante (un agente que evita la aglomeración de partículas).

Se procede eliminar las burbujas formadas al verter el suelo, se dejan reposar las probetas durante 10 minutos. Luego, se agitan horizontalmente durante unos 90 ciclos en aproximadamente 30 segundos.

Se introduce más líquido defloculante por el fondo de la muestra utilizando una varilla acanalada para poner en suspensión las partículas más finas.

Después de un periodo de sedimentación de 20 minutos se procede a leer las alturas correspondientes.

Cálculo:

Muestra 1: agregado fino, arena.

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

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{11,1}{11,7} * 100\%$$

$$\text{Equivalente de arena} = 94,87 \%$$

Tabla 3.23. Resultados del ensayo equivalente de arena

N° de Muestra	H1 (cm)	H2 (cm)	Equivalente de Arena (%)
1	11,1	11,7	94,87
2	11,2	11,7	95,73
3	11,2	11,4	98,25
Promedio			96,28
Especificación			>50%

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8. Ensayo de equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Caracterización de la ceniza orgánica

3.3.2.1. Granulometría de ceniza orgánica (AASHTO T 27 /ASTM C-136)

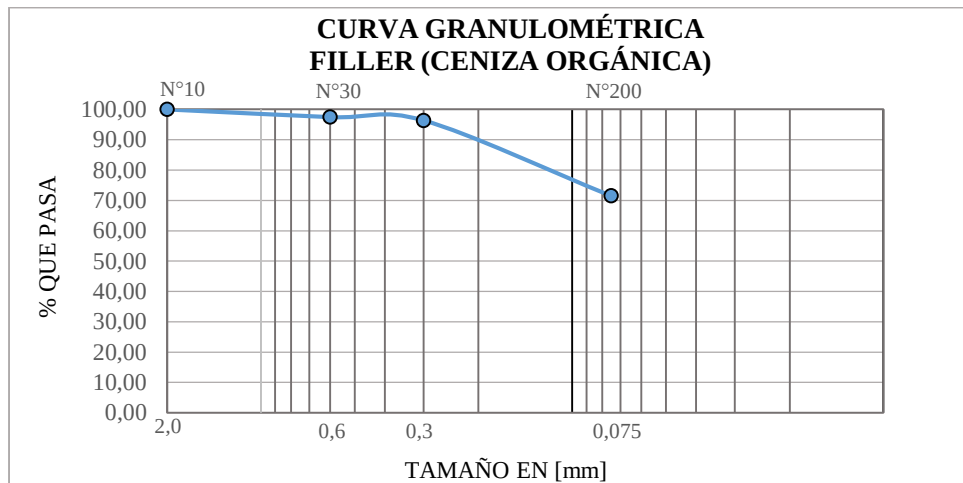
El objetivo del ensayo de granulometría en el agregado fino es determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de partículas en un material mediante el tamizado.

Se toma una muestra seca de agregado de masa conocida y se separa a través de una serie de tamices con aberturas progresivamente más pequeñas. Esto permite determinar la distribución de tamaños de las partículas.

Tabla 3.24. Granulometría promedio de ceniza orgánica

Peso Total (g)			500,00		
Tamices	Tamaño mm	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que pasa del total
N°30	0,6	12,7	12,67	2,5	97,47
N°50	0,3	5,5	18,19	3,6	96,36
N°200	0,075	124,2	142,43	28,5	71,51
Base	-	357,6	499,99	100,0	0,00
SUMA		500,0			
PÉRDIDAS		0,0			
MF=		0,35			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.4. Curva granulométrica de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.9 Granulometría de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2. Ensayo de peso específico de la ceniza orgánica (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.

Figura 3.10. Ensayo calibración de frasco y peso específico de ceniza



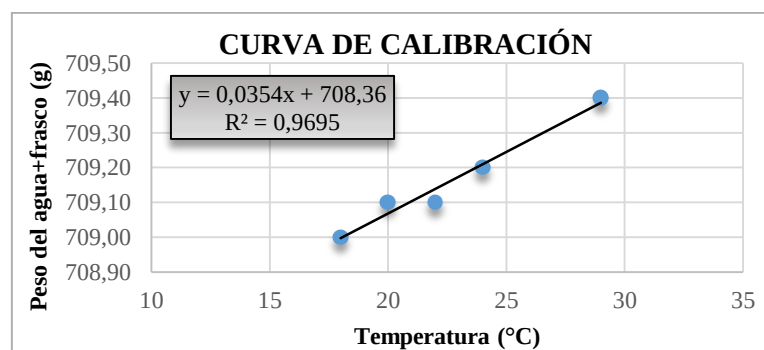
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.25. Datos de la calibración de frasco volumétrico

Número de ensayo	W _{fw} (g)	T (°C)
1	709,40	29
2	709,20	24
3	709,10	22
4	709,10	20
5	709,00	18

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.5. Curva de calibración del frasco volumétrico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.26. Datos de ensayo de peso específico de la ceniza orgánica

Número de ensayo	1	2	3	4	5	6	Promedio
Temperatura ensayada	28	26	24	22	18	16	
Peso de suelo húmedo + tara	793,2	793,2	793,2	793,2	793,2	793,2	
Peso del suelo seco + tara	281	281	281	281	281	281	
Peso de tara	196,2	196,2	196,2	196,2	196,2	196,2	
Peso del suelo seco (Ws)	84,8	84,8	84,8	84,8	84,8	84,8	
Peso del frasco + agua (Wfw)	709,35	709,28	709,21	709,14	709,00	708,93	
Peso del frasco + agua+suelo (Wfws)	764,6	764,6	764,4	764,2	764,3	764,3	
Peso específico	2,870	2,876	2,864	2,851	2,875	2,882	
Factor de corrección K	0,998	0,9986	0,9991	0,9996	1,0004	1,0009	
Peso específico corregido	2,864	2,872	2,861	2,850	2,876	2,884	2,868

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (ASTM D-422)

El ensayo granulométrico por hidrómetro es fundamental para estimar la distribución de tamaños de partículas pasantes por el tamiz N°200, 60 a 80 g.

Procedimiento:

Se toma una muestra de suelo y se dispersa en agua. Luego, se deja la solución en reposo para que las partículas sedimenten individualmente.

Se asume que las partículas son esféricas y que el proceso sigue la Ley de Stokes. Esta ley establece que la velocidad de sedimentación de una partícula en un fluido es directamente proporcional a su tamaño. Es decir, las partículas más grandes sedimentarán más rápidamente que las de menor tamaño.

Se utiliza un instrumento llamado hidrómetro para medir la concentración de la suspensión suelo-agua a cierta profundidad. A partir de las lecturas tomadas a diferentes tiempos, se estiman los diámetros de las partículas que se asentaron por debajo de esa profundidad.

Cálculo:

Muestra 1 de ceniza orgánica, Lectura 1.

Corrección de las lecturas del hidrómetro:

a) Corrección por menisco

$$\text{Lectura del hidrómetro en agua (Cm)} = 1,0$$

$$\text{Lectura corregida } R = R' + Cm$$

$$\text{Lectura corregida } R = 47,0 + 1,0$$

$$\text{Lectura de hidrómetro corregida } R = 48,0$$

b) Corrección por temperatura (Ct)

$$\text{Corrección por temperatura a } 23^{\circ}\text{C (Ct)} = 0,70$$

Tabla 3.27. Corrección por temperatura

Temperatura (C°)	CT	Temperatura (°C)	CT
15	-1,10	23	0,70
16	-0,90	24	1,00
17	-0,70	25	1,30
18	-0,50	26	1,65
19	-0,30	27	2,00
20	0,00	28	2,50
21	0,20	29	3,05
22	0,40	30	3,80

Fuente: Soto, 2017

c) Lectura corregida Rc

$$R_c = R + C_t$$

$$R_c = 48 + 0,70$$

$$R_c = 48,70$$

Cálculo del diámetro de las partículas (D):

$$D \text{ (mm)} = K\sqrt{\left(\frac{L}{t}\right)}$$

Donde:

L=Profundidad efectiva en cm (tabla 3.29)

t= Tiempo transcurrido en min.

Los valores de K están tabulados en la siguiente tabla 3.28

Tabla 3.28. Valores K para determinar “a” en función al peso específico y temperatura

Temp. (°C)	PESO UNITARIO DE LOS SÓLIDOS DEL SUELO (g/cm³)							
	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,8	2,85
16	0,0151	0,0148	0,0146	0,0144	0,0141	0,0139	0,0137	0,0136
17	0,0149	0,0146	0,0144	0,0142	0,0140	0,0138	0,0136	0,0134
18	0,0148	0,0144	0,0142	0,0140	0,0138	0,0136	0,0134	0,0132
19	0,0145	0,0143	0,0140	0,0139	0,0136	0,0134	0,0132	0,0131
20	0,0143	0,0141	0,0139	0,0137	0,0134	0,0133	0,0131	0,0129
21	0,0141	0,0139	0,0137	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127
22	0,0140	0,0137	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0128	0,0126
23	0,0138	0,0136	0,0134	0,0132	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124
24	0,0137	0,0134	0,0132	0,0130	0,0128	0,0126	0,0125	0,0123
25	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0122
26	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127	0,0125	0,0124	0,0122	0,0120
27	0,0132	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124	0,0122	0,0120	0,0119
28	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124	0,0123	0,0121	0,0119	0,0117
29	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0121	0,0120	0,0118	0,0116
30	0,0128	0,0126	0,0124	0,0122	0,0120	0,0118	0,0117	0,0115

Fuente: Soto, 2017

Figura 3.11. Ensayo de Granulometría por Hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29. Valores de profundidad efectiva basado en hidrómetro 152 H

HIDRÓMETRO 152 H			
Lectura Actual del Hidrómetro	Profundidad efectiva, L, cm	Lectura Actual del Hidrómetro	Profundidad efectiva, L, cm
0,0	16,3	31,0	11,2
1,0	16,1	32,0	11,1
2,0	16,0	33,0	10,9
3,0	15,8	34,0	10,7
4,0	15,6	35,0	10,6
5,0	15,5	36,0	10,4
6,0	15,3	37,0	10,2
7,0	15,2	38,0	10,1
8,0	15,0	39,0	9,9
9,0	14,8	40,0	9,7
10,0	14,7	41,0	9,6
11,0	14,5	42,0	9,4
12,0	14,3	43,0	9,2
13,0	14,2	44,0	9,1
14,0	14,0	45,0	8,9
15,0	13,8	46,0	8,8
16,0	13,7	47,0	8,6
17,0	13,5	48,0	8,4
18,0	13,3	49,0	8,3
19,0	13,2	50,0	8,1
20,0	13,0	51,0	7,9
21,0	12,9	52,0	7,8
22,0	12,7	53,0	7,6
23,0	12,5	54,0	7,4
24,0	12,4	55,0	7,3
25,0	12,2	56,0	7,1
26,0	12,0	57,0	7,0
27,0	11,9	58,0	6,8
28,0	11,7	59,0	6,6
29,0	11,5	60,0	6,5
30,0	11,4		

Fuente: Soto, 2017

$$D \text{ (mm)} = K\sqrt{\left(\frac{L}{t}\right)}$$

$$D \text{ (mm)} = 0,0124\sqrt{\left(\frac{8,6}{1,0}\right)}$$

$$D \text{ (mm)} = 0,0364$$

Cálculo del porcentaje más fino:

$$\% \text{ más fino} = \frac{100 * a}{W_s} * (R - C_d \pm C_t)$$

Donde:

W_s = Peso de la muestra de suelo secado al horno (g)

a = Factor de corrección por peso específico de la siguiente tabla.

Tabla 3.30. Valores del factor de corrección para diferentes pesos específicos de partículas de suelo

Peso específico	Factor de corrección
2,95	0,94
2,90	0,95
2,85	0,96
2,80	0,97
2,75	0,98
2,70	0,99
2,65	1,00
2,60	1,01
2,55	1,02
2,50	1,03
2,45	1,05

Fuente: Soto, 2017

$$\% \text{ más fino} = \frac{100 * 0,956}{56,7} * (48,70)$$

$$\% \text{ más fino} = 82,11 \%$$

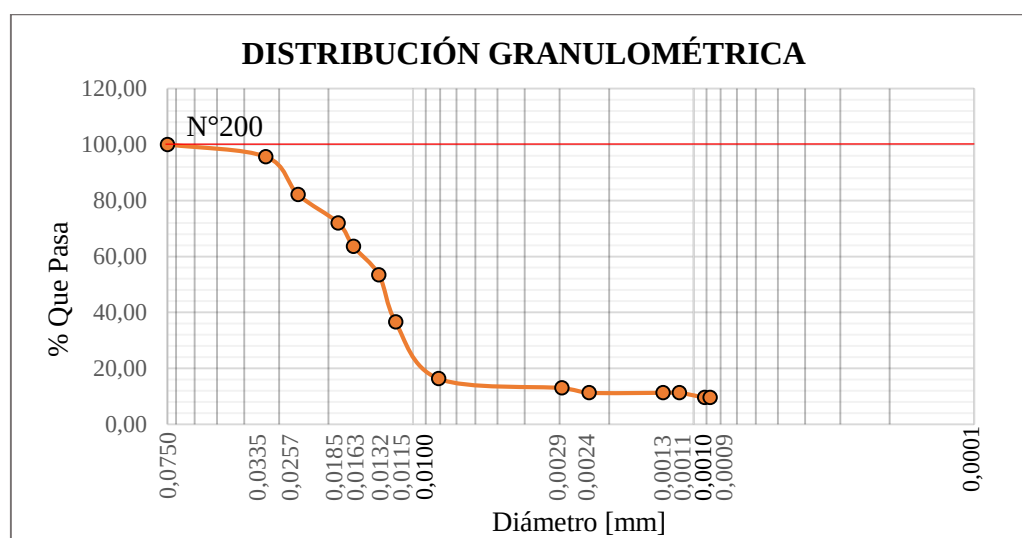
Tabla 3.31. Granulométrica por hidrómetro de la ceniza orgánica

Hora de Lectura	Tiempo trans. (min)	Temp. °C	Lectura Real R'	Lectura Correg. R.	Prof. Efec. L	Constante K (Tabla)	L/t	Ct	Lectura Correg. Rc.	Diam. Partícula mm	% Más Fino
11:15	0	23	55	56,0	7,3	0,0124	0,000	0,70	56,70	0,0750	95,60
11:16	1	23	47	48,0	8,6	0,0124	8,600	0,70	48,70	0,0364	82,11
11:17	2	23	45	46,0	8,9	0,0124	4,450	0,70	46,70	0,0262	78,74
11:19	4	23	36	37,0	10,4	0,0124	2,600	0,70	37,70	0,0200	63,56
11:21	6	23	30	31,0	11,4	0,0124	1,900	0,70	31,70	0,0171	53,45
11:25	10	23	20	21,0	13	0,0124	1,300	0,70	21,70	0,0141	36,59
11:30	15	23	8	9,0	15	0,0124	1,000	0,70	9,70	0,0124	16,35
11:50	35	23	6	7,0	15,3	0,0124	0,437	0,70	7,70	0,0082	12,98
15:46	271	23	5	6,0	15,5	0,0124	0,057	0,70	6,70	0,0030	11,30
18:23	428	23	5	6,0	15,5	0,0124	0,036	0,70	6,70	0,0024	11,30
11:16	1440	23	5	6,0	15,5	0,0124	0,011	0,70	6,70	0,0013	11,30
18:40	1885	23	4	5,0	15,6	0,0124	0,008	0,70	5,70	0,0011	9,61
11:15	2880	23	4	5,0	15,6	0,0124	0,005	0,70	5,70	0,0009	9,61
15:46	3151	23	4	5,0	15,6	0,0124	0,005	0,70	5,70	0,0009	9,61

Suelo seco (g) =	56,7	Peso específico relativo de sólidos Ss=	2,87
Coeficiente "a" =	0,956	Lectura del hidrómetro en agua (Cm)=	1,00

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.6. Curva de distribución granulométrica



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.32. Resultados de granulometría por hidrómetro de ceniza orgánica

MUESTRAS N°	1	2	3	PROMEDIO
% Pasa tamiz N°200	100	100,00	100,00	100,00
% Limo parcial	88,70	88,80	88,09	88,53
% Arcilla parcial	11,30	11,20	11,91	11,47

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Caracterización del cemento asfáltico

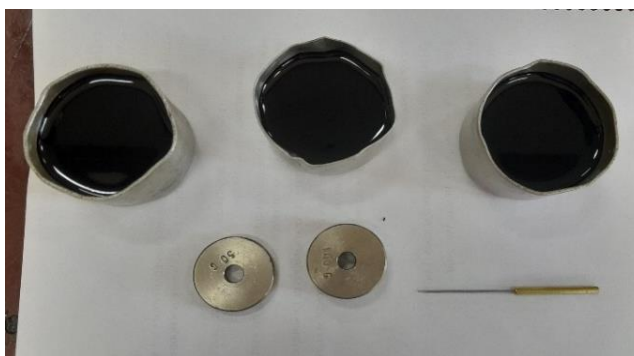
Para caracterizar el cemento asfáltico, es necesario realizar una variedad de ensayos para conocer su comportamiento a escala real. La caracterización se realizó en el laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

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

El propósito principal del ensayo es evaluar la dureza del material asfáltico. Para ello, se utiliza un equipo compuesto por un penetrómetro, una aguja normalizada, un cronómetro y un recipiente con cemento asfáltico. Este último debe estar a una temperatura de referencia de 25 °C.

Procedimiento:

Durante el ensayo, la aguja normalizada se introduce en el cemento asfáltico tres veces, cada vez durante cinco segundos. La distancia que la aguja penetra en el asfalto se mide en décimas de milímetro. El equipo se calibra previamente para proporcionar lecturas en unidades de penetración, con una aproximación de 0.1 mm.

Figura 3.12. Muestras para ensayo de penetración del asfalto

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Promedio de la muestra 1.

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Lec1} + \text{Lec2} + \text{Lec3}}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{93 + 94 + 92}{3}$$

$$\text{Promedio} = 93 (\times 10^{-1} \text{mm})$$

Promedio de las muestras.

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Prom1} + \text{Prom2} + \text{Prom3}}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{93 + 87 + 90}{3}$$

$$\text{Promedio} = 90 (\times 10^{-1} \text{mm})$$

Tabla 3.33. Datos y resultados de ensayo penetración

Penetración a 25°C, 100s. 5seg:	UNIDAD	MUESTRAS			RESULTADO	ESPECIFICACIONES	
		1	2	3		MÍN.	MÁX.
Lectura N°1	0,1 mm	93	86	89	90	85	100
Lectura N°2	0,1 mm	94	86	90			
Lectura N°3	0,1 mm	92	88	90			
Promedio	0,1 mm	93	87	90			

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2. Ensayo de peso específico del asfalto (AASHTO T-43/ASTM D-70)

El peso específico de un material se define como la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al peso igual de agua a la misma temperatura, a los 25 °C.

Procedimiento:

Limpiar el picnómetro para su calibración, pesando seco y vacío con una aproximación a 0,01 g, designar como A.

Se pesa el picnómetro lleno de agua destilada hasta la marca de medición, se designa como B.

Se calienta la muestra de asfalto hasta que esté fluida y verter en el picnómetro hasta 25 ml acondicionando a 25°C en baño maría, luego pesas y designar el valor como C.

Llenar con agua destilada hasta la marca de medida, luego pesar y designar como D. Los picnómetros deben acondicionarse por 30 minutos en baño maría a 25°C.

Cálculos:

Muestra 1

$$\text{P. E. cemento asfáltico} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)} * 0,997077$$

$$\text{P. E. cemento asfáltico} = \frac{(63 - 34,1)}{(85,8 - 34,1) - (86 - 63)} * 0,997077$$

$$\text{P. E. cemento asfáltico} = 1,004 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Promedio de muestras

$$\text{P. E. promedio} = \frac{\text{P. E.}_1 + \text{P. E.}_2 + \text{P. E.}_3}{3}$$

$$\text{P. E. promedio} = \frac{1,004 + 1,003 + 0,994}{3}$$

$$\text{P. E. promedio} = 1,000 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Figura 3.13. Ensayo peso específico del asfalto



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.34. Resultados de ensayo peso específico

Peso específico a 25°C	UNIDAD	MUESTRAS			RESULTADO
		1	2	3	
Peso Picnómetro	g	34,1	34	34,3	1,000
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	g	85,8	87,2	89,4	
Peso Picnómetro + Muestra	g	63	65,5	65,5	
Peso Picnómetro + Agua +Muestra (25°C)	g	86	87,4	89,3	
Peso Específico Promedio	g/cm ³	1,004	1,003	0,994	

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3. Ensayo de punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (AASHTO T-79/ASTM D1310-01)

Este ensayo tiene por objetivo medir la temperatura en la cual los materiales volátiles crean un destello, en presencia de una llama abierta.

Procedimiento:

Calentar el cemento asfáltico y llenar en la copa abierta hasta la marca de enrase.

Se incrementa gradualmente la temperatura, primero rápidamente y luego a una tasa constante y lenta medida que se acerca al punto de inflamación.

A intervalos de tiempo especificados, se pasa una pequeña llama de ensayo sobre la superficie de la muestra.

La temperatura más baja a la cual la aplicación de la llama de ensayo provoca que los vapores desprendan una llamarada repentina se toma como el punto de inflamación.

Tabla 3.35. Resultados del ensayo punto de inflamación

ENSAYO	UNIDAD	MUESTRAS			RESULTADO
		1	2	3	
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	300	310	302	304

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14. Ensayo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

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

El ensayo de punto de ablandamiento del asfalto es una prueba fundamental para evaluar las propiedades visco elásticas de los materiales bituminosos. A través de este ensayo, se determina la temperatura a la cual el asfalto comienza a ablandarse y fluir bajo una carga específica. Uno de los métodos comunes para realizar este ensayo es el método del anillo y la bola.

Procedimiento:

Se llena un anillo de latón con la muestra de asfalto. El anillo se coloca en posición horizontal y se suspende en un baño de agua o glicerina.

Sobre el centro del anillo se coloca una bola de acero. Se calienta gradualmente el baño de agua.

La bola de acero desciende gradualmente envuelta en una bolsa de asfalto hasta tocar el fondo del baño.

La temperatura del baño en ese momento se denomina punto de ablandamiento del asfalto ensayado.

Figura 3.15. Ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.36. Resultados de ensayo punto de ablandamiento

ENSAYO	UNIDAD	MUESTRAS			RESULTADO
		1	2	3	
Punto de Ablandamiento	°C	42	45	43	43

Fuente: Elaboración propia

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

El ensayo de ductilidad en los materiales asfálticos es una prueba importante para evaluar su comportamiento mecánico.

Procedimiento:

Se calienta la muestra de cemento asfáltico hasta que sea fluida, se vierte en los moldes cuidadosamente sin dejar espacios vacíos y se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos.

Luego colocar las muestras en baño maría a 25°C durante 30 minutos, para poder enrasar los moldes y colocar en el ductilímetro y comenzar con la medición de ductilidad de muestras.

Figura 3.16. Ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.37. Resultados del ensayo de ductilidad

ENSAYO	UNIDAD	MUESTRAS			RESULTADO
		1	2	3	
Ductilidad a 25 °C AASHTO T-51	cm	96,8	99	107	101

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Resultados de la caracterización de materiales

A continuación, se tiene las tablas resumen de los resultados de la caracterización de los materiales componentes de la mezcla asfáltica:

Tabla 3.38. Resumen de resultados de los agregados pétreos

Ensayo		Resultado	Especificaciones		Norma
	Peso específico a granel (grava)	2,57	2	3	ASTM D 127
	Peso específico Sat. Sup. Seco	2,61	2	3	
	Peso específico aparente	2,68	2	3	
	% de absorción	1,52	-	-	
	Peso específico a granel (gravilla)	2,57	2	3	
	Peso específico Sat. Sup. Seco	2,62	2	3	
	Peso específico aparente	2,70	2	3	
	% de absorción	2,00	-	-	
	Peso específico a granel (arena)	2,46	2	3	ASTM C 128
	Peso específico Sat. Sup. Seco	2,51	2	3	
	Peso específico aparente	2,58	2	3	
	% de absorción	1,84	-	-	
Desgaste de los ángeles (Grava)		22,58	< 35%		ASTM C 131
Desgaste de los ángeles (Gravilla)		24,73	< 35%		ASTM C 132
Equivalente de arena		96,28	> 50%		ASTM D 2419
Peso unitario grava	Suelto	1,38	-	-	ASTM C 29
	Compactado	1,50	-	-	
Peso unitario gravilla	Suelto	1,36	-	-	
	Compactado	1,47	-	-	
Peso unitario arena	Suelto	1,56	-	-	
	Compactado	1,69	-	-	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.39. Resumen de resultados de la caracterización del cemento asfáltico

Ensayo	Resultado	Especificaciones		Norma
Penetración a 25°C, 100s. 5seg:	90	85	100	ASTM D 5
Peso Específico a 25°C:	1,00	1	1,05	ASTM D 70
Punto de Inflamación	304	232	-	ASTM D 92
Punto de Ablandamiento	43	42	53	ASTM D 113
Ductilidad a 25 °C	101	100	-	ASTM D 37

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.40. Resumen de resultados de caracterización de la ceniza orgánica

Propiedades físicas (filler)	Valor	Norma
Estado físico	Sólido	-
Color	Grisáceo	-
Peso específico (g/cm³)	2,87	ASTM D-854
Hidrómetro (%) arcilla	11,47	ASTM D-422

Fuente: Elaboración propia

3.4. Ensayos aplicados en la investigación

En la mezcla asfáltica que se elaborará es una mezcla asfáltica con graduación densa en caliente con cemento asfáltico convencional 85/100, por medio de la metodología Marshall. Para desarrollar la investigación, se adiciona filler (ceniza orgánica) en la mezcla asfáltica.

3.4.1. Diseño de la mezcla asfáltica por el método Marshall

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.

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 ½”) 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.

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 3.41 presenta los tamaños máximo nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D 3515.

Tabla 3.41. Graduaciones propuestas para la mezcla densa (ASTM D 3515)

Tamaño de tamiz	Designación de la mezcla usando el tamaño máximo nominal de agregado				
	37,5 mm (1 1/2")	25 mm (1")	19 mm (3/4")	12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")
	Porcentaje total que pasa (en peso)				
50,00 mm	100				
37,00 mm	90 a 100	100			
25,00 mm	-	90 a 100	100		
19,00 mm	5 a 80	-	90 a 100	100	
12,50 mm	-	56 a 80	-	90 a 100	100
9,50 mm	-	-	56 a 80	-	90 a 100
4,75 mm	23 a 53	29 a 59	35 a 65	44 a 74	55 a 87
2,36 mm	15 a 41	19 a 45	23 a 49	28 a 56	-
1,18 mm	-	-	-	-	-
0,60 mm	-	-	-	-	7 a 23
0,30 mm	4 a 16	5 a 17	5 a 19	5 a 21	-
0,15 mm	-	-	-	-	2 a 10
0,075 mm	0 a 5	1 a 7	2 a 8	2 a 10	5 a 12
Cemento asfáltico Porcentaje en peso del total de la mezcla	3 a 8	3 a 9	4 a 10	4 a 11	5 a 10

Fuente: Instituto de Asfalto, 1982

Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas preparadas en caliente, utilizando el equipo Marshall, determina características físicas de las mezclas y analiza los parámetros que definen el contenido de asfalto. La estabilidad se determina empleando el principio de corte en compresión semi-confinada, sometiendo a la muestra a esfuerzos de compresión diametral a una temperatura de 60 °C (140 °F). La aplicación de esfuerzos y la rotura de las muestras se consiguen con un dispositivo especialmente proyectado para las pruebas de estabilidad.

3.4.2. Justificación de criterios en la investigación

En la presenta investigación se enfoca en la aplicación para carreteras de tráfico pesado, como indica la tabla 3.42 se debe ajustar a los valores de las especificaciones.

Tabla 3.42. Criterios de diseño de mezclas Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
Criterio de mezcla	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad, (N) (lb)	3336	-	5338	-	8006	-
	750	-	1200	-	1800	-
Flujo, (0,25 mm) (0,01 pulg)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje vacíos de agregado mineral	Tabla 2.3					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Instituto de Asfalto, 1982

Según las graduaciones dadas en la tabla 3.43, se determina la distribución granulométrica para la mezcla asfáltica densa; con tamaño máximo de 1”.

Tabla 3.43. Graduación para tamaño máximo 1”

Tamices	Tamaño	Especificaciones (ASTM D 3515)	
	(mm)	Mínimo	Máximo
1"	25,00	100	100
3/4"	19,00	90	100
3/8"	9,50	56	80
N°4	4,75	35	65
N°8	2,36	23	49
N°50	0,30	5	19
N°200	0,075	2	8

Fuente: Norma, ASTM D 3515

Conociendo que el filler es el material pasante el tamiz N°200, según la tabla 3.43 el porcentaje de filler pasante es de 2 % a 8%; debido a ello en la investigación queda representada de la siguiente forma: 0%, 2%, 3%, 3,5%, 4% y 6%.

3.4.3. Diseño Granulométrico

Para la obtención de una graduación de agregados pétreos dentro de las especificaciones se debe combinar en porcentajes la grava, gravilla, arena y filler.

A continuación, se muestra la tabla de pesos retenidos por cada agregado, para determinar la combinación adecuada.

Tabla 3.44. Resumen de granulometría por peso

Abertura del tamiz		Grava peso ret. (g)	Gravilla peso ret. (g)	Arena peso ret. (g)	Filler (g)
pulg	mm				
1"	25	0,00	0,0	0,00	0,00
3/4"	19	1490,40	0,0	0,00	0,00
1/2"	12,5	5034,47	0,0	0,00	0,00
3/8"	9,5	2261,47	97,9	0,00	0,00
N°4	4,75	1206,67	7846,9	219,33	0,00
N°8	2,36	2,87	1887,1	1776,00	0,00
N°16	1,18	0,00	0,0	1463,67	0,00
N°30	0,6	0,00	0,0	1231,33	0,00
N°50	0,3	0,00	0,0	2244,00	0,00
N°100	0,15	0,00	0,0	1843,00	0,00
N°200	0,075	0,00	0,0	846,00	0,00
Base	-	4,13	168,1	376,67	10000,00
Peso Total		10000,00	10000,00	10000,00	10000,00

Fuente: Elaboración propia

En la presente investigación se realizará la combinación de los diferentes agregados de la siguiente manera:

Agregado grueso (Grava) = 30%

Agregado grueso (Gravilla) = 25%

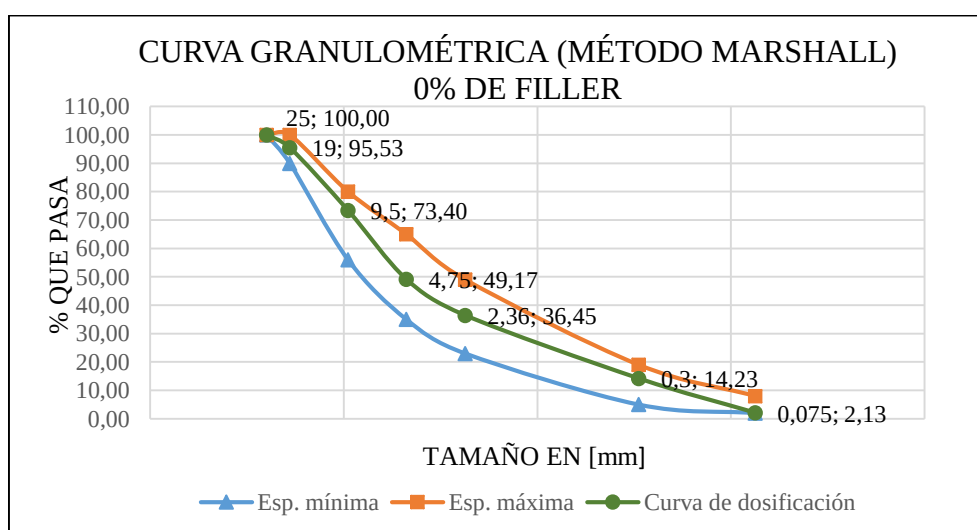
Agregado fino (Arena) = 45%

Tabla 3.45. Granulometría formada con 0% de filler

Tamices	DOSIFICACIÓN				CURVA DE DOSIFICACIÓN				Especificación ASTM D 3515	
	Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret	Ret. Acum	% Ret	% Que pasa del total	Mín.	Máx.
	(%) 30%	(%) 25%	(%) 45%	(%) 0%						
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	447,12	0,00	0,00	0,00	447,12	447,12	4,47	95,53	90	100
1/2"	1510,34	0,00	0,00	0,00	1510,34	1957,46	19,57	80,43	-	-
3/8"	678,44	24,48	0,00	0,00	702,92	2660,38	26,60	73,40	56	80
N°4	362,00	1961,73	98,70	0,00	2422,43	5082,82	50,83	49,17	35	65
N°8	0,86	471,77	799,20	0,00	1271,83	6354,64	63,55	36,45	23	49
N°16	0,00	0,00	658,65	0,00	658,65	7013,29	70,13	29,87	-	-
N°30	0,00	0,00	554,10	0,00	554,10	7567,39	75,67	24,33	-	-
N°50	0,00	0,00	1009,80	0,00	1009,80	8577,19	85,77	14,23	5	19
N°100	0,00	0,00	829,35	0,00	829,35	9406,54	94,07	5,93	-	-
N°200	0,00	0,00	380,70	0,00	380,70	9787,24	97,87	2,13	2	8
Base	1,24	42,02	169,50	0,00	212,76	10000,00	100,00	0,00	-	-
Peso Total	3000,00	2500,00	4500,00	0,00	10000,00					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.7. Curva Granulométrica con 0% de filler



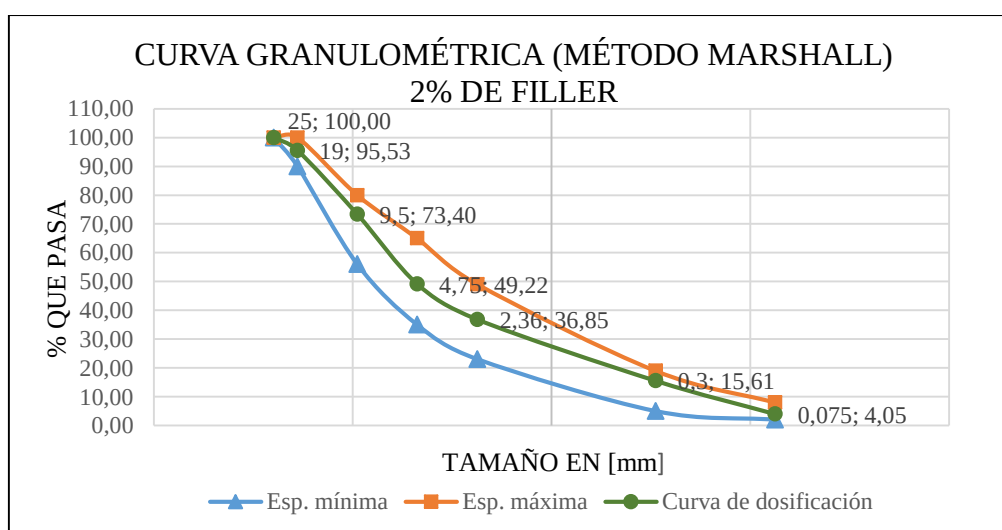
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.46. Granulometría formada con 2% de filler

Tamices	DOSIFICACIÓN				CURVA DE DOSIFICACIÓN				Especificación ASTM D3515	
	Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret	Ret. Acum	% Ret	% Que pasa del total	Mín.	Máx.
	(%)	(%)	(%)	(%)						
	30%	25%	43%	2%						
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	447,12	0,00	0,00	0,00	447,12	447,12	4,47	95,53	90	100
1/2"	1510,34	0,00	0,00	0,00	1510,34	1957,46	19,57	80,43	-	-
3/8"	678,44	24,48	0,00	0,00	702,92	2660,38	26,60	73,40	56	80
N°4	362,00	1961,73	94,31	0,00	2418,05	5078,43	50,78	49,22	35	65
N°8	0,86	471,77	763,68	0,00	1236,31	6314,74	63,15	36,85	23	49
N°16	0,00	0,00	629,38	0,00	629,38	6944,11	69,44	30,56	-	-
N°30	0,00	0,00	529,47	0,00	529,47	7473,59	74,74	25,26	-	-
N°50	0,00	0,00	964,92	0,00	964,92	8438,51	84,39	15,61	5	19
N°100	0,00	0,00	792,49	0,00	792,49	9231,00	92,31	7,69	-	-
N°200	0,00	0,00	363,78	0,00	363,78	9594,78	95,95	4,05	2	8
Base	1,24	42,02	161,97	200,00	405,22	10000,00	100,00	0,00	-	-
Peso Total	3000,00	2500,00	4300,00	200,00	10000,00					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.8. Curva granulométrica con 2% de filler



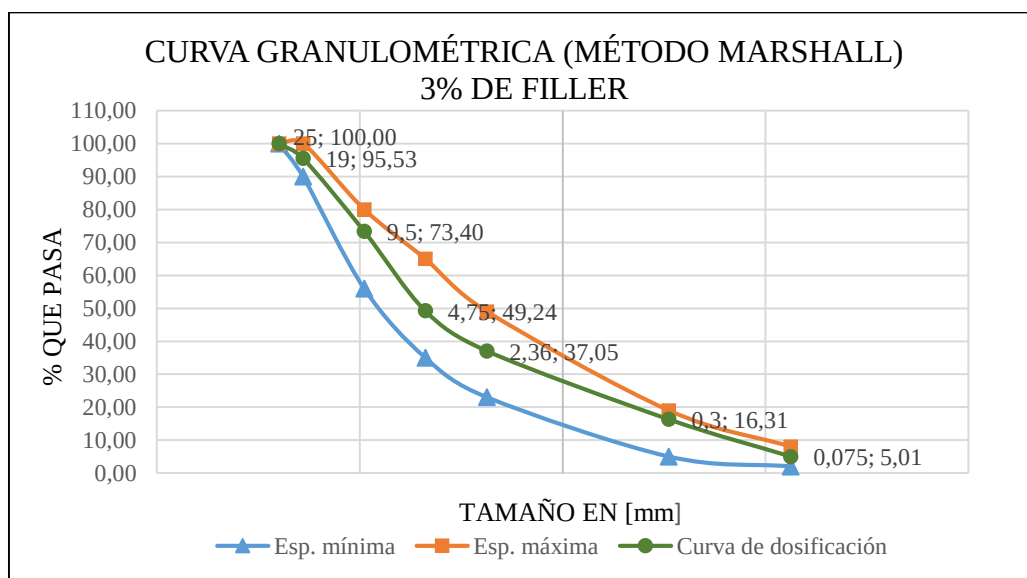
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.47. Granulometría formada con 3% de filler

Tamices	DOSIFICACIÓN				CURVA DE DOSIFICACIÓN				Especificación ASTM D3515	
	Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret	Ret. Acum	% Ret	% Que pasa del total	Mín.	Máx.
	(%) 30%	(%) 25%	(%) 42%	(%) 3%						
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	447,12	0,00	0,00	0,00	447,12	447,12	4,47	95,53	90	100
1/2"	1510,34	0,00	0,00	0,00	1510,34	1957,46	19,57	80,43	-	-
3/8"	678,44	24,48	0,00	0,00	702,92	2660,38	26,60	73,40	56	80
Nº4	362,00	1961,73	92,12	0,00	2415,85	5076,24	50,76	49,24	35	65
Nº8	0,86	471,77	745,92	0,00	1218,55	6294,78	62,95	37,05	23	49
Nº16	0,00	0,00	614,74	0,00	614,74	6909,52	69,10	30,90	-	-
Nº30	0,00	0,00	517,16	0,00	517,16	7426,68	74,27	25,73	-	-
Nº50	0,00	0,00	942,48	0,00	942,48	8369,16	83,69	16,31	5	19
Nº100	0,00	0,00	774,06	0,00	774,06	9143,22	91,43	8,57	-	-
Nº200	0,00	0,00	355,32	0,00	355,32	9498,54	94,99	5,01	2	8
Base	1,24	42,02	158,20	300,00	501,46	10000,0	100,00	0,00	-	-
Peso Total	3000,00	2500,00	4200,00	300,00	10000,0					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.9. Curva granulométrica con 3% de filler



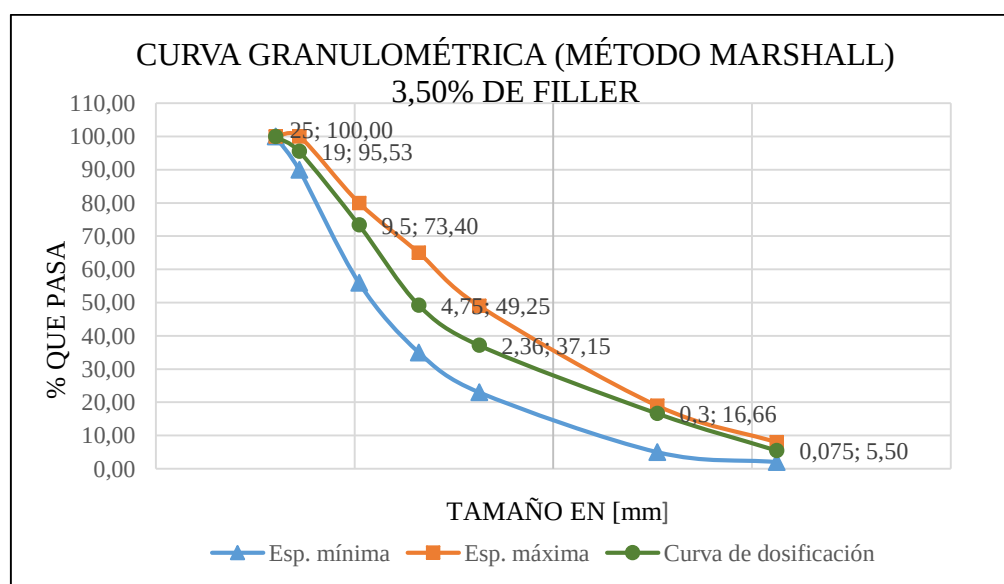
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.48. Granulometría formada con 3,50% de filler

Tamices	DOSIFICACIÓN				CURVA DE DOSIFICACIÓN				Especificación ASTM D3515	
	Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret	Ret. Acum	% Ret	% Que pasa del total	Mín.	Máx.
	(%)	(%)	(%)	(%)						
	30%	25%	41,5%	3,5%						
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	447,12	0,00	0,00	0,00	447,12	447,12	4,47	95,53	90	100
1/2"	1510,34	0,00	0,00	0,00	1510,34	1957,46	19,57	80,43	-	-
3/8"	678,44	24,48	0,00	0,00	702,92	2660,38	26,60	73,40	56	80
Nº4	362,00	1961,73	91,02	0,00	2414,76	5075,14	50,75	49,25	35	65
Nº8	0,86	471,77	737,04	0,00	1209,67	6284,81	62,85	37,15	23	49
Nº16	0,00	0,00	607,42	0,00	607,42	6892,23	68,92	31,08	-	-
Nº30	0,00	0,00	511,00	0,00	511,00	7403,23	74,03	25,97	-	-
Nº50	0,00	0,00	931,26	0,00	931,26	8334,49	83,34	16,66	5	19
Nº100	0,00	0,00	764,85	0,00	764,85	9099,34	90,99	9,01	-	-
Nº200	0,00	0,00	351,09	0,00	351,09	9450,43	94,50	5,50	2	8
Base	1,24	42,02	156,32	350,00	549,57	10000,00	100,00	0,00	-	-
Peso Total	3000,00	2500,00	4150,00	350,00	10000,00					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.10. Curva granulométrica con 3,50% de filler



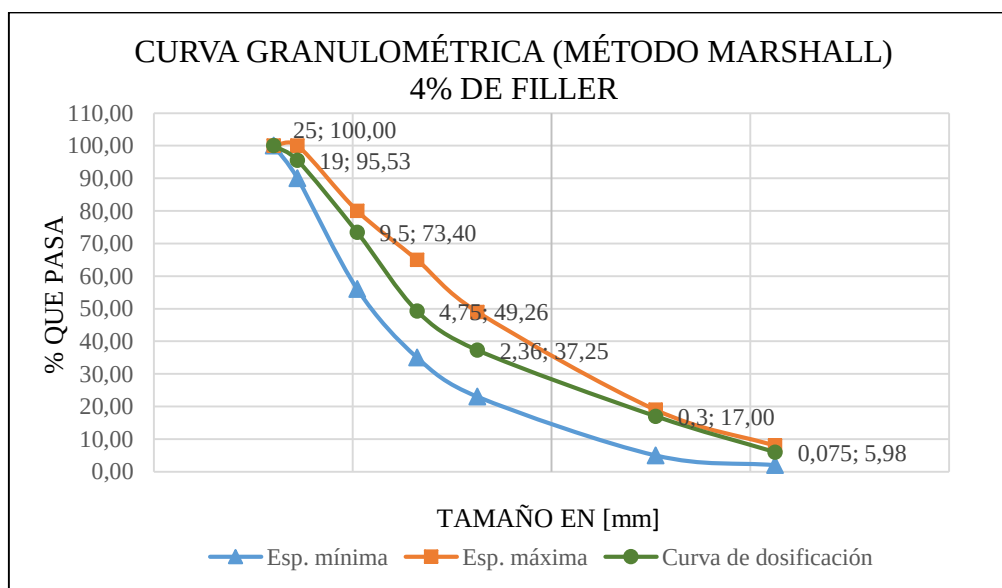
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.49. Granulometría formada con 4% de filler

Tamices	DOSIFICACIÓN				CURVA DE DOSIFICACIÓN				Especificación ASTM D3515	
	Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret	Ret. Acum	% Ret	% Que pasa del total	Mín.	Máx.
	(%)	(%)	(%)	(%)						
	30%	25%	41%	4%						
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	447,12	0,00	0,00	0,00	447,12	447,12	4,47	95,53	90	100
1/2"	1510,34	0,00	0,00	0,00	1510,34	1957,46	19,57	80,43	-	-
3/8"	678,44	24,48	0,00	0,00	702,92	2660,38	26,60	73,40	56	80
Nº4	362,00	1961,73	89,93	0,00	2413,66	5074,04	50,74	49,26	35	65
Nº8	0,86	471,77	728,16	0,00	1200,79	6274,83	62,75	37,25	23	49
Nº16	0,00	0,00	600,10	0,00	600,10	6874,93	68,75	31,25	-	-
Nº30	0,00	0,00	504,85	0,00	504,85	7379,78	73,80	26,20	-	-
Nº50	0,00	0,00	920,04	0,00	920,04	8299,82	83,00	17,00	5	19
Nº100	0,00	0,00	755,63	0,00	755,63	9055,45	90,55	9,45	-	-
Nº200	0,00	0,00	346,86	0,00	346,86	9402,31	94,02	5,98	2	8
Base	1,24	42,02	154,43	400,00	597,69	10000,00	100,00	0,00	-	-
Peso Total	3000,00	2500,00	4100,00	400,00	10000,0					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.11. Curva granulométrica con 4% de filler



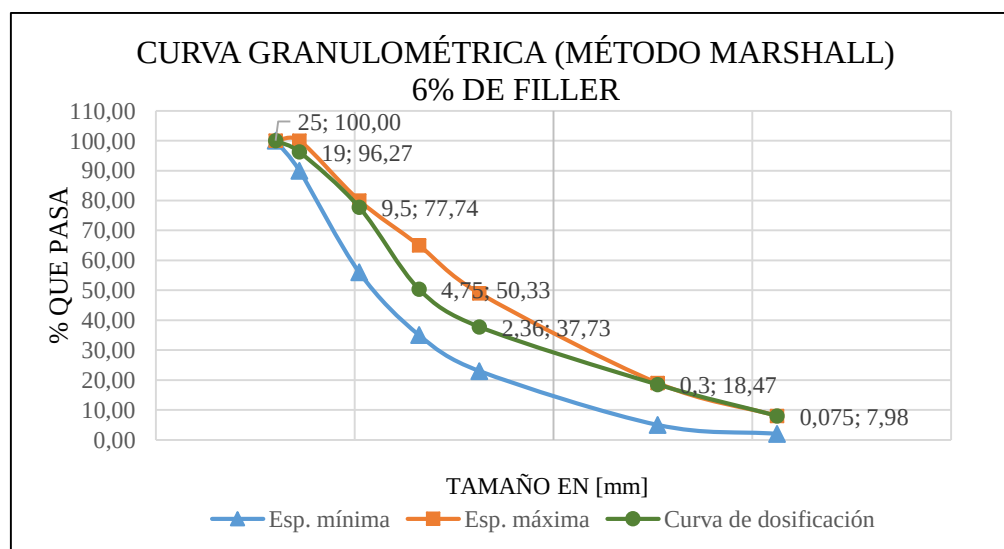
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.50. Granulometría formada con 6% de filler

Tamices	DOSIFICACIÓN				CURVA DE DOSIFICACIÓN				Especificación ASTM D3515	
	Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret	Ret. Acum	% Ret	% Que pasa del total	Mín.	Máx.
	(%)	(%)	(%)	(%)						
	30%	25%	39%	6%						
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	372,60	0,00	0,00	0,00	372,60	372,60	3,73	96,27	90	100
1/2"	1258,62	0,00	0,00	0,00	1258,62	1631,22	16,31	83,69	-	-
3/8"	565,37	29,38	0,00	0,00	594,75	2225,96	22,26	77,74	56	80
Nº4	301,67	2354,08	85,54	0,00	2741,29	4967,25	49,67	50,33	35	65
Nº8	0,72	566,12	692,64	0,00	1259,48	6226,73	62,27	37,73	23	49
Nº16	0,00	0,00	570,83	0,00	570,83	6797,56	67,98	32,02	-	-
Nº30	0,00	0,00	480,22	0,00	480,22	7277,78	72,78	27,22	-	-
Nº50	0,00	0,00	875,16	0,00	875,16	8152,94	81,53	18,47	5	19
Nº100	0,00	0,00	718,77	0,00	718,77	8871,71	88,72	11,28	-	-
Nº200	0,00	0,00	329,94	0,00	329,94	9201,65	92,02	7,98	2	8
Base	1,03	50,42	146,90	600,00	798,35	10000,00	100,00	0,00	-	-
Peso Total	2500,00	3000,00	3900,00	600,00	10000,00					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.12. Curva granulométrica con 6% de filler



Fuente: Elaboración propia

3.4.4. Determinación del contenido mínimo de cemento asfáltico

Para comenzar con la elaboración de briquetas de mezcla asfáltica y determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico es necesario conocer el porcentaje mínimo de cemento asfáltico de aplicación, en base a la granulometría de la tabla 3.45, se calcula con la siguiente fórmula:

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

Donde:

A = Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla

a = Porcentaje retenido en el tamiz N°8

b = Porcentaje pasante el tamiz N°8

c = Porcentaje de agregado que pasa el tamiz N°200

K = 0,15, si el (%) que retiene el tamiz $\frac{3}{4}$ " está entre el 11% y 15%

0,18 si el (%) que retiene el tamiz $\frac{3}{4}$ " está entre 6% y 10%

0,20, si el (%) que retiene es $\leq 5\%$

F = de 0 a 2% que varía según la absorción del material

Porcentaje de absorción de agregados:

Agregado grueso (grava) = 1,52 %

Agregado grueso (gravilla) = 2,0 %

Agregado fino (arena) = 1,84 %

$$F = (\%grava * \%abs) + (\%gravilla * \%abs) + (\%arena * \%abs)$$

$$F = (0,3 * 1,52) + (0,25 * 2,0) + (0,45 * 1,84)$$

$$F = 1,784$$

$$A = 0,02(63,55) + 0,035(36,45) + 0,20(2,13) + 1,784$$

$$A = 4,76 \% \approx 5,0 \%$$

El contenido mínimo de cemento asfáltico es 5,0 %, partiendo de este valor, se trabajará en los diferentes porcentajes:

-0,50 % de contenido asfáltico = 4,50 %

+0,50 % de contenido asfáltico = 5,00 %

+1,00 % de contenido asfáltico = 5,50 %

+1,50 % de contenido asfáltico = 6,00 %

+2,00 % de contenido asfáltico = 6,50 %

3.4.5. Número de briquetas a realizar

Conociendo los porcentajes de asfalto a aplicar y la combinación adecuada de gradación, a continuación, se observa: por cada porcentaje de cemento asfáltico se realizan 3 briquetas, combinadas con los porcentajes de adición de ceniza orgánica como filler (0%, 2%, 3%, 3,5%, 4% y 6%) en total se realizarán 15 briquetas por cada porcentaje de filler.

Tabla 3.51. Número total de briquetas

Descripción	Porcentaje de ceniza orgánica	Cantidad de briquetas
Briquetas con variación de ceniza orgánica para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico y ceniza orgánica	0%	15
	2%	15
	3%	15
	3,5%	15
	4%	15
	6%	15
Total briquetas de pre diseño		90
Briquetas con el % óptimo de cemento asfáltico y ceniza orgánica	% óptimo	30
Total briquetas de investigación		120

Fuente: Elaboración propia

3.4.6. Dosificación de las mezclas asfálticas según el contenido de ceniza orgánica como filler por medio del método Marshall (ASTM D153)

Para determinar la dosificación de las mezclas asfálticas, se realiza con la combinación de material pétreo, cemento asfáltico y la adición de ceniza orgánica como filler, a base de

un peso total por briqueta de 1200 g. Con estas dosificaciones se obtendrá los valores para determinar los porcentajes óptimos de asfalto y ceniza orgánica.

Tabla 3.52. Dosificación para 0% de ceniza orgánica

	PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA				
	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%
Peso del Cemento Asfáltico (g) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso de Grava (g) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Peso de Gravilla (g) *	286,50	285,00	283,50	282,00	280,50
Peso de Arena (g) *	515,70	513,00	510,30	507,60	504,90
Peso de Filler (g) *	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Peso total de la briqueta (g) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.53. Dosificación para 2% de ceniza orgánica

	PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA				
	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%
Peso del Cemento Asfáltico (g) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso de Grava (g) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Peso de Gravilla (g) *	286,50	285,00	283,50	282,00	280,50
Peso de Arena (g) *	492,78	490,20	487,62	485,04	482,46
Peso de Filler (g) *	22,92	22,80	22,68	22,56	22,44
Peso total de la briqueta (g) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.54. Dosificación para 3% de ceniza orgánica

	PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA				
	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%
Peso del Cemento Asfáltico (g) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso de Grava (g) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Peso de Gravilla (g) *	286,50	285,00	283,50	282,00	280,50
Peso de Arena (g) *	481,32	478,80	476,28	473,76	471,24
Peso de Filler (g) *	34,38	34,20	34,02	33,84	33,66
Peso total de la briqueta (g) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.55. Dosificación para 3,50% de ceniza orgánica

	PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA				
	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%
Peso del Cemento Asfáltico (g) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso de Grava (g) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Peso de Gravilla (g) *	286,50	285,00	283,50	282,00	280,50
Peso de Arena (g) *	475,59	473,10	470,61	468,12	465,63
Peso de Filler (g) *	40,11	39,90	39,69	39,48	39,27
Peso total de la briqueta (g) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.56. Dosificación para 4% de ceniza orgánica

	PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA				
	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%
Peso del Cemento Asfáltico (g) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso de Grava (g) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Peso de Gravilla (g) *	286,50	285,00	283,50	282,00	280,50
Peso de Arena (g) *	469,86	467,40	464,94	462,48	460,02
Peso de Filler (g) *	45,84	45,60	45,36	45,12	44,88
Peso total de la briqueta (g) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.57. Dosificación para 6% de ceniza orgánica

	PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA				
	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%
Peso del Cemento Asfáltico (g) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso de Grava (g) *	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Peso de Gravilla (g) *	286,50	285,00	283,50	282,00	280,50
Peso de Arena (g) *	446,94	444,60	442,26	439,92	437,58
Peso de Filler (g) *	68,76	68,40	68,04	67,68	67,32
Peso total de la briqueta (g) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

3.4.6.1. Elaboración de briquetas de mezcla asfáltica con el método Marshall

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se preparan y compactan una serie de muestras de prueba (briquetas), con distintos porcentajes de asfalto cuyo rango de variación no debe ser mayor a 0,5%. Como mínimo se debe incluir dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo de contenido de asfalto estimado.

Aproximadamente para cada briqueta, se necesitan 1200 g entre agregados y asfalto, entonces la cantidad representativa de los agregados es alrededor del 95%.

Entre los elementos más importantes del equipo necesario para la elaboración de los núcleos de prueba, se pueden citar los siguientes:

- a) **Horno y placa calentadora eléctrica**, para calentar los materiales, Horno aireador para el curado de las mezclas.
- b) **Termómetro blindado de vidrio o dial** con varilla para lecturas entre 50 °F (10 °C) y 450 °F (232 °C).
- c) **Balanza de 2 kg de capacidad**, con aproximación a 0,1 g. Balanza de 5 kg con aproximación a 1 g.
- d) **Pedestal para compactación**, que consta de un soporte de madera, sobre el cual descansa una placa de acero de 12" x 12" x 1" (305 x 305 x 25 mm).
- e) **Molde de compactación** que consta de una base, molde encofrado y collar de extensión. El molde tiene un diámetro interior de 4" (101,6 mm) y una altura aproximadamente 3" (76 mm). La base y el collar están diseñados para intercambiarse ya sea a uno u otro lado del molde.
- f) **Martillo de compactación**, que consta de una barra achatada que cae deslizándose sobre una guía y un pisón de cara circular de 3 7/8" (98,4 mm). La barra pesa 10 libras (4,5 kg) y tiene una caída (guía) de 18" de altura.
- g) **Soporte del molde**, que consta de un dispositivo de tensión elástica, diseñado para acoplar el molde sobre el pedestal de compactación. Extractor de muestra o prensa para extraer la muestra (briqueta) ya compactada.

- h) **Accesorios** como cucharas, espátula, mezclador mecánico, baño de agua hirviendo, etc.

Procedimiento:

Pesar por separado en bandejas, para cada muestra de ensayo, la cantidad adecuada de cada fracción que produzca una bachada que de cómo resultado una muestra compactada de $2,5 \pm 0,1$ " de espesor ($63,5 \pm 1,3$ mm).

Colocar las bandejas para el mezclado en el horno y calentarlas a una temperatura aproximada de 25 °F (13,9 °C), por encima de la de mezclado. Calentar el asfalto a una temperatura lo suficientemente alta para que fluya fácilmente, pero sin que ésta sea mayor que la de mezclado.

Figura 3.17. Proceso de calentamiento de agregados con ceniza orgánica



Fuente: Elaboración propia

Colocar el asfalto caliente a la mezcla de agregado. Se mezclan los agregados y el asfalto hasta obtener una mezcla homogénea.

Colocar toda la mezcla preparada dentro del molde, emparejando la mezcla con la espátula, unas 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en la parte central; la temperatura de la mezcla debe estar muy cercana a los límites de la temperatura de compactación establecida.

Colocar en el pedestal de compactación. Se aplican 75 golpes con el martillo, según lo especificado para la categoría de tráfico pesado. Se quitan la base y el collar se le da vuelta

y se vuelva a armar el conjunto. Se aplica el mismo número de golpes a la cara opuesta de la muestra. Después de la compactación, se quita la base del molde y se expone la muestra a la temperatura ambiente dentro del molde. Pasados los 15 minutos mínimamente se saca la muestra del molde por medio de un gato hidráulico.

El ensayo Marshall debe efectuarse después de transcurridas 16 horas de la compactación.

Figura 3.18. Ensayo de compactación de briquetas



Fuente: Elaboración propia

3.4.6.2. Ensayo para determinar la densidad de la mezcla asfáltica

Pasadas las 16 horas de haber realizado las briquetas, se procede al levantamiento de datos para la determinación de la densidad real de las briquetas.

Procedimiento:

Se pesa la briketa en estado seco, luego colocar la muestra por 10 minutos sumergida en agua a $25\pm1^{\circ}\text{C}$ para pesarla saturada superficialmente seca.

Finalmente se pesa la briketa sumergida.

Cálculos:

Briketa 1, 2, 3 al 4,5% de asfalto y 0% de filler

Densidad real:

$$\text{Densidad real} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1167,7}{1170 - 648}$$

$$\text{Densidad real} = 2,24 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Donde:

A = Masa de la briqueta al aire (g).

B = Masa de la briqueta al aire superficialmente seca (g).

C = Masa de la briqueta sumergida (g).

Densidad promedio:

$$\text{Densidad promedio} = \frac{2,24 + 2,26 + 2,26}{3}$$

$$\text{Densidad promedio} = 2,25 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Densidad máxima teórica:

$$\text{Densidad máx. teo.} = \frac{100}{\frac{\% \text{ C. A.}}{\text{P. E. C. A.}} + \left(\frac{100 - \% \text{ C. A.}}{\text{P. E. Agregado}} \right)}$$

$$\text{Densidad máx. teo.} = \frac{100}{\frac{4,50}{1,000} + \left(\frac{100 - 4,50}{2,64} \right)}$$

$$\text{Densidad máx. teo.} = 2,46 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Figura 3.19. Peso de briqueta en estado seco



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.58. Resultados de la densidad de la mezcla asfáltica con 0% de filler

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta		
	Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica
	%	%	cm	g.	g.	g.	cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
1	4,50	4,71	6,55	1167,7	1170,0	648	522,0	2,24	2,25	2,46
2			6,58	1192,9	1195,9	667	528,9	2,26		
3			6,59	1189,3	1192,8	666	526,8	2,26		
4	5,00	5,26	6,51	1183,4	1186,2	665	521,2	2,27	2,27	2,44
5			6,48	1186,7	1190,7	669	521,7	2,27		
6			6,50	1193,5	1197,8	671	526,8	2,27		
7	5,50	5,82	6,44	1180,7	1184,2	667	517,2	2,28	2,29	2,42
8			6,49	1190,3	1193,1	672	521,1	2,28		
9			6,52	1192,7	1196,0	675	521,0	2,29		
10	6,00	6,38	6,50	1193,6	1197,5	674	523,5	2,28	2,30	2,40
11			6,47	1195,7	1197,7	678	519,7	2,30		
12			6,47	1189,7	1191,3	677	514,3	2,31		
13	6,50	6,95	6,41	1184,9	1188,1	677	511,1	2,32	2,31	2,39
14			6,41	1182,5	1185,2	672	513,2	2,30		
15			6,41	1180,0	1182,4	671	511,4	2,31		

Fuente: Elaboración propia

3.4.6.3. Determinación de vacíos en la mezcla asfáltica

Con datos como densidad promedio y densidad máxima teórica se calcula el porcentaje de vacíos en la briqueta, los vacíos de agregado mineral y la relación betumen vacíos.

Cálculos:

Briqueta 1, 2, 3 al 4,50% de asfalto y 0% de filler

Porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ vacíos} = \frac{\text{Densidad máx. teo.} - \text{Densidad prom.}}{\text{Densidad máx. teo.}} * 100$$

$$\% \text{ vacíos} = \frac{2,46 - 2,25}{2,46} * 100$$

$$\% \text{ vacíos} = 8,45 \%$$

Porcentaje de vacíos de agregado mineral (V.A.M.):

$$V. A. M. = \% \text{ vacíos} + \frac{\text{Densidad prom.} * \% C. A.}{P. E. C. A.}$$

$$V. A. M. = 8,45 + \frac{2,25 * 4,50}{1,000}$$

$$V. A. M. = 18,57 \%$$

Relación betumen vacíos (R.B.V):

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

$$R. B. V. = \frac{18,57 - 8,45}{18,57} * 100$$

$$R. B. V. = 54,52 \%$$

Tabla 3.59. Resultados de porcentaje de vacíos, V.A.M. y R.B.V. de la mezcla asfáltica

N° de probeta	% de Asfalto		Densidad Briqueta			% de Vacíos		
	Base mezcla	Base agregados	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen/vacíos)
	%	%	g/cm³	g/cm³	g/cm³	%	%	%
1	4,50	4,71	2,24	2,25	2,46	8,4	18,57	54,52
2			2,26					
3			2,26					
4	5,00	5,26	2,27	2,270	2,44	6,92	18,27	61,13
5			2,27					
6			2,27					
7	5,50	5,82	2,28	2,29	2,42	5,59	18,16	69,23
8			2,28					
9			2,29					
10	6,00	6,38	2,28	2,30	2,40	4,35	18,14	76,00
11			2,30					
12			2,31					
13	6,50	6,95	2,32	2,31	2,39	3,14	18,15	82,71
14			2,30					
15			2,31					

Fuente: Elaboración propia

3.4.6.4. Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall

Se debe medir la altura de la briqueta en 4 puntos y determinar un promedio, para realizar la corrección de la carga de estabilidad. Después se sumerge la briqueta en baño maría a $60 \pm 5^\circ\text{C}$, durante 30 a 40 minutos.

Figura 3.20. Medición y baño maría a 60°C de briquetas



Fuente: Elaboración propia

Luego del baño maría se seca la briqueta y se envuelve con un papel de forma perimetral para que no se adhiera a la mordaza del equipo Marshall.

Verificar la aguja de medición de estabilidad y flujo que se encuentra para realizar la medición.

Se aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm por minuto (2"/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).

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.

Figura 3.21. Rotura de briquetas



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22 Rotura de briquetas de prediseño



Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

$$\text{Carga} = (0,012 * \text{Lec} - 0,0812) * 102 * 2,20$$

$$\text{Carga} = (0,012 * 741 - 0,0812) * 102 * 2,20$$

$$\text{Carga} = 1977,14 \text{ (lb)}$$

$$\text{Carga corregida} = \text{carga} * \text{factor de corrección}$$

$$\text{Carga corregida} = 1977,14 * 0,95$$

$$\text{Carga corregida} = 1878,29 \text{ (lb)}$$

Promedio de las 3 briquetas corregidas:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Est}_1 + \text{Est}_2 + \text{Est}_3}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{1878,29 + 2638,06 + 2804,34}{3}$$

$$\text{Promedio} = 2440,23 \text{ (lb)}$$

Tabla 3.60. Resultados de la estabilidad y fluencia de la mezcla con 0% de filler

N° de probeta	% de Asfalto		Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base mezcla	Base agregados	Lectura dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%	mm	libras	-	Libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4,50	4,71	741	1977,14	0,95	1878,29	2440,23	18	13,67
2			1038	2776,91	0,95	2638,06		13	
3			1103	2951,94	0,95	2804,34		10	
4	5,00	5,26	1004	2685,35	0,96	2577,94	2677,31	12	11,00
5			998	2669,19	0,97	2589,12		10	
6			1115	2984,25	0,96	2864,88		11	
7	5,50	5,82	1029	2752,67	0,98	2697,62	2816,08	11	10,00
8			1069	2860,38	0,97	2774,57		9	
9			1158	3100,04	0,96	2976,04		10	
10	6,00	6,38	1019	2725,74	0,96	2616,71	2817,72	9	9,67
11			1110	2970,79	0,97	2881,66		8	
12			1138	3046,19	0,97	2954,80		12	
13	6,50	6,95	1123	3005,79	0,99	2975,74	2631,84	11	11,00
14			916	2448,38	0,99	2423,90		11	
15			943	2521,09	0,99	2495,88		11	
ESPECIFICACIONES							1800		8
							-		14

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se observa los datos y resultados obtenidos de las diferentes combinaciones de mezclas asfálticas.

Tabla 3.61. Resultados de densidad y vacíos Marshall para 2% de ceniza orgánica

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
	Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen/vacíos)
	%	%					cm						
1	4,50	4,71	6,55	1197,1	1201,8	680	521,8	2,29	2,28	2,46	7,20	17,48	58,81
2			6,51	1187,3	1193,8	673	520,8	2,28					
3			6,43	1177,9	1181,5	665	516,5	2,28					
4	5,00	5,26	6,50	1192,5	1195,9	675	520,9	2,29	2,30	2,44	5,88	17,37	65,19
5			6,47	1186,4	1189,5	676	513,5	2,31					
6			6,40	1195,5	1197,8	678	519,8	2,30					
7	5,50	5,82	6,41	1187,2	1190,8	680	510,8	2,32	2,32	2,43	4,51	17,25	73,83
8			6,52	1198,3	1202,4	684	518,4	2,31					
9			6,42	1195,2	1198,2	681	517,2	2,31					
10	6,00	6,38	6,33	1186,8	1189,5	681	508,5	2,33	2,33	2,41	3,16	17,15	81,57
11			6,39	1187,4	1189,9	683	506,9	2,34					
12			6,29	1190,2	1193,9	680	513,9	2,32					
13	6,50	6,95	6,28	1183,2	1185,3	682	503,3	2,35	2,34	2,39	1,89	17,12	88,57
14			6,27	1180,6	1182,5	680	502,5	2,35					
15			6,33	1179,9	1182,1	676	506,1	2,33					
ESPECIFICACIONES				Mínimo							3	13	65
				Máximo							5	-	75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.62. Resultados de estabilidad y fluencia Marshall para 2% de ceniza orgánica

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base mezcla	Base agregados		Lectura dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		cm	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg
1	4,50	4,71	6,55	1250	3347,78	0,95	3180,39	2930,25	12	11,00
2			6,51	1059	2833,45	0,96	2720,12		10	
3			6,43	1102	2949,24	0,98	2890,26		11	
4	5,00	5,26	6,50	1146	3067,73	0,96	2945,02	3017,80	11	10,67
5			6,47	1152	3083,88	0,97	2991,37		10	
6			6,40	1176	3148,51	0,99	3117,03		11	
7	5,50	5,82	6,41	1225	3280,46	0,99	3247,65	3032,80	10	10,67
8			6,52	1153	3086,58	0,96	2963,11		11	
9			6,42	1101	2946,55	0,98	2887,62		11	
10	6,00	6,38	6,33	1112	2976,17	1,01	3005,93	3008,45	10	10,67
11			6,39	1092	2922,32	0,99	2893,09		11	
12			6,29	1145	3065,03	1,02	3126,34		11	
13	6,50	6,95	6,28	1063	2844,23	1,02	2898,27	2895,28	11	11,00
14			6,27	1082	2895,39	1,02	2956,19		10	
15			6,33	1053	2817,30	1,01	2831,38		12	
ESPECIFICACIONES								1800		8
								-		14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.63. Resultados de densidad y vacíos Marshall para 3% de ceniza orgánica

N° de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
	Base mezcla	Base agregados	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen/vacíos)
	%	%	g.	g.	g.	cm³	g/cm³	g/cm³	g/cm³	%	%	%
1	4,50	4,71	1197,1	1202,0	685	517,0	2,32	2,31	2,46	6,43	16,80	61,75
2			1190,2	1193,9	677	516,9	2,30					
3			1196,0	1199,0	679	520,0	2,30					
4	5,00	5,26	1194,8	1197,4	684	513,4	2,33	2,33	2,45	4,62	16,28	71,63
5			1194,1	1196,8	687	509,8	2,34					
6			1192,4	1197,1	685	512,1	2,33					
7	5,50	5,82	1196,5	1198,5	691	507,5	2,36	2,35	2,43	3,20	16,13	80,13
8			1188,1	1191,1	684	507,1	2,34					
9			1192,4	1194,9	687	507,9	2,35					
10	6,00	6,38	1193,0	1194,2	689	505,2	2,36	2,355	2,41	2,26	16,39	86,22
11			1192,9	1194,7	687	507,7	2,35					
12			1197,8	1199,1	690	509,1	2,35					
13	6,50	6,95	1197,7	1198,6	692	506,6	2,36	2,343	2,39	2,01	17,24	88,34
14			1192,7	1194,6	681	513,6	2,32					
15			1195,0	1196,1	686	510,1	2,34					
ESPECIFICACIONES			Mínimo							3	13	65
			Máximo							5	-	75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.64. Resultados de estabilidad y fluencia Marshall para 3% de ceniza orgánica

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base mezcla	Base agregados		Lectura dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		cm	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg
1	4,50	4,71	6,40	1368	3665,53	0,99	3621,54	3643,83	9	10,00
2			6,36	1403	3759,78	1,00	3752,26		11	
3			6,34	1324	3547,05	1,00	3557,69		10	
4	5,00	5,26	6,33	1383	3705,92	1,01	3724,45	3949,18	11	10,67
5			6,32	1580	4236,40	1,01	4270,29		10	
6			6,39	1452	3891,72	0,99	3852,81		11	
7	5,50	5,82	6,35	1618	4338,73	1,00	4338,73	4073,26	11	11,33
8			6,34	1472	3945,58	1,00	3957,42		11	
9			6,31	1448	3880,95	1,01	3923,64		12	
10	6,00	6,38	6,27	1287	3447,41	1,02	3519,81	3645,96	13	12,33
11			6,33	1260	3374,71	1,01	3391,58		12	
12			6,26	1467	3932,12	1,02	4026,49		12	
13	6,50	6,95	6,30	1006	2690,74	1,01	2725,72	2972,26	14	13,67
14			6,35	1143	3059,65	1,00	3059,65		13	
15			6,31	1157	3097,35	1,01	3131,42		14	
ESPECIFICACIONES								1800		8
								-		14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.65. Resultados de densidad y vacíos Marshall para 3,50% de ceniza orgánica

N° de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
	Base mezcla	Base agregados	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen/vacíos)
1	4,50	4,71	1188,0	1190,6	675	515,6	2,30	2,31	2,47	6,46	16,84	61,62
2			1185,5	1187,9	680	507,9	2,33					
3			1187,1	1191,6	671	520,6	2,28					
4	5,00	5,26	1188,8	1192,8	681	511,8	2,32	2,33	2,45	4,81	16,45	70,79
5			1192,5	1195,6	684	511,6	2,33					
6			1189,8	1192,8	683	509,8	2,33					
7	5,50	5,82	1196,9	1199,4	688	511,4	2,34	2,35	2,43	3,13	16,07	80,52
8			1188,5	1191,3	687	504,3	2,36					
9			1186,9	1190,0	687	503,0	2,36					
10	6,00	6,38	1189,3	1190,7	685	505,7	2,35	2,361	2,41	2,06	16,22	87,33
11			1185,7	1188,6	689	499,6	2,37					
12			1188,4	1191,3	687	504,3	2,36					
13	6,50	6,95	1185,3	1186,1	681	505,1	2,35	2,349	2,39	1,80	17,07	89,48
14			1188,4	1189,7	685	504,7	2,35					
15			1188,8	1189,7	683	506,7	2,35					
ESPECIFICACIONES			Mínimo							3	13	65
			Máximo							5	-	75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.66. Resultados de estabilidad y fluencia para 3,5% de ceniza orgánica

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base mezcla	Base agregados		Lectura dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		cm	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg
1	4,50	4,71	6,41	1458	3907,88	0,99	3849,26	3855,82	12	11,67
2			6,37	1524	4085,61	1,00	4065,18		12	
3			6,46	1401	3754,39	0,97	3653,02		11	
4	5,00	5,26	6,44	1593	4271,41	0,98	4177,44	4350,07	11	11,33
5			6,40	1691	4535,30	0,99	4480,88		11	
6			6,46	1683	4513,76	0,97	4391,89		12	
7	5,50	5,82	6,37	1752	4699,56	1,00	4676,07	4669,69	12	12,00
8			6,42	1711	4589,16	0,98	4511,14		13	
9			6,36	1801	4831,51	1,00	4821,85		11	
10	6,00	6,38	6,32	1373	3678,99	1,01	3708,43	4017,59	13	12,67
11			6,29	1567	4201,40	1,02	4268,62		12	
12			6,38	1531	4104,46	0,99	4075,72		13	
13	6,50	6,95	6,33	1184	3170,05	1,01	3185,90	3318,03	15	14,00
14			6,31	1395	3738,23	1,01	3779,36		14	
15			6,28	1096	2933,09	1,02	2988,82		13	
ESPECIFICACIONES								1800		8
								-		14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.67. Resultados de densidad y vacíos Marshall para 4% de ceniza orgánica

N° de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
	Base mezcla	Base agregados	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V.
	%	%	g.	g.	g.	cm³	g/cm³	g/cm³	g/cm³	%	%	%
1	4,50	4,71	1182,7	1187,8	676	511,8	2,31	2,30	2,47	6,69	17,05	60,76
2			1201,5	1207,3	682	525,3	2,29					
3			1194,1	1200,6	683	517,6	2,31					
4	5,00	5,26	1195,1	1198,2	685	513,2	2,33	2,34	2,45	4,28	16,00	73,24
5			1190,3	1194,0	689	505,0	2,36					
6			1196,4	1199,5	689	510,5	2,34					
7	5,50	5,82	1198,4	1199,4	697	502,4	2,39	2,37	2,43	2,38	15,42	84,57
8			1199,1	1201,0	695	506,0	2,37					
9			1194,9	1196,4	690	506,4	2,36					
10	6,00	6,38	1192,5	1196,2	692	504,2	2,37	2,38	2,41	1,45	15,71	90,74
11			1192,7	1195,9	695	500,9	2,38					
12			1193,6	1196,1	695	501,1	2,38					
13	6,50	6,95	1195,8	1197,0	691	506,0	2,36	2,37	2,39	1,01	16,41	93,83
14			1197,5	1198,1	695	503,1	2,38					
15			1186,9	1188,2	686	502,2	2,36					
ESPECIFICACIONES			Mínimo							3	13	65
			Máximo							5	-	75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.68. Resultados de estabilidad y fluencia Marshall para 4% de ceniza orgánica

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base mezcla	Base agregados		Lectura dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
%	%	cm	mm	libras	-	libras	Libras	0,01 pulg	0,01 pulg	
1	4,50	4,71	6,54	1453	3894,42	0,95	3699,70	3989,66	11	13,33
2			6,62	1381	3700,54	0,94	3478,50		15	
3			6,50	1860	4990,39	0,96	4790,77		14	
4	5,00	5,26	6,49	1868	5011,93	0,97	4836,51	4676,25	15	13,67
5			6,52	1821	4885,37	0,96	4680,18		14	
6			6,55	1765	4734,57	0,95	4512,05		12	
7	5,50	5,82	6,30	1497	4012,90	1,01	4053,03	4903,66	14	14,00
8			6,35	1998	5361,99	1,00	5361,99		13	
9			6,31	1954	5243,51	1,01	5295,95		15	
10	6,00	6,38	6,32	1654	4435,67	1,01	4471,16	4495,47	15	14,67
11			6,30	1865	5003,85	1,01	5068,90		15	
12			6,33	1465	3926,73	1,01	3946,36		14	
13	6,50	6,95	6,27	1250	3347,78	1,02	3411,39	3403,00	16	15,67
14			6,29	1276	3417,79	1,02	3489,57		17	
15			6,21	1188	3180,83	1,04	3308,06		14	
ESPECIFICACIONES								1800		8
								-		14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.69. Resultados de densidad y vacíos Marshall para 6% de ceniza orgánica

N° de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos		
	Base mezcla	Base agregados	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V.
	1	4,50	4,71	1203,4	1206,7	693	513,7	2,34	2,33	2,47	5,85	16,32
2	1192,5			1199,7	685	514,7	2,32					
3	1188,5			1192,1	680	512,1	2,32					
4	5,00	5,26	1195,3	1197,2	688	509,2	2,35	2,363	2,45	3,66	15,47	76,34
5			1191,2	1193,4	691	502,4	2,37					
6			1189,4	1192,0	690	502,0	2,37					
7	5,50	5,82	1194,3	1196,2	694	502,2	2,38	2,39	2,43	1,94	15,07	87,11
8			1191,3	1193,8	695	498,8	2,39					
9			1198,9	1201,0	700	501,0	2,39					
10	6,00	6,38	1190,5	1192,1	695	497,1	2,39	2,39	2,42	0,85	15,22	94,43
11			1193,5	1195,2	696	499,2	2,39					
12			1194,8	1196,0	698	498,0	2,40					
13	6,50	6,95	1192,3	1193,0	693	500,0	2,38	2,38	2,40	0,66	16,14	95,89
14			1195,8	1196,7	695	501,7	2,38					
15			1193,4	1194,2	692	502,2	2,38					
ESPECIFICACIONES			Mínimo							3	13	65
			Máximo							5	-	75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.70. Resultados de estabilidad y fluencia Marshall para 6% de ceniza orgánica

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base mezcla	Base agregados		Lectura dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		cm	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg
1	4,50	4,71	6,45	2182	5857,47	0,98	5740,32	5354,36	14	14,00
2			6,50	1857	4982,31	0,96	4783,02		16	
3			6,42	2106	5652,82	0,98	5539,76		12	
4	5,00	5,26	6,48	1807	4847,67	0,97	4692,54	4753,36	14	15,00
5			6,41	1756	4710,34	0,99	4639,68		15	
6			6,40	1859	4987,69	0,99	4927,84		16	
7	5,50	5,82	6,32	1572	4214,86	1,01	4257,01	4070,58	14	16,67
8			6,31	1468	3934,81	1,01	3974,16		18	
9			6,34	1485	3980,59	1,00	3980,59		18	
10	6,00	6,38	6,31	1258	3369,32	1,01	3406,38	3441,81	17	18,00
11			6,35	1182	3164,67	1,00	3164,67		19	
12			6,28	1375	3684,38	1,02	3754,38		18	
13	6,50	6,95	6,19	1131	3027,34	1,04	3148,43	2984,46	20	19,00
14			6,29	1085	2903,47	1,02	2961,54		17	
15			6,26	1042	2787,68	1,02	2843,43		20	
ESPECIFICACIONES								1800		8
								-		14

Fuente: Elaboración propia

3.4.7. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 0% de ceniza orgánica

Una vez determinados todos los parámetros mediante la metodología Marshall, se procede a graficar las curvas de diseño.

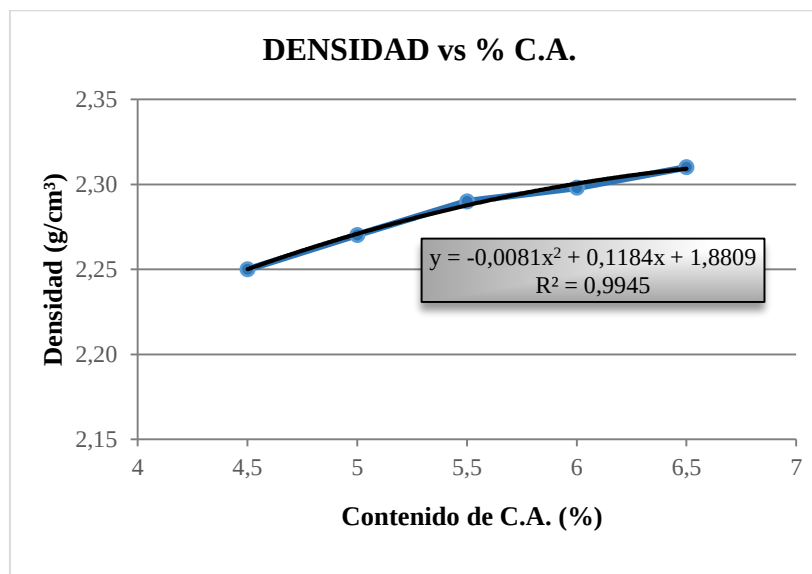
Tabla 3.71. Resultados de la mezcla con 0% de ceniza orgánica

Porcentaje de cemento asfáltico	Densidad promedio (g/cm ³)	Vacíos en la mezcla (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos)(%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
4,5	2,25	8,45	18,57	54,52	2440,23	13,67
5,0	2,27	6,92	18,27	61,13	2677,31	11,00
5,5	2,29	5,59	18,16	69,23	2816,08	10,00
6,0	2,30	4,35	18,14	76,00	2817,72	9,67
6,5	2,31	3,14	18,15	82,71	2631,84	11,00

Fuente: Elaboración propia

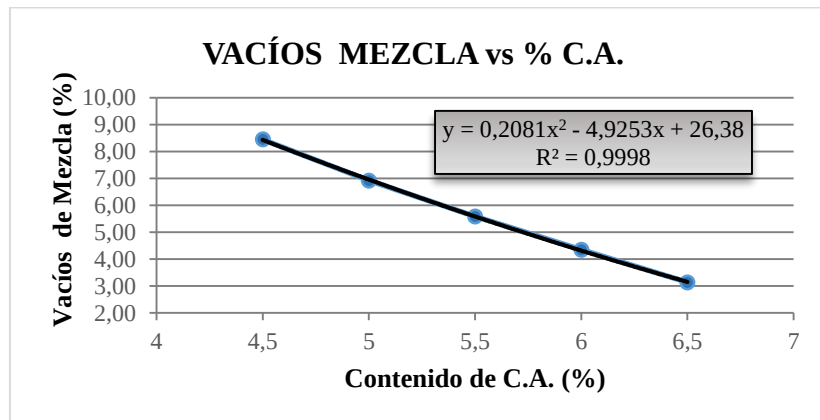
A continuación, se observa los gráficos de curvas de diseño para determinar el porcentaje óptimo de asfalto.

Gráfico 3.13. Curvas Densidad vs % C.A. de la mezcla al 0% de ceniza orgánica



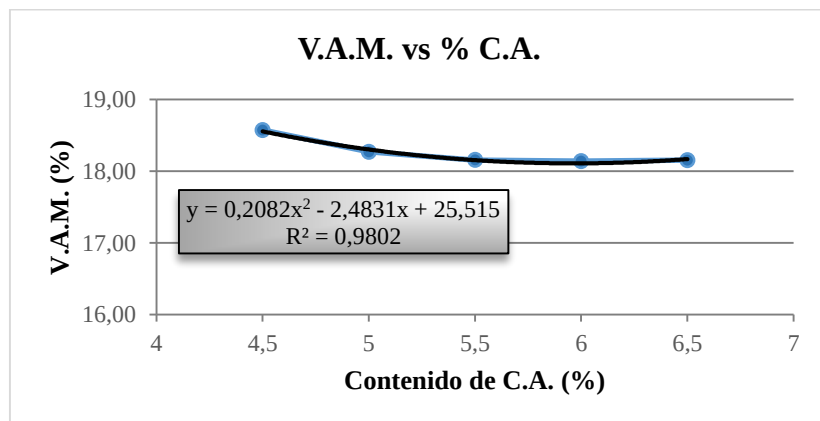
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.14. Curva Vacíos vs % C.A. de la mezcla al 0% de ceniza orgánica



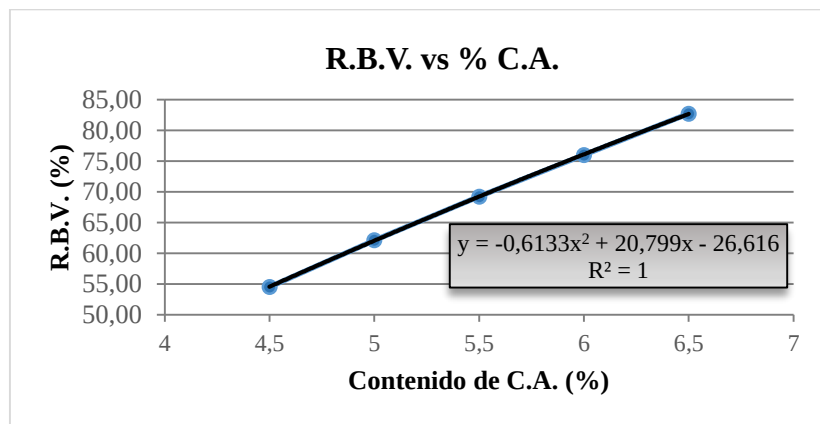
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.15. Curva V.A.M. vs % C.A. de la mezcla al 0% de ceniza orgánica

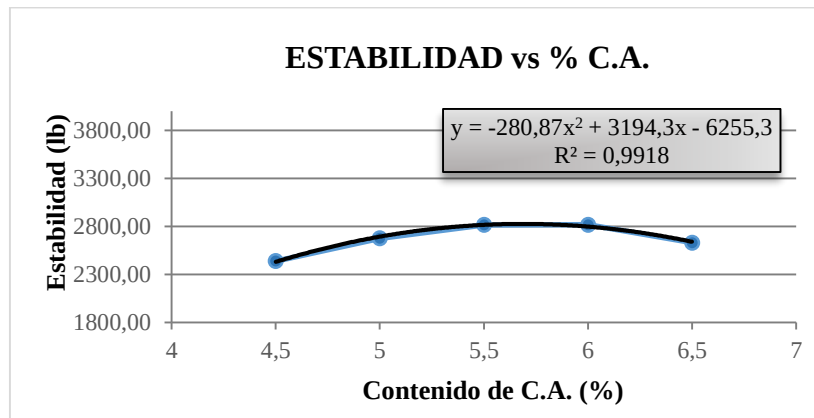


Fuente: Elaboración propia

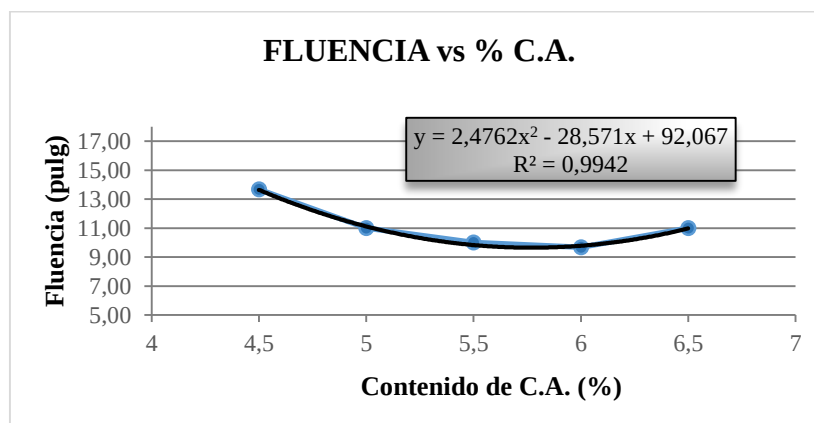
Gráfico 3.16. Curva R.B.V. vs % C.A. de la mezcla al 0% de ceniza orgánica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.17. Curva Estabilidad vs % C.A. de la mezcla al 0% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.18. Curva Fluencia vs % C.A. de la mezcla al 0% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo las ecuaciones de las curvas de los gráficos, se determina el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 0% de ceniza orgánica, considerando los siguientes parámetros de acuerdo al método Marshall:

Tabla 3.72. Porcentaje óptimo de C.A. de la mezcla con 0% de ceniza orgánica

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad máxima (lb)	2826,72	5,67
	Densidad máxima (g/cm³)	2,31	6,50
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	6,13
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%)=	6,10

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico es 6,10 % para una mezcla asfáltica con 0% de ceniza orgánica.

3.4.8. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 2% de ceniza orgánica

Una vez determinados todos los parámetros mediante la metodología Marshall, se procede a graficar las curvas de diseño.

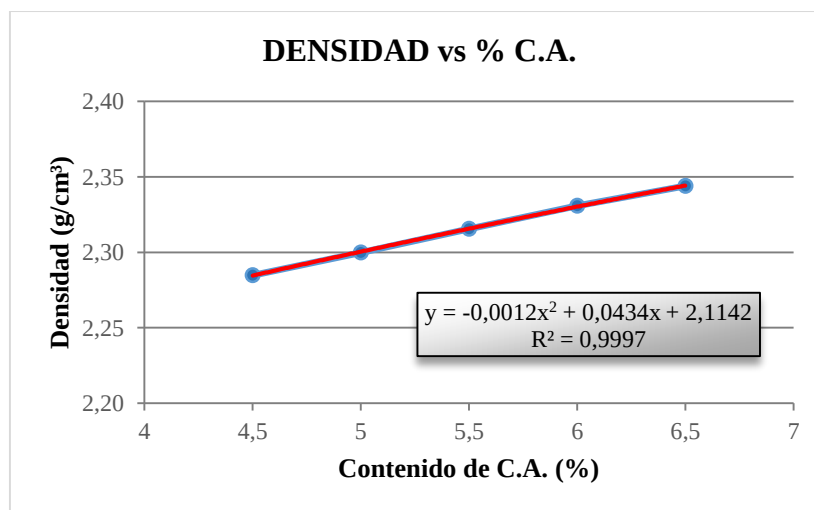
Tabla 3.73. Resultados de la mezcla con 2% de ceniza orgánica

Porcentaje de cemento asfáltico	Densidad promedio (g/cm ³)	Vacíos en la mezcla (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos)(%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
4,5	2,28	7,20	17,48	58,81	2930,25	11,00
5,0	2,30	5,88	17,37	66,19	3017,80	10,67
5,5	2,32	4,51	17,25	73,83	3032,80	10,67
6,0	2,33	3,16	17,15	81,57	3008,45	10,67
6,5	2,34	1,89	17,12	88,98	2895,28	11,00

Fuente: Elaboración propia

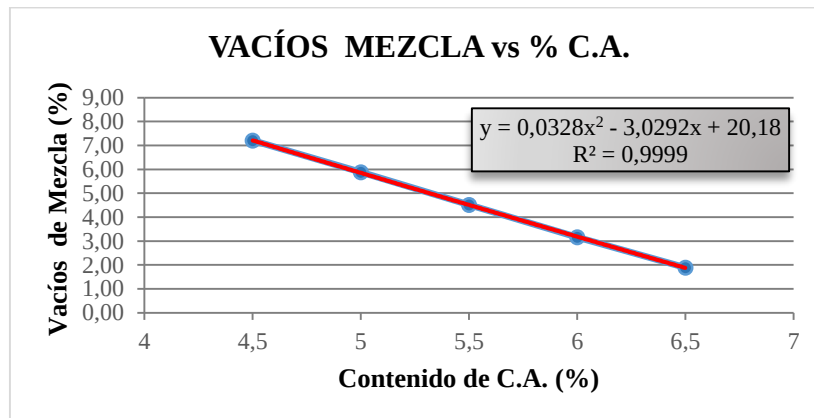
A continuación, se observa los gráficos de curvas de diseño para determinar el porcentaje óptimo de asfalto.

Gráfico 3.19. Curvas Densidad vs % C.A. de la mezcla al 2% de ceniza orgánica



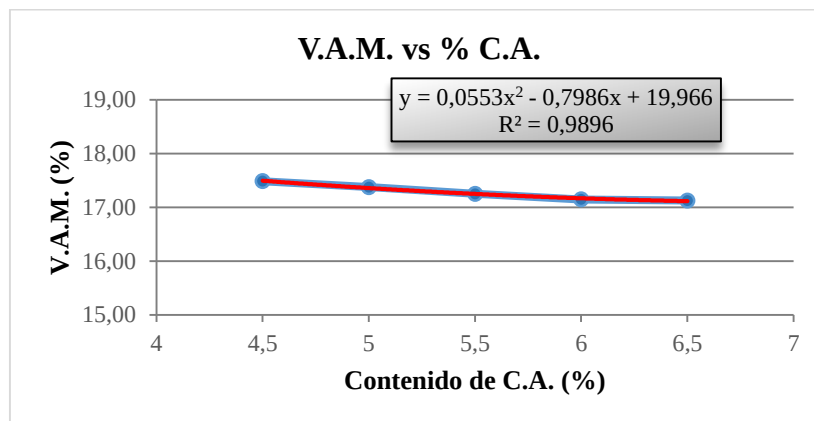
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.20. Curva Vacíos vs % C.A. de la mezcla al 2% de ceniza orgánica



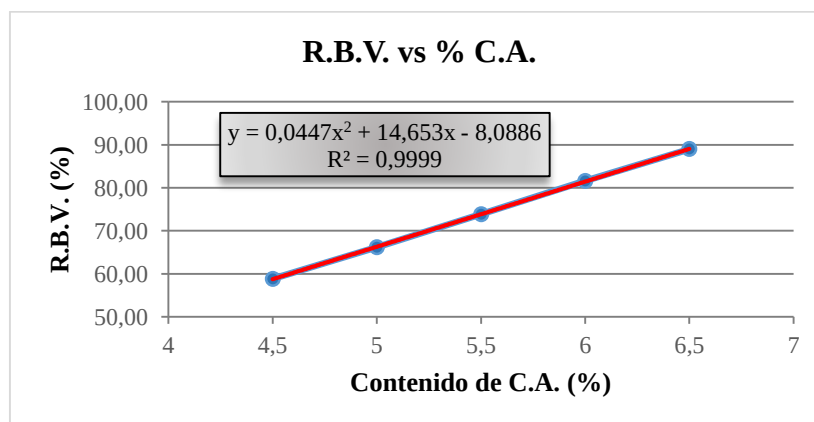
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.21. Curva V.A.M. vs % C.A. de la mezcla al 2% de ceniza orgánica

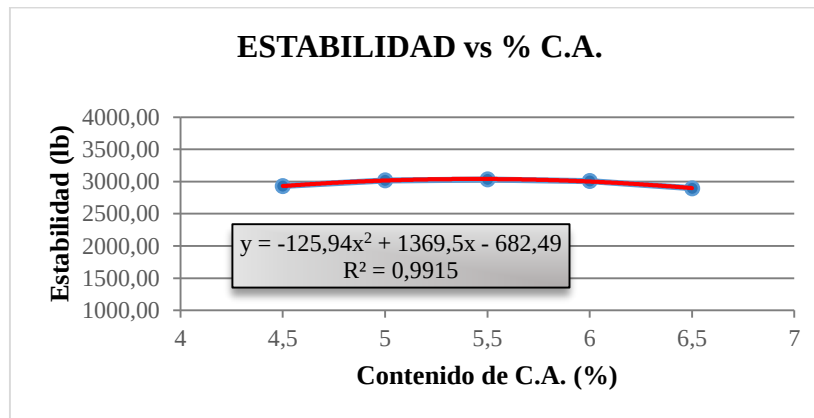


Fuente: Elaboración propia

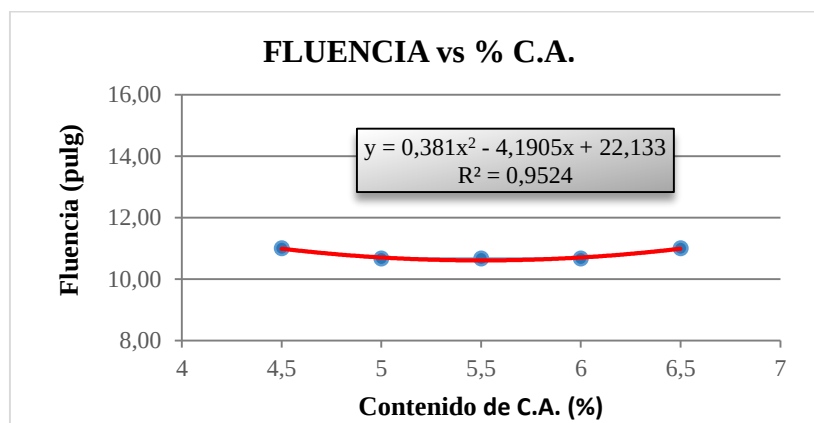
Gráfico 3.22. Curva R.B.V. vs % C.A. de la mezcla al 2% de ceniza orgánica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.23. Curva Estabilidad vs % C.A. de la mezcla al 2% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.24. Curva Fluencia vs % C.A. de la mezcla al 2% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo las ecuaciones de las curvas de los gráficos, se determina el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 2% de ceniza orgánica, considerando los siguientes parámetros de acuerdo al método Marshall:

Tabla 3.74. Porcentaje óptimo de C.A. de la mezcla con 2% de ceniza orgánica

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad máxima (lb)	3188,74	5,57
	Densidad máxima (g/cm³)	2,35	6,50
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,69
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%)=	5,92

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico es 5,92 % para una mezcla asfáltica con 2% de ceniza orgánica.

3.4.9. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 3% de ceniza orgánica

Una vez determinados todos los parámetros mediante la metodología Marshall, se procede a graficar las curvas de diseño.

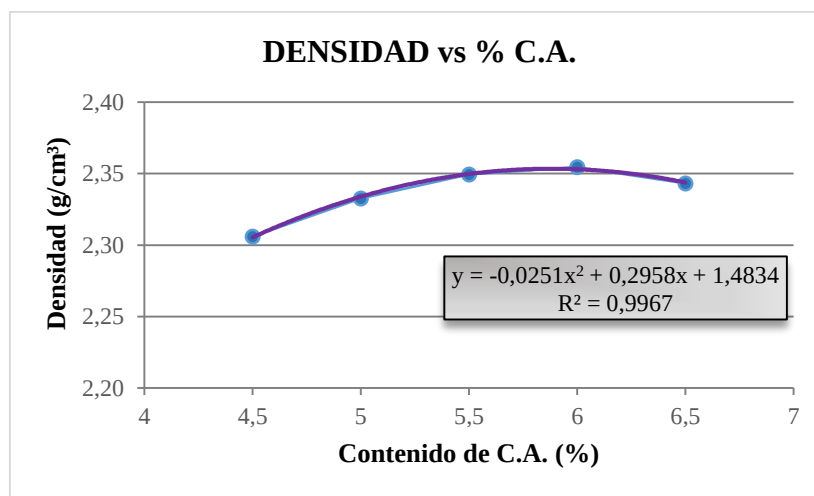
Tabla 3.75. Resultados de la mezcla con 3% de ceniza orgánica

Porcentaje de cemento asfáltico	Densidad promedio (g/cm ³)	Vacíos en la mezcla (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos)(%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
4,5	2,31	6,43	16,80	61,75	3643,83	10,00
5,0	2,33	4,62	16,28	71,63	3949,18	10,67
5,5	2,35	3,20	16,13	80,13	4073,26	11,33
6,0	2,35	2,26	16,39	86,22	3645,96	12,33
6,5	2,34	2,01	17,24	88,34	2972,26	13,67

Fuente: Elaboración propia

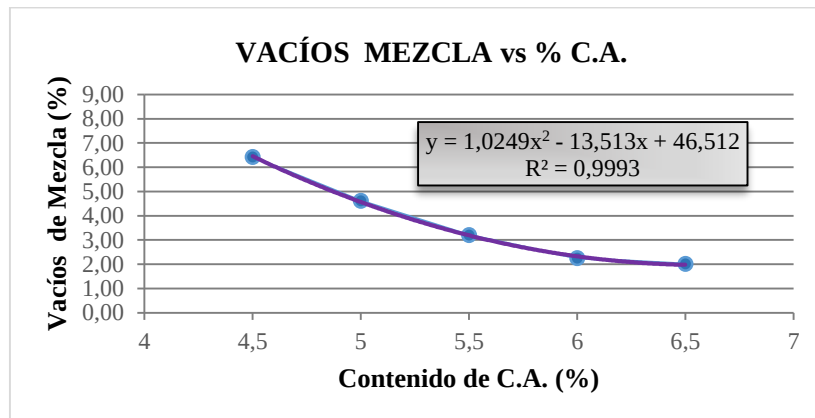
A continuación, se observa los gráficos de curvas de diseño para determinar el porcentaje óptimo de asfalto.

Gráfico 3.25. Curva Densidad vs % C.A. de la mezcla al 3% de ceniza orgánica



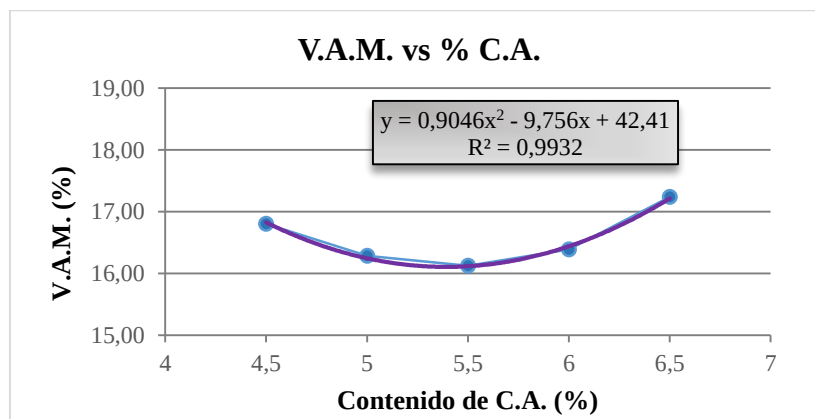
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.26. Curva Vacíos vs % C.A. de la mezcla al 3% de ceniza orgánica



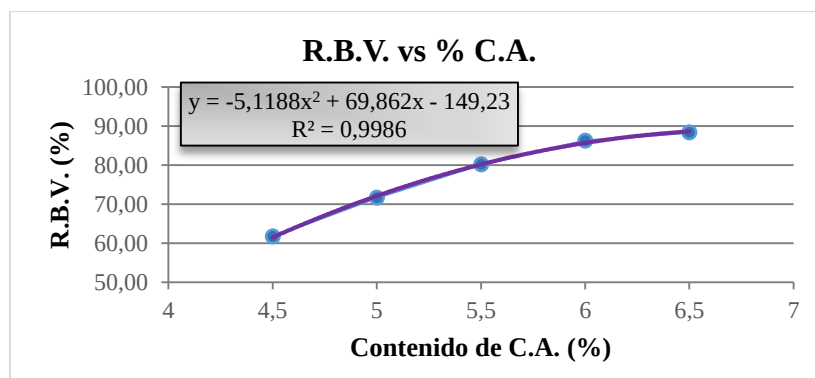
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.27. Curva V.A.M. vs % C.A. de la mezcla al 3% de ceniza orgánica

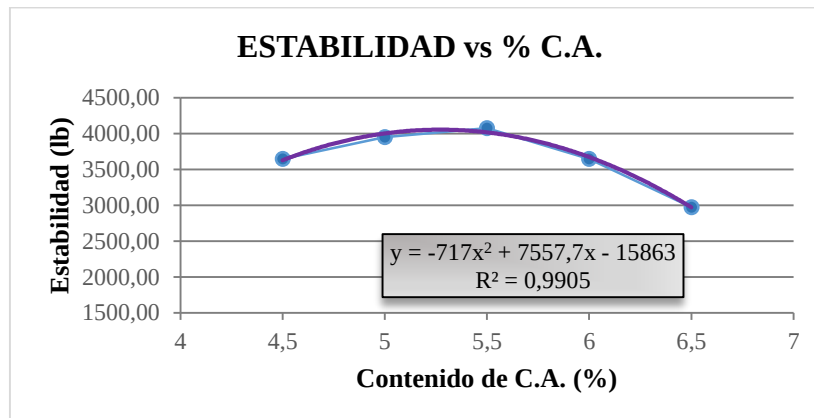


Fuente: Elaboración propia

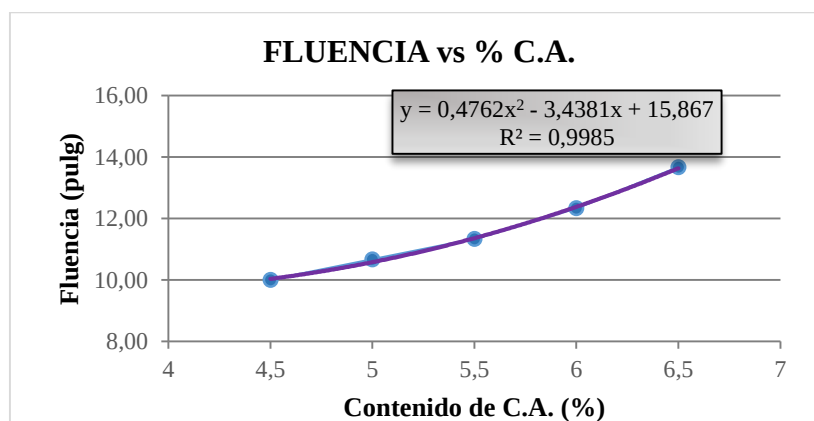
Gráfico 3.28. Curva R.B.V. vs % C.A. de la mezcla al 3% de ceniza orgánica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.29. Curva Estabilidad vs % C.A. de la mezcla al 3% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.30. Curva Fluencia vs % C.A. de la mezcla al 3% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo las ecuaciones de las curvas de los gráficos, se determina el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 4% de ceniza orgánica, considerando los siguientes parámetros de acuerdo al método Marshall:

Tabla 3.76. Porcentaje óptimo de C.A. de la mezcla con 3% de ceniza orgánica

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad máxima (lb)	4015,10	5,50
	Densidad máxima (g/cm³)	2,35	6,00
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,19
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,56

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico es 5,56 % para una mezcla asfáltica con 3% de ceniza orgánica

3.4.10. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 3,5% de ceniza orgánica

Una vez determinados todos los parámetros mediante la metodología Marshall, se procede a graficar las curvas de diseño.

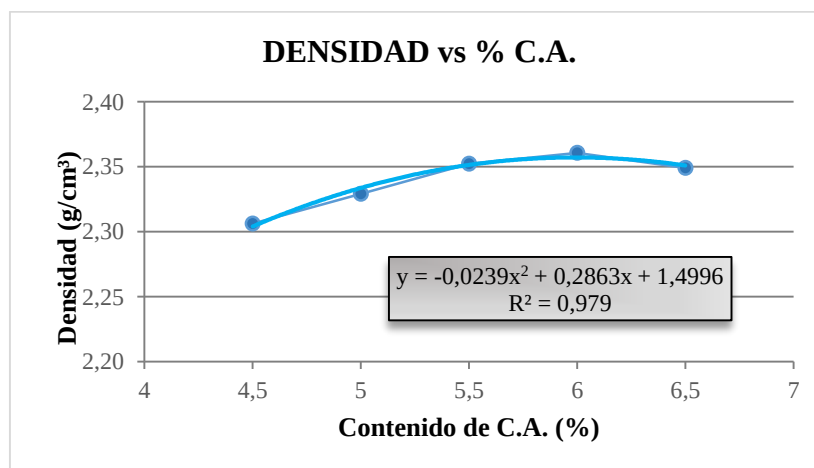
Tabla 3.77. Resultados de la mezcla con 3,5% de ceniza orgánica

Porcentaje de cemento asfáltico	Densidad promedio (g/cm ³)	Vacíos en la mezcla (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos)(%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
4,5	2,31	6,46	16,84	61,62	3855,82	11,67
5,0	2,33	4,81	16,45	70,79	4350,07	11,33
5,5	2,35	3,13	16,07	80,52	4669,69	12,00
6,0	2,36	2,06	16,22	87,33	4017,59	12,67
6,5	2,35	1,80	17,07	89,48	3318,03	14,00

Fuente: Elaboración propia

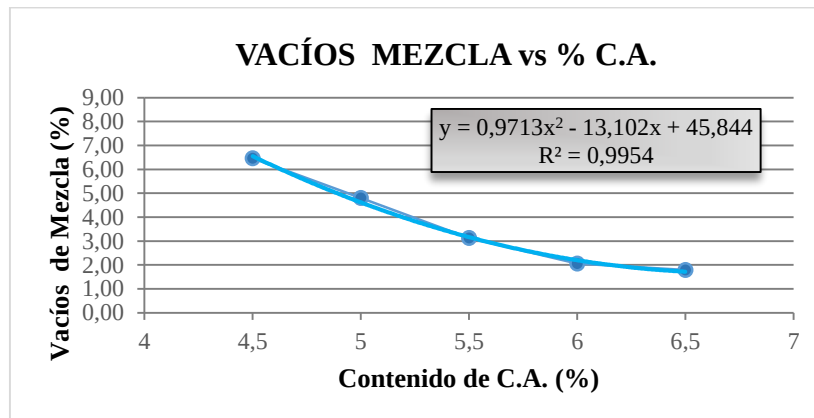
A continuación, se observa los gráficos de curvas de diseño para determinar el porcentaje óptimo de asfalto.

Gráfico 3.31. Curva Densidad vs % C.A. de la mezcla al 3,5% de ceniza orgánica



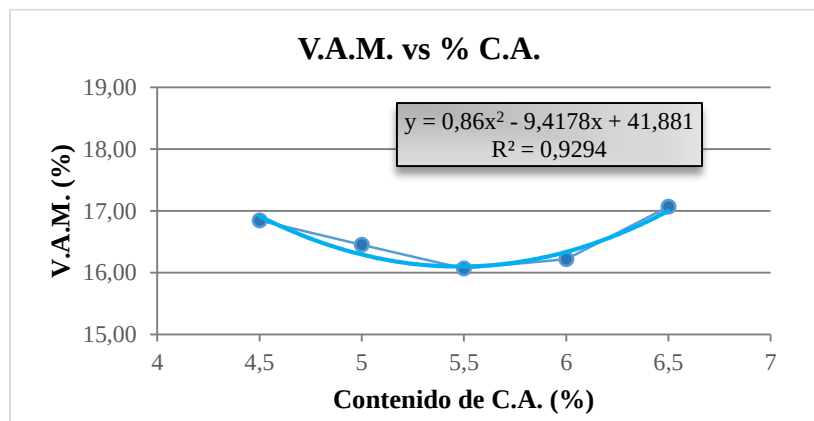
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.32. Curva Vacíos vs % C.A. de la mezcla al 3,5% de ceniza orgánica



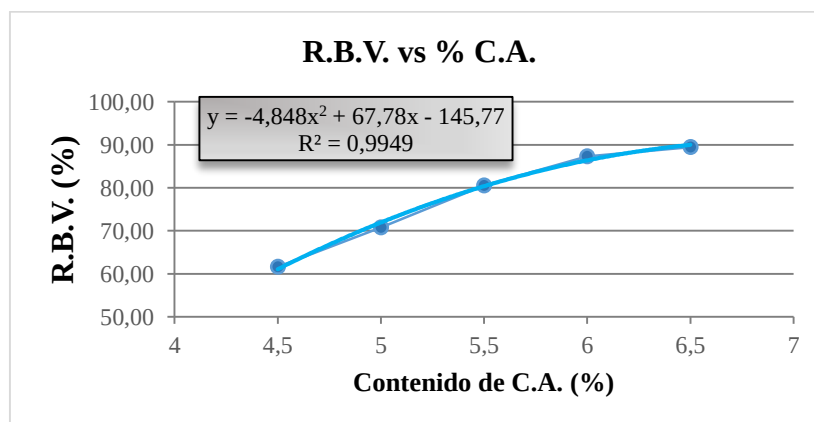
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.33. Curva V.A.M. vs % C.A. de la mezcla al 3,5% de ceniza orgánica

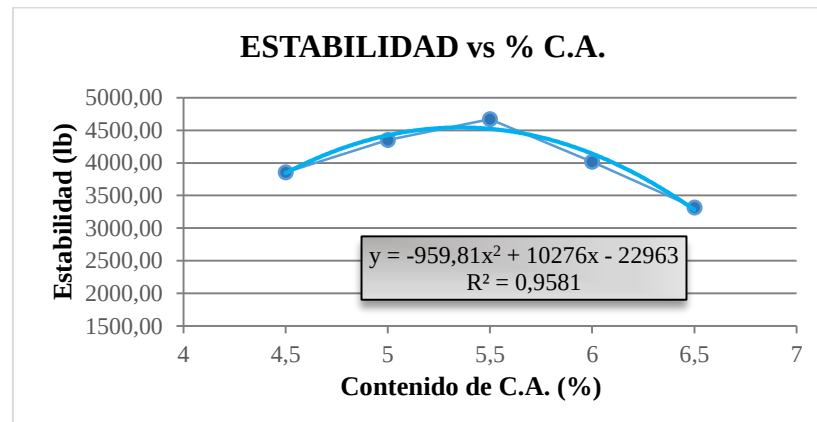


Fuente: Elaboración propia

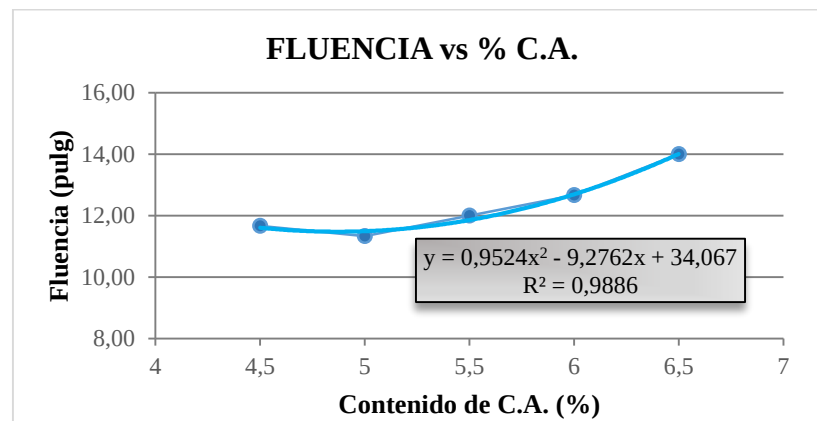
Gráfico 3.34. Curva R.B.V. vs % C.A. de la mezcla al 3,5% de ceniza orgánica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.35. Curva Estabilidad vs % C.A. de la mezcla al 3,5% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.36. Curva Fluencia vs % C.A. de la mezcla al 3,5% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo las ecuaciones de las curvas de los gráficos, se determina el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 4% de ceniza orgánica, considerando los siguientes parámetros de acuerdo al método Marshall:

Tabla 3.78. Porcentaje óptimo de C.A. de la mezcla con 3,5% de ceniza orgánica

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad máxima (lb)	4532,44	5,45
	Densidad máxima (g/cm³)	2,36	5,95
	Vacíos de la mezcla (%)	4,0	5,20
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,53

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico es 5,53 % para una mezcla asfáltica con 3,5% de ceniza orgánica

3.4.11. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 4% de ceniza orgánica

Una vez determinados todos los parámetros mediante la metodología Marshall, se procede a graficar las curvas de diseño.

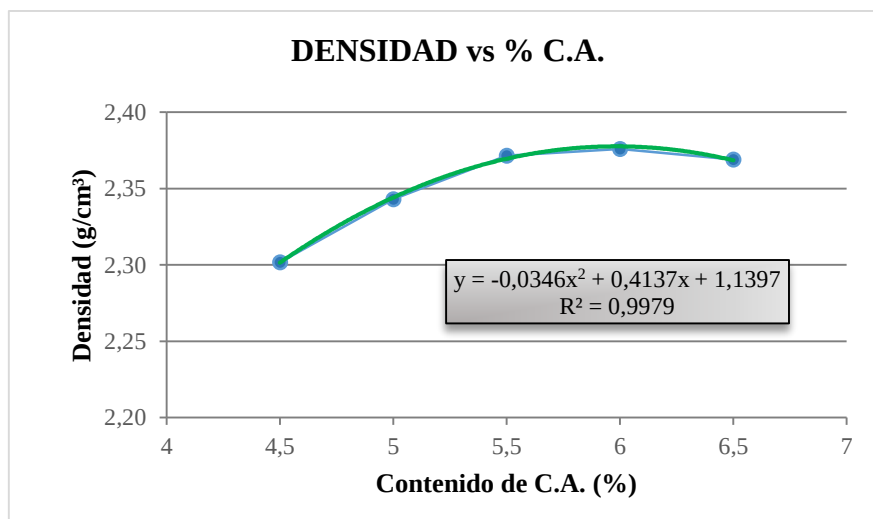
Tabla 3.79. Resultados de la mezcla con 4% de ceniza orgánica

Porcentaje de cemento asfáltico	Densidad promedio (g/cm ³)	Vacíos en la mezcla (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos)(%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
4,5	2,30	6,69	17,05	60,76	3989,66	13,33
5,0	2,34	4,28	16,00	73,24	4676,25	13,67
5,5	2,37	2,38	15,42	84,57	4903,66	14,00
6,0	2,38	1,45	15,71	90,74	4495,47	14,67
6,5	2,37	1,01	16,41	93,83	3403,00	15,67

Fuente: Elaboración propia

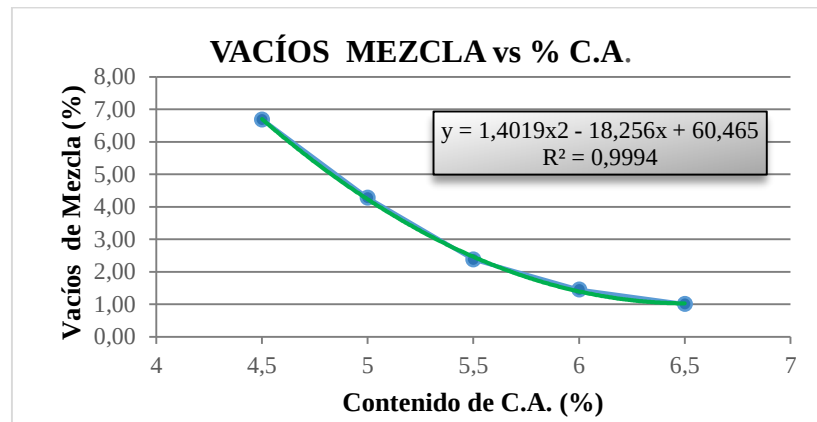
A continuación, se observa los gráficos de curvas de diseño para determinar el porcentaje óptimo de asfalto.

Gráfico 3.37. Curva Densidad vs % C.A. de la mezcla al 4% de ceniza orgánica



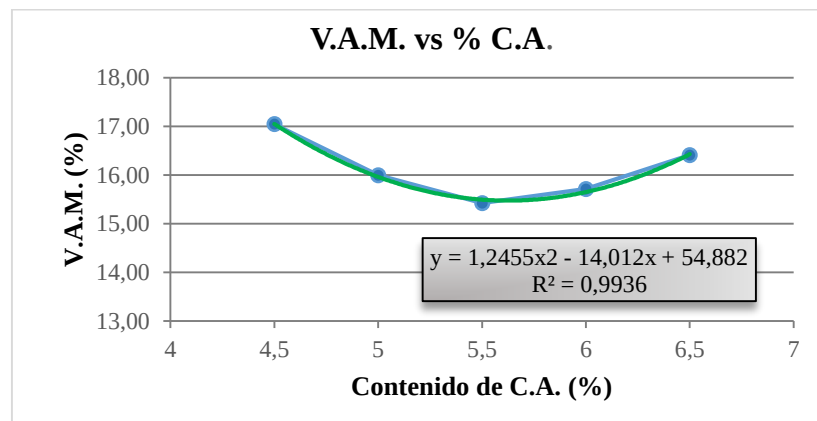
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.38. Curva Vacíos vs % C.A. de la mezcla al 4% de ceniza orgánica



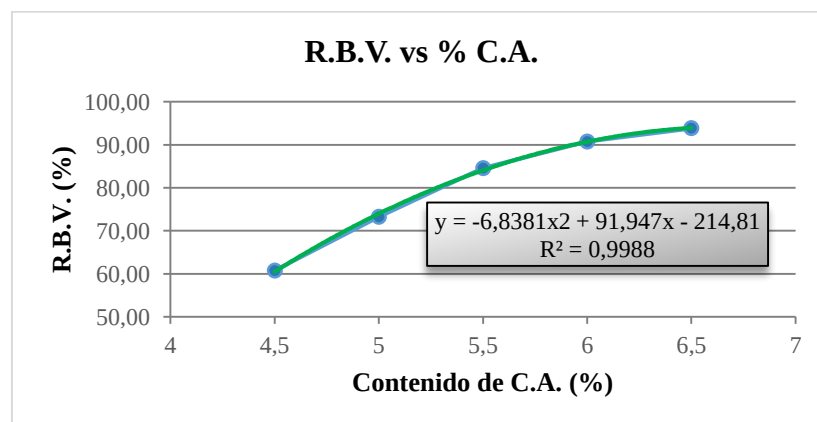
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.39. Curva V.A.M. vs % C.A. de la mezcla al 4% de ceniza orgánica

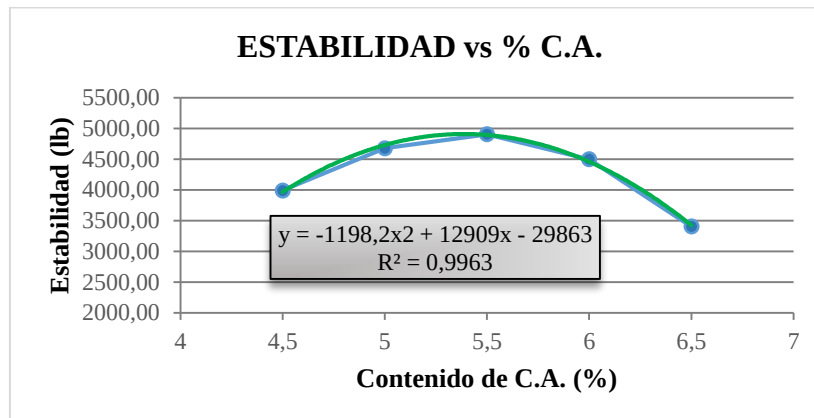


Fuente: Elaboración propia

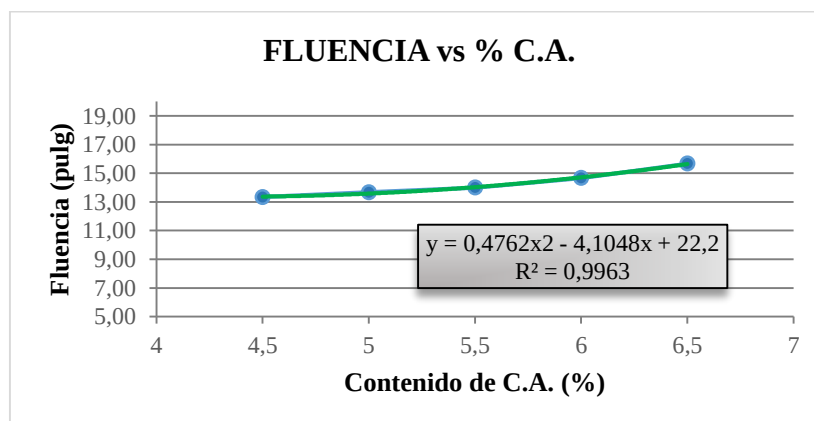
Gráfico 3.40. Curva R.B.V. vs % C.A. de la mezcla al 4% de ceniza orgánica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.41. Curva Estabilidad vs % C.A. de la mezcla al 4% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.42. Curva Fluencia vs % C.A. de la mezcla al 4% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo las ecuaciones de las curvas de los gráficos, se determina el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 4% de ceniza orgánica, considerando los siguientes parámetros de acuerdo al método Marshall:

Tabla 3.80. Porcentaje óptimo de C.A. de la mezcla con 4% de ceniza orgánica

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad máxima (lb)	4901,51	5,45
	Densidad máxima (gr/cm³)	2,38	5,98
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,06
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%)=	5,50

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico es 5,50 % para una mezcla asfáltica con 4% de ceniza orgánica.

3.4.12. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 6% de ceniza orgánica

Una vez determinados todos los parámetros mediante la metodología Marshall, se procede a graficar las curvas de diseño.

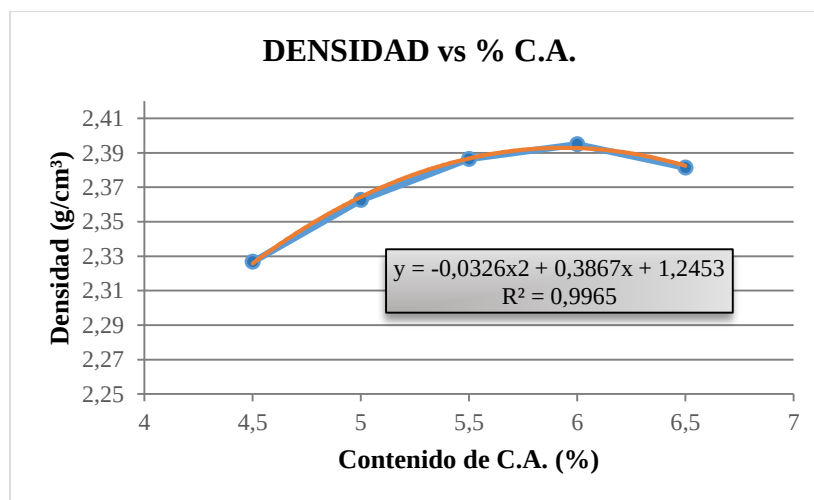
Tabla 3.81. Resultados de la mezcla con 6% de ceniza orgánica

Porcentaje de cemento asfáltico	Densidad promedio (g/cm ³)	Vacíos en la mezcla (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos)(%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
4,5	2,33	5,85	16,32	64,17	5354,36	14,00
5,0	2,36	3,66	15,47	76,34	4753,36	15,00
5,5	2,39	1,94	15,07	87,11	4070,58	16,67
6,0	2,39	0,85	15,22	94,43	3441,81	18,00
6,5	2,38	0,66	16,14	95,89	2984,46	19,00

Fuente: Elaboración propia

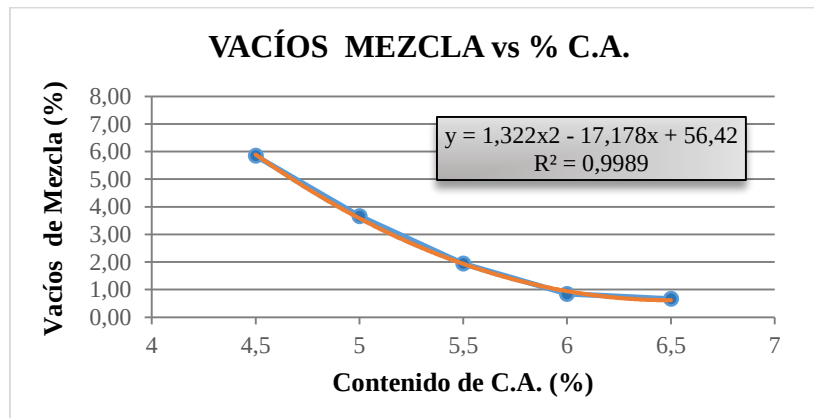
A continuación, se observa los gráficos de curvas de diseño para determinar el porcentaje óptimo de asfalto.

Gráfico 3.43. Curvas Densidad vs % C.A. de la mezcla al 6% de ceniza orgánica



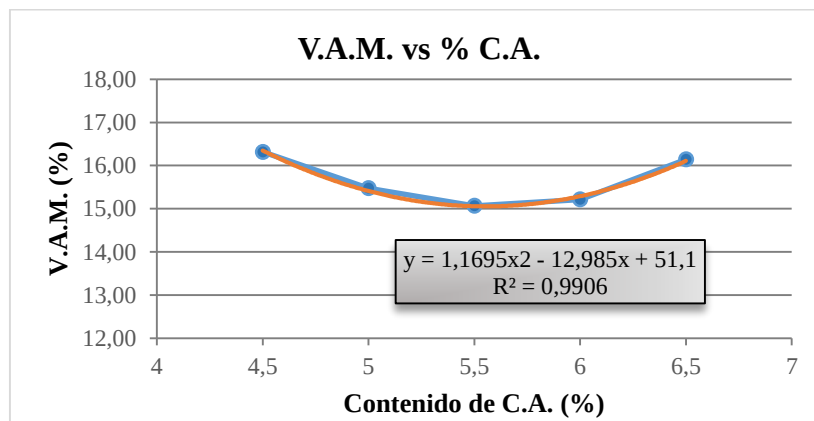
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.44. Curva Vacíos vs % C.A. de la mezcla al 6% de ceniza orgánica



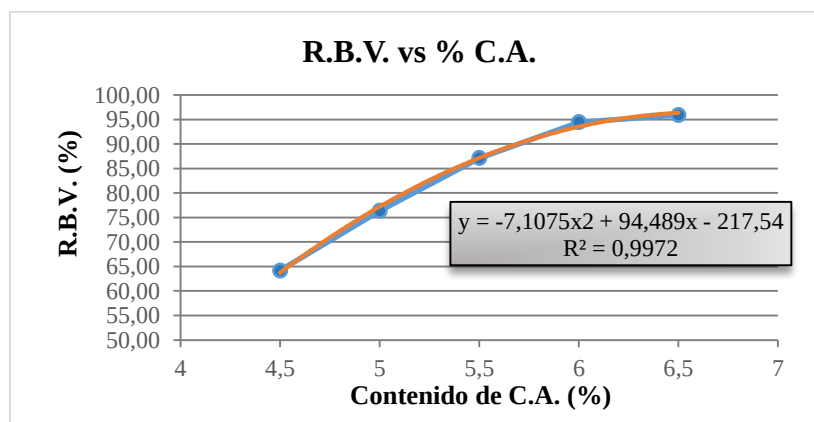
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.45. Curva V.A.M. vs % C.A. de la mezcla al 6% de ceniza orgánica

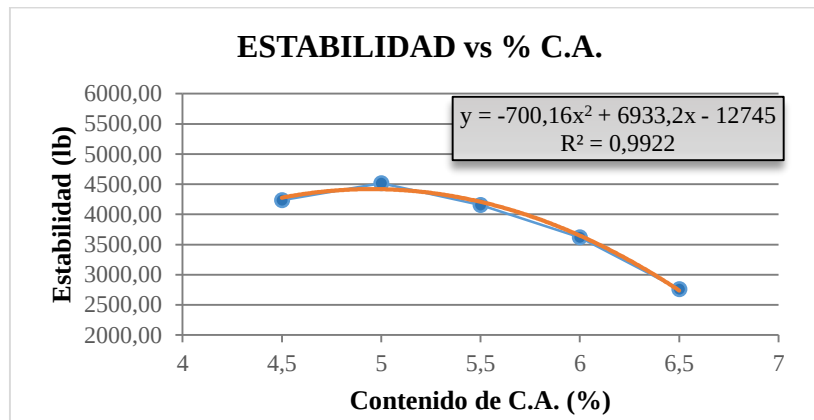


Fuente: Elaboración propia

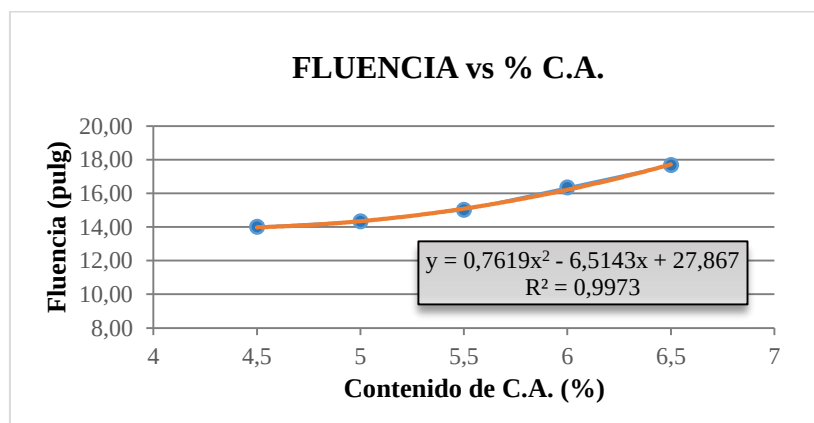
Gráfico 3.46. Curva R.B.V. vs % C.A. de la mezcla al 6% de ceniza orgánica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.47. Curva Estabilidad vs % C.A. de la mezcla al 6% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.48. Curva Fluencia vs % C.A. de la mezcla al 6% de ceniza orgánica

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo las ecuaciones de las curvas de los gráficos, se determina el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla con 6% de ceniza orgánica, considerando los siguientes parámetros de acuerdo al método Marshall:

Tabla 3.82. Porcentaje óptimo de C.A. de la mezcla con 6% de ceniza orgánica

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad máxima (lb)	4417,0	5,00
	Densidad máxima (gr/cm³)	2,39	6,00
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	4,90
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%)=	5,30

Fuente: Elaboración propia

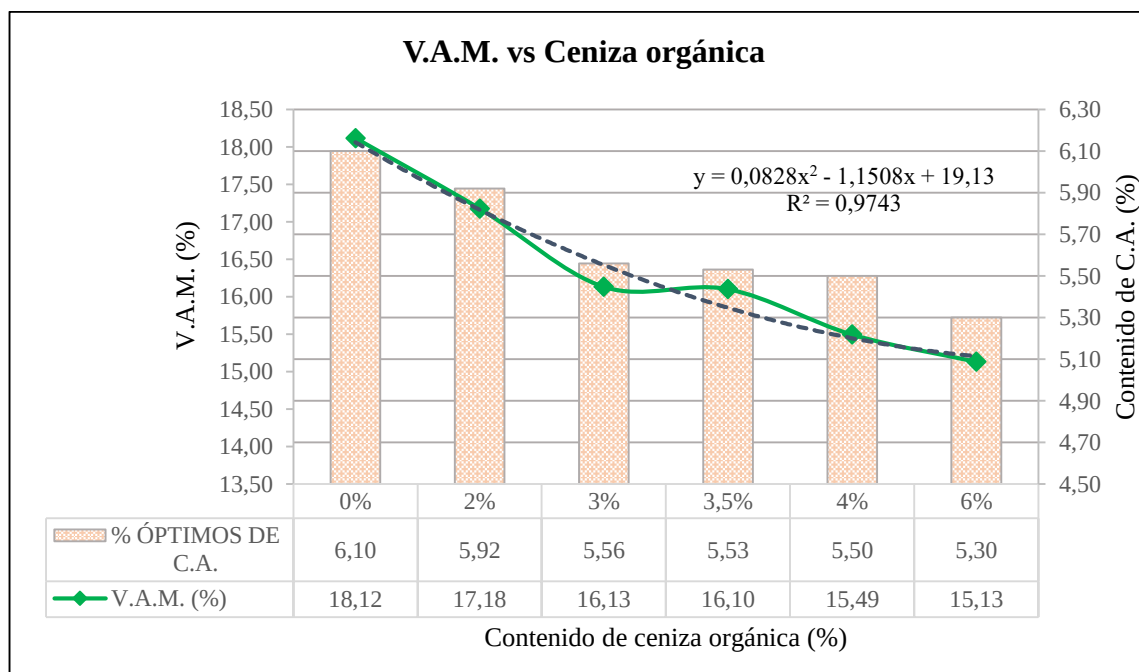
El porcentaje óptimo de cemento asfáltico es 5,30% para una mezcla asfáltica con 6% de ceniza orgánica.

Tabla 3.83. Resumen de resultados de parámetros Marshall de acuerdo al contenido óptimo de C.A. y la combinación de ceniza orgánica

Contenido de ceniza orgánica (%)	Contenido óptimo de cemento asfáltico (%)	Densidad promedio (g/cm ³)	Vacíos en la mezcla (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
0%	6,10	2,30	4,08	18,12	2777,20	9,93
2%	5,92	2,33	3,40	17,18	3170,51	11,13
3%	5,56	2,35	3,06	16,13	3992,07	11,48
3,5%	5,53	2,35	2,94	16,10	4510,66	11,90
4%	5,50	2,37	2,48	15,49	4891,49	14,03
6%	5,30	2,38	2,51	15,13	4333,95	14,74
Especificación		Mín. 2,25	3 - 5	Mín. 13	Mín. 1800	8 - 14

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.49. Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) respecto a % óptimo de C.A. y adición de ceniza orgánica



Fuente: Elaboración propia

Observando la tabla 3.83 la mezcla asfáltica con adición de ceniza orgánica de 3,5% queda fuera del análisis debido a que no cumple con el porcentaje mínimo de vacíos, que es el 3% y por otro lado la adición de ceniza orgánica de 4% y 6% también quedan descartadas de la investigación debido a que la fluencia se encuentra fuera de lo especificado en la metodología que es entre 8 y 14 (0,01”).

De acuerdo al gráfico 3.49 se determina que los vacíos de agregado mineral tienen una curva de tendencia descendente, la cual ajustada al modelo matemático polinómico de segundo grado, presenta un coeficiente de determinación de 0,9743; este valor indica que existe una alta relación de vacíos de agregado mineral y el contenido de ceniza orgánica.

Teniendo presente el porcentaje óptimo de asfalto, se observa que baja a medida que sube el contenido de ceniza orgánica. En cuanto a la especificación de la metodología Marshall, la cual debe cumplir como mínimo el 13%, observamos que todas las mezclas asfálticas cumplen.

Siendo la mezcla asfáltica con el 6% de contenido de ceniza orgánica con el menor valor de vacíos de agregado mineral con el 15,13% y la mezcla con mayor porcentaje de vacíos de agregado mineral es la que tiene un 0% de ceniza orgánica, con un 18,12%.

Para un mejor análisis para la obtención del óptimo de ceniza orgánica y su respectivo porcentaje de asfalto, se realiza un análisis de los vacíos de agregado mineral respecto al contenido de cemento asfáltico.

3.5. Análisis de los vacíos de agregado mineral (V.A.M.) según la variación de ceniza orgánica y el contenido de asfalto

Los vacíos de agregado mineral (V.A.M.) en las mezclas asfálticas densas son un aspecto importante en el diseño y comportamiento de estas mezclas. Son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

Según la metodología Marshall, una mezcla asfáltica densa debe vencer la especificación como mínimo con el 13% de vacíos de agregado mineral (V.A.M.), cumplir con este parámetro es crucial para lograr una mezcla asfáltica con mayor estabilidad y reducción de porosidad y permeabilidad.

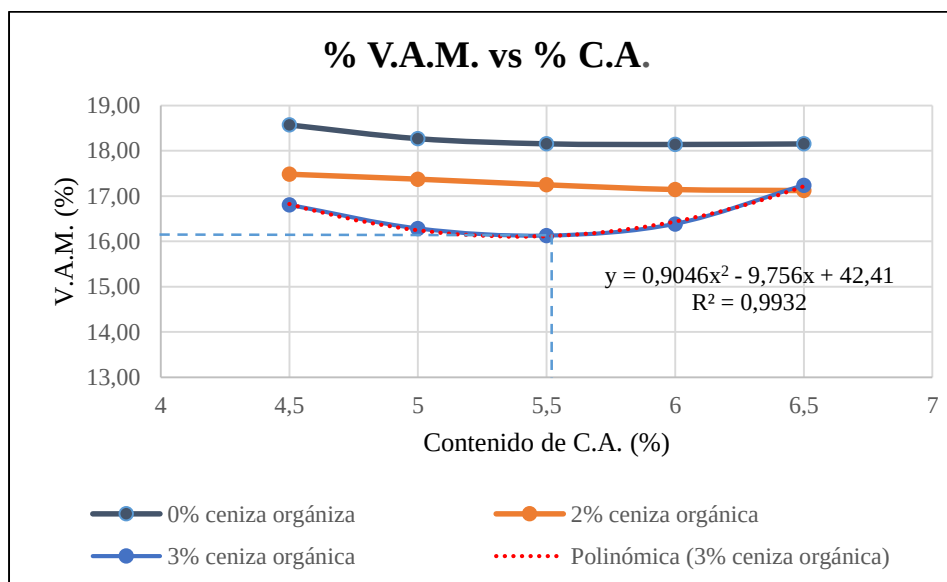
Para determinar el contenido óptimo de ceniza orgánica, se realiza un estudio del comportamiento de los vacíos en el agregado mineral (V.A.M.) respecto al contenido de asfalto y la adición de ceniza orgánica como filler; como se observa en la siguiente tabla resumen y su respectivo gráfico:

Tabla 3.84. Resumen de los Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) respecto al % de asfalto y ceniza orgánica

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	Vacíos del agregado mineral (V.A.M.)(%)					
	Variación de ceniza orgánica (%)					
	0%	2%	3%	3,5%	4%	6%
4,5	18,57	17,48	16,80	16,84	17,05	16,32
5	18,27	17,37	16,28	16,45	16,00	15,47
5,5	18,16	17,25	16,13	16,07	15,42	15,07
6	18,14	17,15	16,39	16,22	15,71	15,22
6,5	18,15	17,12	17,24	17,07	16,41	16,14

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.50. Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) respecto al % de asfalto y ceniza orgánica



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 3.50 de la relación del porcentaje de vacíos de agregado mineral (V.A.M.) con contenido de cemento asfáltico de la adición de ceniza orgánica, se puede observar que la mezcla con 0% y 2% de contenido de ceniza orgánica tiene tendencia lineal

descendente; la cual indica que a medida que se adiciona más ceniza, el % de vacíos de agregado mineral disminuye.

Mientras que en la curva del 3% de ceniza orgánica, presenta una tendencia de línea polinómica, teniendo los valores mínimos en la curva central del vértice, entre los porcentajes de asfalto entre 5% y 6%.

De acuerdo a la ecuación que se observa en el gráfico 3.50 se indica que el menor porcentaje de vacíos de agregado mineral (V.A.M.) de la mezcla asfáltica con la adición de 3% de ceniza orgánica y un 5,56% de contenido de asfalto, definiendo así la combinación óptima para el diseño de una mezcla asfáltica densa para una carpeta de rodadura, corresponde un % de vacíos de agregado mineral de 16,13 %.

La diferencia que existe en la reducción de % V.A.M. de la mezcla asfáltica convencional (18,12 %) con la adición de ceniza orgánica del 3% (16,13 %) es de 10,95 %.

Tabla 3.85. Contenido óptimo de ceniza orgánica y cemento asfáltico

Ceniza orgánica	3,00%	Especificación
% Óptimo de C.A.	5,56%	
Estabilidad (lb)	3992,07	>1800
Fluencia (pulg)	11,48	8 - 14
V.A.M. (%)	16,13	>13
Densidad (g/cm ³)	2,35	mín. 2,25
Vacíos (%)	3,06	3 - 5

Fuente: Elaboración propia

3.6. Análisis de resultados con contenido óptimo de ceniza orgánica

Luego que se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico con 5,56% y mediante un análisis el contenido óptimo de ceniza orgánica como filler en la mezcla asfáltica de 3,0%, se procede a elaborar el diseño de mezcla asfáltica final para verificar si los valores cumplen con la especificación Marshall.

A continuación, se muestra la dosificación de la mezcla asfáltica para realizar las 30 briquetas finales para verificar la relación de contenido de ceniza orgánica en los vacíos de agregado mineral (V.A.M.):

Tabla 3.86. Dosificación para diseño final

% Agregado grueso (grava)	30,00%
% Agregado grueso (gravilla)	25,00%
% Agregado fino (arena)	42,00%
Contenido óptimo de Ceniza Orgánica (%)	3,00%
Contenido óptimo de Cemento Asfáltico (%)	5,56%
Porcentaje de Agregado (%)	94,44%
Peso del Cemento Asfáltico (g) *	66,72
Peso de Grava (g) *	339,98
Peso de Gravilla (g) *	283,32
Peso de Arena (g) *	475,98
Peso de Filler (g) *	34,00
Peso total de la briketa (g) *	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.87. Resultados del diseño final con contenidos óptimos de ceniza orgánica y cemento asfáltico

N° de probeta	Densidad real	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	Estabilidad	Fluencia
	g/cm ³	%	%	Libras	0,01 pulg
1	2,34	3,55	16,55	3960,12	13
2	2,35	3,16	16,22	4338,73	13
3	2,35	3,27	16,31	3605,86	11
4	2,34	3,35	16,38	3521,16	10
5	2,34	3,51	16,52	3776,24	12
6	2,34	3,34	16,37	4053,50	12
7	2,35	3,03	16,11	4669,34	13
8	2,35	3,16	16,22	3822,13	12
9	2,33	3,74	16,72	4140,20	12
10	2,35	3,03	16,10	4552,59	11
11	2,34	3,33	16,37	4254,74	12
12	2,34	3,47	16,48	3900,36	12
13	2,34	3,54	16,55	4028,75	10
14	2,34	3,45	16,46	4308,67	11

N° de probeta	Densidad real	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	Estabilidad	Fluencia
	g/cm ³	%	%	Libras	0,01 pulg
15	2,36	2,79	15,90	4058,50	14
16	2,34	3,32	16,35	3470,83	10
17	2,34	3,50	16,51	4027,33	13
18	2,35	3,26	16,31	3578,37	10
19	2,34	3,44	16,46	3771,11	10
20	2,34	3,45	16,46	4063,41	10
21	2,35	3,21	16,26	4849,22	13
22	2,33	3,86	16,82	3932,64	10
23	2,35	3,03	16,11	3464,66	10
24	2,34	3,55	16,56	2901,77	10
25	2,34	3,56	16,56	3767,14	10
26	2,35	3,16	16,22	3776,44	14
27	2,34	3,62	16,61	4287,56	11
28	2,34	3,38	16,40	4094,44	11
29	2,35	3,07	16,14	4252,56	10
30	2,36	2,84	15,94	4502,05	12
PROMEDIO	2,34	3,33	16,37	3991,01	11,40

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se realiza la validación de valores finales de los parámetros de la metodología Marshall.

Tabla 3.88. Validación de diseño final

Propiedad Marshall	Unidad	Valor promedio	Especificación	Validación
Vacíos de agregado mineral	(%)	16,37	>13	Cumple
Densidad	(g/cm ³)	2,34	mín.2,25	Cumple
Vacíos (%)	(%)	3,33	3 – 5	Cumple
Estabilidad	(lb)	3991,01	>1800	Cumple
Fluencia	(0,01 pulg)	11,40	8 – 14	Cumple

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE DATOS OBSERVADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE DATOS OBSERVADOS

4.1. Tratamiento estadístico de los resultados

Para realizar el tratamiento estadístico de los datos observados, se comienza con una organización de datos para luego determinar la estadística descriptiva e inferencial:

4.1.1. Datos estadísticos

Los datos para realizar el análisis estadístico se realizaron 30 briquetas con el contenido óptimo de ceniza orgánica 3,0% y su contenido óptimo de cemento asfáltico 5,56%; a continuación en la tabla se observa los resultados de los vacíos de agregado mineral (V.A.M.) por analizar:

Tabla 4.1. Datos para el tratamiento estadístico

N° de probeta	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	N° de probeta	V.A.M. (vacíos agregado mineral)
	%		%
1	16,55	16	16,35
2	16,22	17	16,51
3	16,31	18	16,31
4	16,38	19	16,46
5	16,52	20	16,46
6	16,37	21	16,26
7	16,11	22	16,82
8	16,22	23	16,11
9	16,72	24	16,56
10	16,10	25	16,56
11	16,37	26	16,22
12	16,48	27	16,61
13	16,55	28	16,40
14	16,46	29	16,14
15	15,90	30	15,94

Fuente: Elaboración propia

4.2. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva ayuda a evidenciar los datos recopilados para ayudar a analizarlos.

Tabla 4.2. Organización de datos para el tratamiento estadístico

N° de probeta	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	N° de probeta	V.A.M. (vacíos agregado mineral)
	%		%
1	15,90	16	16,38
2	15,94	17	16,40
3	16,10	18	16,46
4	16,11	19	16,46
5	16,11	20	16,46
6	16,14	21	16,48
7	16,22	22	16,51
8	16,22	23	16,52
9	16,22	24	16,55
10	16,26	25	16,55
11	16,31	26	16,56
12	16,31	27	16,56
13	16,35	28	16,61
14	16,37	29	16,72
15	16,37	30	16,82

Fuente: Elaboración propia

Luego se procede a determinar los valores de la estadística descriptiva; mostrando en la siguiente tabla:

Tabla 4.3. Valores estadísticos descriptivos

Media ($\bar{X}$)	16,37 %
Error típico ($E\bar{X}$)	0,04 %
Mediana	16,38 %
Moda	-
Desviación estándar (S)	0,22 %
Varianza de la muestra	0,05 %
Rango	0,92 %
Mínimo	15,90 %
Máximo	16,82 %
Número de datos	30
Número de clases	6
Amplitud de intervalos	0,15 %

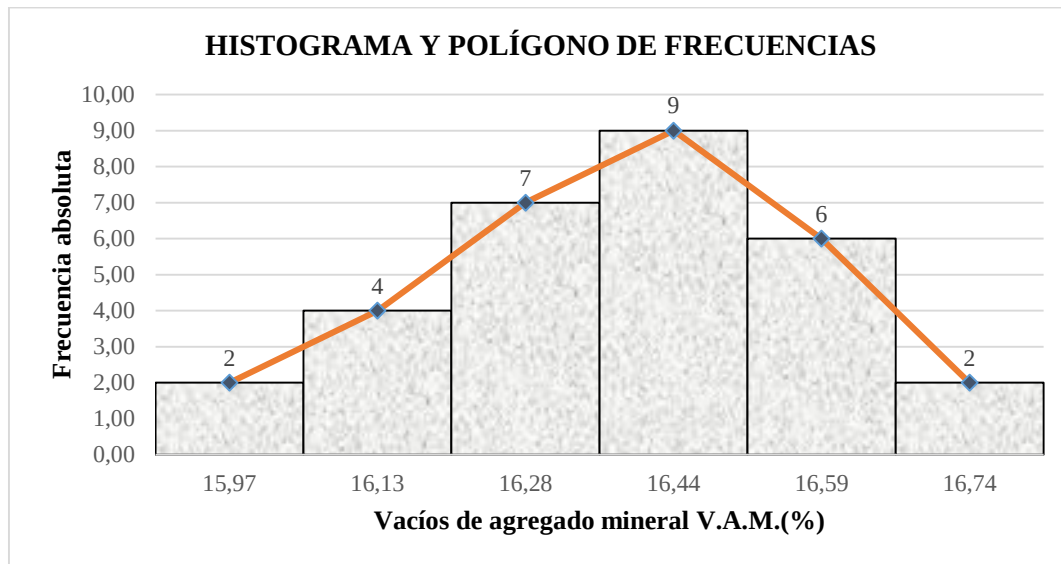
Fuente: Elaboración propia

Una vez definido los valores máximo y mínimo, el rango, el número de clases y la amplitud de intervalos; se continúa a calcular la distribución de frecuencias y la curva histograma.

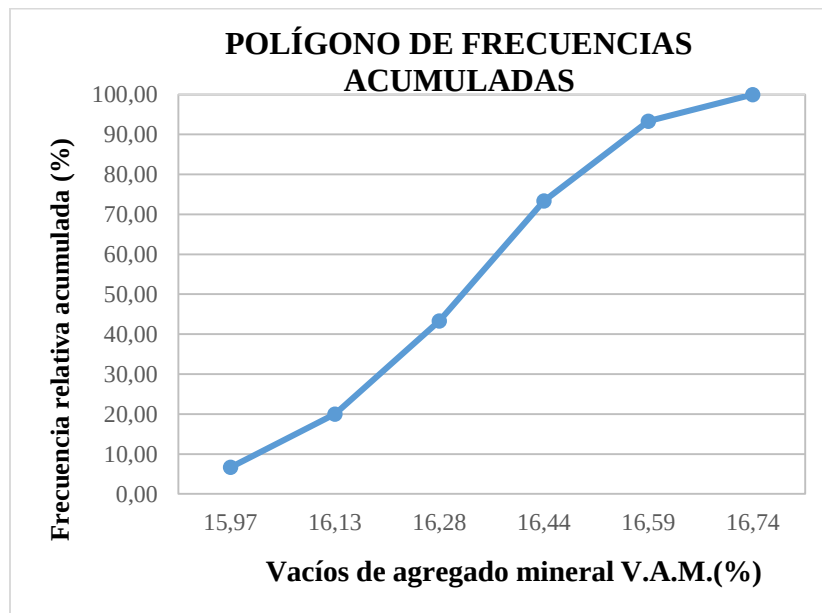
Tabla 4.4. Distribución de frecuencias

N° de clase	Límite inferior	Límite superior	Marca de clase (%)	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia observada relativa acumulada (%)
1	15,90	16,05	15,97	2	2	7	7
2	16,05	16,21	16,13	4	6	13	20
3	16,21	16,36	16,28	7	13	23	43
4	16,36	16,51	16,44	9	22	30	73
5	16,51	16,67	16,59	6	28	20	93
6	16,67	16,82	16,74	2	30	7	100

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1 Histograma y polígono de frecuencias

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2 Polígono de frecuencias acumuladas

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el gráfico 4.1 de histograma, la marca de clase con mayor frecuencia observada es 16,44 % con 9 datos entre el intervalo 16,28 % - 16,59 %. Por otro lado, se tiene en los extremos marcas mínimas con 2 datos por lado de 15,97% y 16,74% de porcentajes de vacíos de agregado mineral.

4.3. Estadística inferencial

La estadística inferencial nos permite inferir las características de la población a partir de una muestra representativa, lo que facilita tomar decisiones basadas en datos y hacer predicciones. Utiliza técnicas como pruebas de hipótesis, intervalos de confianza y análisis de regresión para hacer inferencias precisas sobre la población a partir de la muestra.

Varianza:

$$S^2 = \sigma^2$$

$$\sigma^2 = 0,05 \%$$

Error de la media:

$$E\bar{x} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$E\bar{x} = \frac{0,22}{\sqrt{30}}$$

$$E\bar{x} = 0,04 \%$$

Error probable:

$$Ep = Z * E\bar{x}$$

En la presente investigación se trabaja con un nivel de confianza de 95%

NC=Nivel de confianza = 95,00 % = 0,95

Z = 1,96 (tabla de, distribución normal)

$$Ep = 1,96 * 0,04$$

$$\mathbf{Ep = 0,079 \text{ (\%)}}$$

Intervalo de confianza:

$$Va = \bar{x} \pm Ep$$

Donde:

Va = Intervalo de confianza (%)

$\bar{X}$ = Media aritmética (16,37%)

E_p = Error probable (0,079 %)

$$V_a = 16,37 + 0,08 = \mathbf{16,45 \%} \rightarrow \text{Valor máximo}$$

$$V_a = 16,37 - 0,08 = \mathbf{16,29 \%} \rightarrow \text{Valor mínimo}$$

El intervalo para un nivel de confianza iguala 95% es de 16,29 % a 16,45 %.

4.4. Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis se realiza mediante la Distribución Normal.

Datos:

n = N° de briquetas diseñadas = 30

$\bar{X}$ = Media aritmética = 16,37 (%) (V.A.M. vacíos de agregado mineral)

σ = Desviación estándar poblacional = 0,22 (%)

μ = Media poblacional = 13 (%) por norma

Paso 1.

En la presente investigación se generó la hipótesis: “La adición de ceniza orgánica como filler en la dosificación de mezclas asfálticas en caliente; tiene un efecto favorable en los valores de vacíos de agregado mineral (V.A.M.) de las propiedades volumétricas Marshall”.

Generación de hipótesis:

Debido a que en la hipótesis de investigación indica que es “favorable”, su símbolo es (>), en base a ello se considera como interpretación de una hipótesis alternativa:

$$\text{Hipótesis alternativa} \longrightarrow H_1: \bar{X} > \mu$$

Posteriormente se habilita la hipótesis nula que indica lo contrario:

$$\text{Hipótesis nula} \longrightarrow H_0: \bar{X} \leq \mu$$

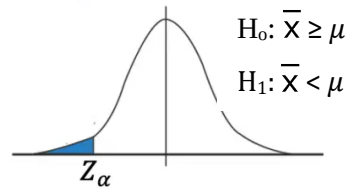
A continuación, se tiene la hipótesis:

$$H_1: 16,37 \% > 13 \%$$

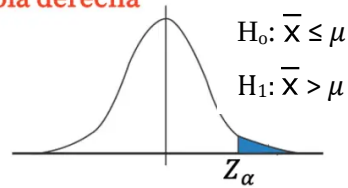
$$H_0: 16,37 \% \leq 13 \%$$

Gráfico 4.3. Alternativas de hipótesis

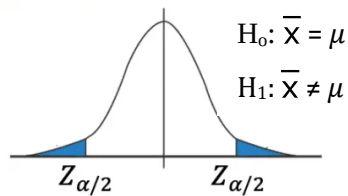
Cola izquierda



Cola derecha



Dos colas



■ - Región de rechazo de H_0

□ - Región de aceptación de H_0

Fuente: Elaboración propia

Del gráfico 4.3 se define que la hipótesis formulada para la investigación es de la región 2, con la cola derecha.

Paso 2.

Se establece el nivel de significancia (α)

$$NC = \text{Nivel de confianza} = 95,00 \% = 0,95 \quad ; \quad \alpha = 1 - 0,95 = 0,05 ;$$

$$Z = 1,96 \text{ (de tabla de distribución normal)}$$

Paso 3.

Se calcula el estadístico Z_c :

$$Z_c = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

Cálculo

$$\sigma = \frac{0,22}{\sqrt{30}} = 0,04 \text{ (\%)}$$

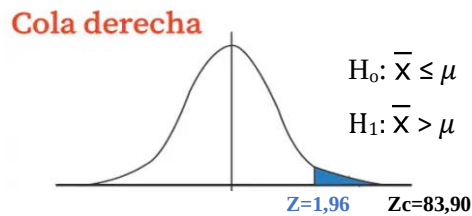
$$\sigma = 0,04 \text{ (\%)}$$

$$Z_c = \frac{16,37\% - 13\%}{\frac{0,22\%}{\sqrt{30}}}$$

$$Z_c = 83,90 \text{ (\%)}$$

Paso 4.

Gráfico 4.4. Región 2, con valores calculados



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico anterior 4.4 se observa que el estadístico se encuentra en la zona de rechazo con la cola a la derecha.

$$Z_c > Z$$

$$83,90 > 1,96$$

De acuerdo al gráfico 4.4 el estadístico calculado de Z_c es mayor al valor obtenido por la tabla Z, entonces se puede verificar que el valor Z_c se encuentra dentro del rango de la zona de rechazo; por lo tanto, la hipótesis nula (H_0) es rechazada y la hipótesis alternativa (H_1) es aceptada.

Paso 5.

Concluyendo con la prueba de hipótesis, se valida la hipótesis generada en la investigación; definiendo así que los resultados de la adición de ceniza orgánica sí tiene un efecto favorable en los vacíos de agregado mineral (V.A.M.) al reducir los espacios presenta menor permeabilidad y porosidad.

4.5. Análisis de costos

Una vez obtenido los contenidos óptimos de filler y cemento asfáltico; para conocer la factibilidad del uso de la ceniza orgánica como filler también conociendo la mejora en la reducción de vacíos de agregado mineral en la mezcla asfáltica, es necesario determinar el costo que genera su aplicación en obra y compararla con una mezcla convencional.

A continuación, se procede a calcular los rendimientos para una mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica con adición de ceniza orgánica como filler.

4.5.1. Rendimiento de los componentes de una mezcla convencional (e = 5cm)**1. Descripción:**

Tipo de ligante asfáltico = Cemento asfáltico 85/100

Procedencia del agregado = Chancadora Garzón

Densidad de la mezcla (kg/m^3) = 2.302

2. Volumen de producción por m^2 :

Unidad = m^2

Largo (m) = 1,0

Ancho (m) = 1,0

Espesor (m) = 0,05

Volumen compactado (m^3) = 0,05

Esponjamiento (%) = 35

Volumen suelto (m^3) = 0,068

3. Dosificación:

Tabla 4.5. Dosificación del total de mezcla convencional por m²

Componente	Proporción en la Mezcla (%)	Cantidad (kg)
Cemento Asfáltico	6,10	9,48
Agregado	93,90	145,91
Total	100	155,39

Fuente Elaboración propia

Tabla 4.6. Dosificación del agregado por m²

Componente	Proporción en la Mezcla (%)	Proporción en Mezcla (%)	Cantidad (kg)	Peso específico (kg/m ³)	Volumen (m ³)
Grava	30,00	28,17	43,77	2676	0,016
Gravilla	25,00	23,48	36,48	2705	0,013
Arena	45,00	42,25	65,66	2580	0,025
Total	100,00	93,90	145,91	-	-

Fuente Elaboración propia

Tabla 4.7. Rendimiento por m² de carpeta asfáltica

Componente	Rendimiento	Unidad
Cemento Asfáltico	9,48	kg
Grava	0,016	m ³
Gravilla	0,013	m ³
Arena	0,025	m ³

Fuente Elaboración propia

4.5.2. Rendimiento de los componentes de una mezcla asfáltica con 3% ceniza orgánica (e = 5cm)

1. Descripción de datos:

Tipo de ligante asfáltico = Cemento asfáltico 85/100

Procedencia del agregado = Chancadora Garzón

Densidad de la mezcla (kg/m³) = 2.329

2. Volumen de producción por m²:

$$\text{Unidad} = \text{m}^2$$

$$\text{Largo (m)} = 1,0$$

$$\text{Ancho (m)} = 1,0$$

$$\text{Espesor (m)} = 0,05$$

$$\text{Volumen compactado (m}^3\text{)} = 0,05$$

$$\text{Esponjamiento (\%)} = 35$$

$$\text{Volumen suelto (m}^3\text{)} = 0,063$$

3. Dosificación:

Tabla 4.8. Dosificación del total de mezcla convencional por m²

Componente	Proporción en la Mezcla (%)	Cantidad (kg)
Cemento Asfáltico	5,56	8,83
Agregado	94,44	149,93
Total	100	158,76

Fuente Elaboración propia

Tabla 4.9. Dosificación del agregado por m²

Componente	Proporción en la Mezcla (%)	Proporción en Mezcla (%)	Cantidad (kg)	Peso específico (kg/m ³)	Volumen (m ³)
Grava	30,00	28,33	44,98	2676	0,017
Gravilla	25,00	23,61	37,48	2705	0,014
Arena	42,00	39,67	62,97	2580	0,024
Filler/ ceniza orgánica	3,00	2,83	4,50	2868	0,0016
Total	100,00	94,44	149,93	-	-

Fuente Elaboración propia

Tabla 4.10. Rendimiento por m² de carpeta asfáltica

Componente	Rendimiento	Unidad
Cemento Asfáltico	8,83	kg
Grava	0,017	m ³
Gravilla	0,014	m ³
Arena	0,024	m ³
Filler / Ceniza orgánica	0,0016	m ³

Fuente Elaboración propia

Con los rendimientos obtenidos, se procede a elaborar la planilla de precios unitarios para los dos casos, primero para una carpeta de mezcla asfáltica convencional y segundo para una carpeta de mezcla asfáltica con adición de ceniza orgánica como filler; determinando para una mezcla asfáltica compactada de 1m², (Ver anexo 4).

4.5.3. Análisis de resultados de costos de mezcla convencional y mezcla con ceniza orgánica

Con los resultados de precios unitarios se puede analizar el resultado final de costos de aplicación:

Tabla 4.11. Resultado final de costos

% de adición de ceniza orgánica	Descripción	Volumen de mezcla compactada para 1m ² (m ³)	Precio unitario para 1m ² (Bs.)	Volumen de mezcla compactada para 1 m ³ (m ³)	Precio Total para m ³ (Bs.)	Incremento y/o Reducción
0%	Carpeta de mezcla asfáltica convencional (espesor 5cm)	0,05	171,90	1	3.437,96	0%
3%	Carpeta de mezcla asfáltica con filler de ceniza orgánica (espesor 5cm)	0,05	171,88	1	3.437,61	-0,01%

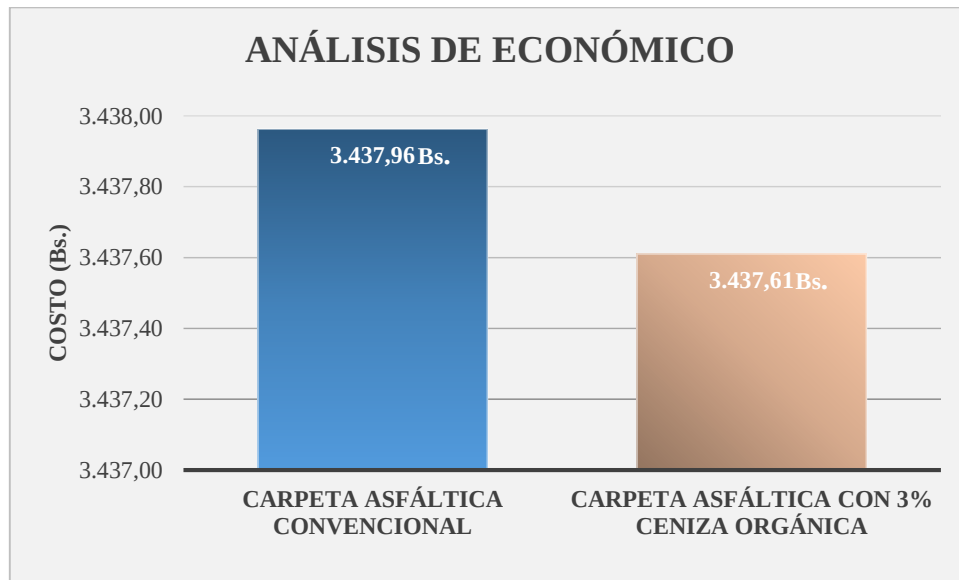
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 4.11 se puede evidenciar que para la aplicación de una mezcla asfáltica convencional de 1m³ tiene un costo de 3.437,96 Bs., el costo para una mezcla asfáltica con 3% de adición de ceniza orgánica es 3.437,61 Bs. la cual se obtiene una reducción de 0,01 % del costo respecto al costo de la mezcla convencional.

Considerando que existe una reducción mínima del costo por m³ de la mezcla asfáltica con adición de ceniza orgánica es evidente que es óptima la aplicación debido a que,

siendo empleada en un proyecto, ésta tendría una diferencia económica relevante; con este porcentaje de ceniza se tiene mayor resistencia, es decir mayor estabilidad, mayor densidad, menor fluencia y genera menor % de vacíos en la mezcla densa respecto a la mezcla asfáltica convencional.

Grafico 4.5. Análisis económico de la mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Luego de realizar el análisis de los resultados de los vacíos de agregado mineral, parámetro volumétrico del método Marshall, se llegó a las siguientes conclusiones:

- De acuerdo al objetivo general, se logró cumplir con un análisis minucioso de los efectos que genera la adición de ceniza orgánica subproducto de industria ladrillera artesanal en una mezcla asfáltica densa en caliente, definiendo que sí puede ser una alternativa técnica viable, ya que contribuye con la reducción del porcentaje de vacíos en el agregado mineral disminuyendo así la porosidad y permeabilidad considerando la metodología Marshall.
- En cuanto a las características de los agregados pétreos, ceniza orgánica y cemento asfáltico (PEN 85-100) se realizó los ensayos de laboratorio correspondientes prescritos en el “Manual de ensayos y materiales asfálticos” elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC). El cómputo global de los resultados obtenidos en estos ensayos mostró características muy favorables cumpliendo así las especificaciones mínimas requeridas, propias de áridos empleados en la construcción de carreteras.
- Se elaboró el diseño granulométrico del agregado con un 30% de grava, 25% de gravilla y 45% de arena, el cual cumple con la especificación ASTM D 3515 para una mezcla asfáltica densa, primero para una mezcla convencional con 0% de ceniza y después con la adición gradual de la ceniza orgánica como filler de (2%, 3%, 3,5%, 4% y 6%), en combinación con (4,5%, 5%, 5,5%, 6% y 6,5%) de porcentajes de asfalto.
- Por otra parte, mediante el método Marshall se obtuvo los resultados de los criterios de diseño especificados en la tabla 3.42, donde se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico en cada grupo de trabajo, se puede resaltar que a mayor adición de ceniza orgánica reduce el porcentaje de vacíos de agregado mineral en la mezcla de 18,12 % de una mezcla convencional a 15,13% con 6% de ceniza. Determinando que

la adición de 4% y 6% quedan fuera del análisis porque supera con lo especificado en la fluencia, lo mismo pasa con la adición de 3,5%, no llega a cumplir con el porcentaje de vacíos en la mezcla.

- El análisis de los vacíos de agregado mineral (V.A.M.) como se observa en el gráfico 3.50 se concluye que con 3% de adición de ceniza orgánica aminora el porcentaje de vacíos de agregado mineral a 16,13% en comparación a la muestra con 0% ceniza orgánica de 18,12%, además también se reduce el contenido óptimo de asfalto de 6,10% a 5,56%.

En el análisis económico, conociendo que la ceniza orgánica no tiene costo como material, pero sí en mano de obra y equipo, como se observa en el Anexo 4 (Análisis de precios unitarios) se verificó que el costo reduce en un 0,01 % en comparación con la mezcla convencional, esto debido a que también disminuye el contenido óptimo de asfalto. Por ello llega a ser un aditivo de óptima aplicación.

- Realizada la presente investigación de acuerdo a la hipótesis planteada y su respectivo análisis de resultados que se realizó para el tratamiento estadístico, se concluyó aceptando la hipótesis de la investigación. Verificando que, si se diseña una mezcla asfáltica adicionando como filler 3% de ceniza orgánica subproducto de industria ladrillera artesanal, se obtienen resultados favorables, es decir que reduce el porcentaje de vacíos de agregado mineral (V.A.M.).

5.2. Recomendaciones

Concluido el proyecto de investigación se tiene las siguientes recomendaciones:

- Todo proyecto de trabajo, diseño y construcción de obras civiles requieren un estudio previo de análisis de los materiales que componen la obra, es importante que se analicen todos los agregados no solo físicamente sino químicamente, para así definir completamente los parámetros como una especificación técnica a cumplir, en caso de aplicación en una carpeta asfáltica.
- Para obtener resultados verídicos de los ensayos, se recomienda calibrar los equipos antes de proceder a utilizarlos, tener una balanza o una prensa Marshall mal calibrada,

conlleva a problemas en los resultados, datos dispersos y un análisis de los resultados fallidos.

- La presente investigación trabajó con agregados triturados de la chanchadora Garzón y ceniza orgánica de la industria ladrillera artesanal del Valle Central de Tarija, vale recomendar que los resultados obtenidos solo son aplicados para el cemento asfáltico del Perú REPSOL S.A. 85 – 100, para ser usado con otro tipo de asfalto se deberán hacer los ensayos de caracterización y posterior análisis siguiendo la misma metodología.
- Debido a que las ladrilleras artesanales generan 4 Tn por mes de ceniza orgánica, ésta solo abarcaría para la construcción de la carpeta asfáltica de 3,5 Km. de una Red Vial Departamental o Municipal, entonces se recomienda la aplicación para una vía urbana la cual cubriría 5 Km aproximadamente.