

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

En este último tiempo, debido al constante desarrollo de las vías de comunicación, a causa del mayor tráfico vehicular en las redes viales, es decir; el incremento de cargas vehiculares actuantes, como también cambios bruscos de temperatura durante una misma época del año, surgen problemas de deterioro de las mismas, ocasionando perjuicios a los usuarios, ya sea de comodidad o de tiempo de viaje.

Es por este motivo que la ingeniería se debe dar a la tarea de experimentar con nuevos materiales y plantear nuevas alternativas que permitan cumplir con las rigurosas exigencias de vida útil, así como también de rendimiento ante cargas y agentes climáticos.

Es en este sentido que se pretende mejorar las características de los asfaltos convencionales, con la modificación de asfaltos con adición de polvo de acero, esperando que mejoren sus propiedades mecánicas, elevando el desempeño en las situaciones antes mencionadas.

Los primeros usos de polvos metálicos han sido rastreados hacia varios lugares. Por ejemplo, polvos de oro fueron fusionados sobre joyas por los Incas, y los egipcios utilizaron polvos de acero en el año 3000 AC. Otro ejemplo de uso temprano es la Columna de Delhi en la India la que data al año 300 DC. Esta columna fue hecha de 6.5 toneladas de acero en polvo. Hoy en día se llama pulvimetalurgia a los nuevos procesos en los que se utiliza este material para la formación de estructuras útiles.

Aunque en el análisis que se aborda en la presente investigación no se verá la fundición del polvo de acero, es interesante que, aunque el material que se pretende utilizar que puede parecer novedoso, en realidad se lo utilizaba ya hace varios siglos atrás.

Se desarrollará el análisis de asfaltos modificados con polvo de acero con la expectativa de mejorar la calidad de los asfaltos, valiéndonos de material al que hoy

en día no se le procura uso alguno y pasa a constituir un desecho, que como es de conocimiento general, no existe un espacio físico adecuado en donde se disponga finalmente.

Aunque el polvo de acero no es un material que pase a ser un nocivo contaminante, el uso de este puede contribuir sustancialmente en la mejora de mezclas asfálticas en caliente, por lo que merece un análisis profundo, el cual será llevado a cabo en el presente estudio.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En el área de la ingeniería vial en estos tiempos, se presentan mayores retos de forma general, como el diseño de vías cada vez mejores, más rápidas, que puedan soportar mayores incrementos de cargas vehiculares, debido al acelerado incremento de tráfico vehicular, así como también mayores tiempos de vida y materiales que puedan cumplir con las exigencias de durabilidad y resistencia a las deformaciones plásticas, todo esto suma a la falta de recursos para la inversión en infraestructuras viales y mucho menos para el mantenimiento que debieran tener periódicamente.

Es por esto que se deben plantear nuevas alternativas que permitan conservar y mantener el buen desempeño de nuestras redes viales.

Los esfuerzos en investigaciones para mejorar el desempeño de la camada asfáltica de los pavimentos, con el propósito de prolongar su vida útil, no se deben restringir a los materiales comúnmente encontrados en mezclas asfálticas (ligante asfáltico, piedra chancada y filler mineral), también se debe considerar los modificadores que pueden ser materiales no convencionales.

La mejora comportamiento mecánico de los asfaltos convencionales, promueven a realizar un análisis para su modificación con residuos de acero, obtenidos del desecho que se produce en la industria metalúrgica en la región, que mejorarán las propiedades mecánicas de resistencia y durabilidad del asfalto convencional, elevando su desempeño.

En el presente análisis, de mezclas asfálticas modificadas con residuos de la empresa metalúrgica se realizan experimentos de modo sistemático con el propósito de

aumentar los conocimientos en el área de las carpetas asfálticas mezcladas en caliente.

1.3. DISEÑO TEÓRICO

1.3.1. Planteamiento del problema

1.3.1.1. Situación Problemática

En este último tiempo la ingeniería se ha visto en la tarea de buscar alternativas para mejorar las mezclas asfálticas convencionales, con la adición de diferentes materiales que puedan mejorar sus propiedades y durabilidad.

Muchas de las mezclas asfálticas convencionales no han logrado cumplir con la expectativa de vida útil en nuestro medio, presentando problemas en sus propiedades mecánicas y de durabilidad, ya sea por inclemencias del tiempo que llegan a presentarse, desde la temperatura máxima extrema y mínima extrema en una misma región y durante un mismo día, que en este último tiempo se ha vuelto habitual, en adición con otros cambios en relación con crecimiento de la población, como ser; el incremento del parque automotor han ocasionado problemas en el asfalto convencional, lo que implica defectos en las operaciones e incremento en los costos de mantenimiento que deben realizarse con mayor periodicidad, y que en muchos casos es inexistente, ocasionando a su vez mayores tiempos de viaje, inseguridad e incomodidad en los usuarios.

Los factores antes expuestos inducen a crear una alternativa nueva y diferente, que pretende analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con adición de residuo de polvo de acero, esperando de ese modo mejorar la resistencia a la deformación por fatiga y resistencia a las deformaciones plásticas en el asfalto convencional, los resultados obtenidos generarán más conocimiento en el área de los asfaltos modificados.

1.3.1.2. Problema

¿Cuáles serán los porcentajes más adecuados para adicionarse a una mezcla asfáltica y mejorar sus propiedades de estabilidad y fluencia?

1.3.2. Objetivos de la investigación

1.3.2.1. Objetivo general

Analizar el efecto de la adición de diferentes porcentajes de residuos de polvo de acero en mezclas asfálticas en caliente de tal manera se pueda evaluar el comportamiento de las propiedades de estabilidad y fluencia en las mezclas modificadas.

1.3.2.2. Objetivos específicos

- ✓ Analizar los componentes, características y procedimientos de elaboración de mezclas asfálticas.
- ✓ Cuantificar las propiedades mecánicas de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas modificadas con diferentes porcentajes de adición de polvo de acero, mediante el ensayo de Marshall.
- ✓ Realizar tratamiento estadísticos descriptivos e inferenciales de los resultados de las pruebas de estabilidad y fluencia.
- ✓ Comparar las propiedades de estabilidad y fluencia entre una mezcla asfáltica convencional y muestras modificadas con diferentes porcentajes de adición de polvo de acero.
- ✓ Comparar las ventajas y las desventajas de la adición de polvo de acero en la modificación de asfaltos convencionales.

1.3.3. Hipótesis

Si se emplea un porcentaje de polvo de acero como adición a mezclas asfálticas convencionales para modificarlas, entonces se mejorarán las propiedades de estabilidad y fluencia de las mismas.

1.3.4. Definición de variables

1.3.4.1. Variable independiente

Porcentaje de polvo de acero

1.3.4.2. Variables constantes

Características del agregado

Características del cemento asfáltico

1.3.4.3. Variables dependientes

Propiedades de las mezclas asfálticas:

Estabilidad

Fluencia

1.3.5. Definición conceptual

1.3.5.1. Materiales necesarios para la conformación de mezclas asfálticas convencionales y modificadas:

Agregados grueso: Se denominará agregado grueso a la porción del agregado retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4). Para esta investigación debe ser procedente de trituración.

Agregado fino: Se denominará agregado fino a la porción comprendida entre los tamices de 4,75mm (No. 4) y 75 μ m (No. 200). El agregado fino deberá proceder de trituración de piedra de cantera, natural o de fuentes naturales de arena.

Cemento asfáltico: Material de propiedades aglutinantes e impermeabilizantes, posee características de flexibilidad, consistencia, adhesividad y durabilidad y a su vez es susceptible a cambios de temperatura.

Polvo de Acero: Se denominará polvo de acero al material proveniente de las metalúrgicas, libre de restos de componentes adversos, cuyo tamaño es menor a 1mm de diámetro.

1.3.5.2. Propiedades: Característica mensurable capaz de calificar un comportamiento o una respuesta del mismo a sollicitaciones externas.

Fluencia: Es la deformación total expresada en mm que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla, se mide con la prensa del ensayo Marshall.

Estabilidad: Esta propiedad se refiere a la capacidad de las mezclas asfálticas para resistir la deformación y el desplazamiento, debido a carga de tráfico vehicular calculada en libras en la prensa del ensayo Marshall.

1.3.6. Definición operacional

Tabla 1. Operacionalización de las variables

Variable	Indicador	Medición	Rango de variabilidad
Agregado	Cantidad de material de acuerdo al tipo de mezcla a realizar	Mezcla convencional: gr	(Especificaciones de la Norma ASTM)
		Mezcla Modificada: gr	
Cemento Asfáltico		Porcentaje %	(Norma AASTHO)
Polvo de Acero	Cantidad de polvo de acero	Porcentaje de peso al total de la mezcla	0,5-14%
Propiedades	Estabilidad	Kg	(Especificaciones de la Norma ASTM)
	Fluencia	1/100"	

Fuente: Elaboración propia

1.4. Diseño metodológico

1.4.1. Componentes

1.4.1.1. Unidades de estudio

Está definida por los procedimientos realizados a las mezclas asfálticas, las cuales se realizan por diferentes ensayos de laboratorio.

Caracterización de los agregados

Análisis granulométrico (ASTM D-422)

Porcentaje de caras fracturadas (ASTM D5821-95)

Equivalente de la arena y finos (ASTM D 2419)

Abrasión de agregado grueso máquina de Los Ángeles (ASTM C-131)

Peso específico de agregado fino (ASTM D-128).

Peso específico y absorción agregado grueso (ASTM D-127).

Caracterización del cemento asfáltico

Penetración muestra original 25°C (ASTM D-5)
 Vaso abierto Cleaveland, Punto de inflamación (ASTM D-92)
 Viscosidad Saybolt Furol a 135°C (ASTM D-102)
 Solubilidad en tricloroetileno % (ASTM D-2042)
 Ductilidad 25°C (ASTM D-113)
 Ensayo de la mancha heptanoxilol, (20% máximo de xilol) (AASHTO T-102)
 Ensayo de horno de película delgada (ASTM D-1754)
 Penetración del residuo de pérdida por calentamiento % original (ASTM D-5)
 Porcentaje de agua (AASHTO T-55)
 Índice de susceptibilidad térmica (-)
 Variación en masa, máximo (ASTM D-25872)
 Aumento del punto de ablandamiento, máximo (ASTM D-36)
 Viscosidad Brookfield, 135°C, SP 21 mín. 20rpm (ASTM D-4402)

Diseño de mezcla asfáltica

Método Marshall (ASTM D 1559) (AASHTO T-225)

1.4.1.1.1. Población

La población son las muestras de laboratorio, convencionales y modificadas con porcentaje de residuo de polvo de acero.

1.4.1.1.2. Muestra

La muestra son los ensayos de laboratorio que se realizó en el presente análisis.

Análisis granulométrico (ASTM D-422)
 Porcentaje de caras fracturadas (ASTM D5821-95)
 Equivalente de la arena y finos (ASTM D 2419)
 Abrasión de agregado grueso máquina de Los Ángeles (ASTM C-131)
 Peso específico de agregado fino (ASTM D-128).
 Peso específico y absorción agregado grueso (ASTM D-127).
 Penetración muestra original 25°C (ASTM D-5)
 Vaso abierto Cleaveland, Punto de inflamación (ASTM D-92)

Viscosidad Saybolt Furol a 135°C (ASTM D-102)

Ductilidad 25°C (ASTM D-113)

Método Marshall (ASTM D 1559) (AASHTO T-225)

1.4.1.1.3. Muestreo

Se realiza la cuantificación de las propiedades de estabilidad y fluencia, tanto de una camada de prueba de mezcla asfáltica convencional y una serie de camadas de muestra de mezclas asfálticas modificadas con adición de polvo de acero, mediante el ensayo de Marshall en laboratorio.

1.4.2. Métodos y técnicas empleadas

El método de investigación empleado en el presente análisis es el experimental.

1.4.2.1. Definición del método empleado

El método de investigación Experimental permite verificar la hipótesis mediante la manipulación “deliberada” por parte del investigador de las variables independientes, que producirán modificaciones en el comportamiento de las variables dependientes, mediante las siguientes formas:

Presencia – Ausencia: La investigación experimental es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (agente físico que desencadena una reacción¹), (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente).²

Implica que al grupo experimental se le aplica “estímulo” y al grupo de control no, en este caso la incorporación de aditivo de un nuevo material a las mezclas asfálticas convencionales para lograr la mejora o modificación de estas con adición de polvo de acero.

Intensidad: Así también, se aplican diferentes niveles en porcentaje de variable independiente (polvo de acero), para verificar el efecto que provoca en las variables dependientes.

¹ <http://dle.rae.es/?id=GsuKeNa>

² Fidias G. Arias, (Ed) (2012), El proyecto de investigación, Caracas – República Bolivariana de Venezuela: Episteme C.A. pp. 24.

1.4.2.2. Técnicas de muestreo

La técnica de muestreo es No Probabilística espontanea. Se selecciona de manera informal los objetos de estudio de más fácil acceso, es por esto que en consecuencia se tiene la imposibilidad de realizar afirmaciones con severidad estadística en la población.

1.4.2.3. Descripción de los instrumentos para la obtención de datos

Los instrumentos más importantes que se utilizan para la obtención de datos son los ensayos a realizarse en laboratorio, se mencionan a continuación.

Caracterización de agregados pétreos

Análisis granulométrico de los agregados por tamizado (ASTM D-422)

Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821-95)

Equivalente de arena y agregados finos (ASTM D 2419)

Desgaste de Los Ángeles (ASTM E-131)

Peso específico de los suelos (ASTM D-854)

Caracterización de cemento asfáltico

Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol (ASTM E-102).

Ensayo de penetración (ASTM D-5).

Ensayo de ductilidad (ASTM D-113).

Ensayo de punto de inflamación (ASTM D-92).

Ensayo de peso específico (ASTM D-70).

Ensayos de estabilidad y fluencia

Método Marshall (ASTM D-1559).

1.4.2.4. Procedimientos de aplicación

1.4.2.4.1. Criterio de porcentaje de polvo de acero

Es inexistente una recomendación en cuanto a ensayos de mezclas asfálticas modificadas con porcentaje de polvo de acero, por lo que el criterio que se toma, parte específicamente referido al costo-beneficio en cuanto a su realización práctica.

Es por esto que los porcentajes que se utilizan en el presente análisis tienen la finalidad de encontrar el menor porcentaje factible que pueda mejorar cualitativamente las mezclas asfálticas a un bajo costo.

Se harán variar los porcentajes de aplicación en mezclas asfálticas en un rango de 0,5 a 14% de material de polvo de acero.

De esta manera, se logrará obtener un porcentaje aceptable, que en lo posterior podría ser aplicado en la realidad.

Con el criterio asumido, se procede a realizar la fabricación de mezclas asfálticas en caliente, adicionando porcentajes diferentes de polvo de acero y posteriormente se miden y analizan sus propiedades mediante el ensayo de Marshall en cuanto a:

Estabilidad

Fluencia

1.4.2.5. Modo de aplicación

Los áridos que se utilizaron en el presente estudio provienen del banco de agregados de la empresa Erika SRL., ubicada en El Rancho, y fueron caracterizados mediante pruebas convencionales en laboratorio.

Se obtuvo el cemento asfáltico de la Alcaldía Municipal de la Provincia Cercado y se caracterizó mediante ensayos de viscosidad, penetración, ductilidad, punto de inflamación y peso específico.

El polvo de acero proviene de los desechos generados por la industria metalúrgica de la región, se caracterizó mediante ensayos de granulometría.

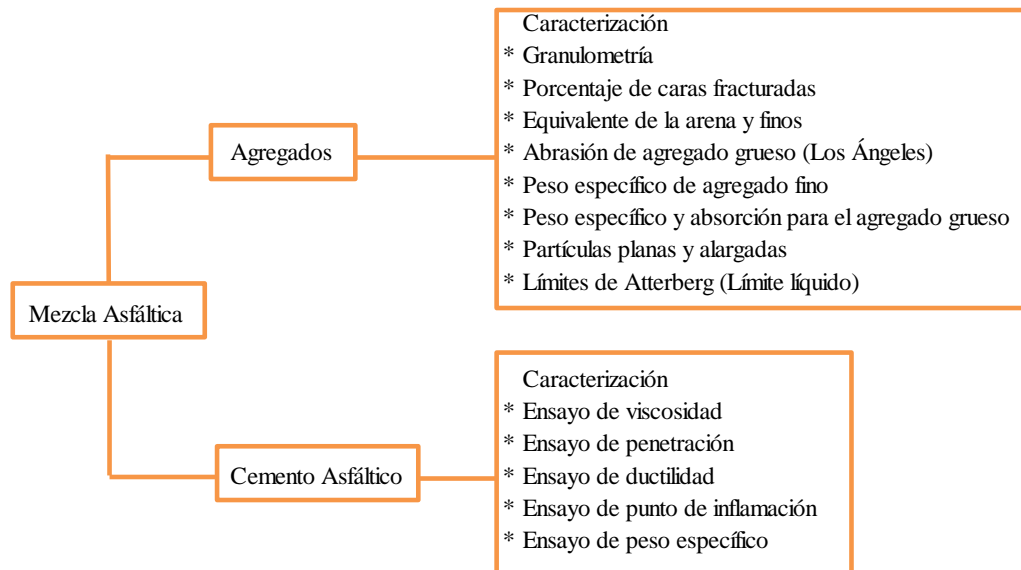
Se varía cantidad de polvo de acero en las mezclas asfálticas en diferentes porcentajes.

Se realiza tres ensayos por cada variación de porcentaje, de manera que se obtendrá representatividad en los especímenes analizados.

Se comparará el comportamiento y se evaluará la variación en las propiedades de estabilidad y fluencia de las mezclas asfálticas analizadas.

A continuación se muestra un resumen de los ensayos realizados a los materiales que conforman posteriormente las mezclas asfálticas:

Figura 1. Resumen de ensayos de caracterización



Fuente: Elaboración propia

1.4.2.5.1. Caracterización de los agregados:

Granulometría: Se realizarán 3 granulometrías de los agregados, de la cual se sacará un promedio para poder utilizarlo en la dosificación de las briquetas.

Porcentaje de caras fracturadas: Se realizarán 3 ensayos de porcentaje de caras fracturadas, para el agregado de 3/8 y 3/4.

Porcentaje de partículas laminadas: Se realizará un ensayo del porcentaje de partículas laminadas tomando una muestra representativa para el agregado de 3/8 y de 3/4.

Porcentaje de partículas chatas y alargadas: Se realizará un ensayo del porcentaje de partículas chatas y alargadas tomando una muestra representativa para el agregado de 3/8 y de 3/4.

Equivalente de la arena y agregado fino: Se realizarán 3 ensayos de equivalente de la arena, de los cuales se sacará un promedio el cual será utilizado para los siguientes cálculos.

Abrasión del agregado grueso máquina de los ángeles: Se realizará 1 ensayo para los tamaños nominales de agregados: 3/8" y 3/4".

Peso específico del agregado fino: Se realizarán 3 ensayos del agregado fino y posteriormente se sacará su promedio para utilizarlo en los cálculos.

Peso específico y absorción del agregado grueso: Se realizará 1 ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso de los agregados de 3/8" y 3/4" para posteriormente utilizarlo en los cálculos siguientes.

1.4.2.6. Caracterización del cemento asfáltico:

Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol: Se realizarán 3 ensayos de viscosidad del cemento asfáltico 85-100 y luego se obtendrá su promedio.

Ensayo de ductilidad: Se realizarán 3 ensayos de ductilidad del cemento asfáltico 85-100 y luego se obtendrá su promedio.

Ensayo de punto de inflamación: Se realizarán 3 ensayos del punto de inflamación del cemento asfáltico 85-100, del cual se obtendrá su promedio.

Ensayo de peso específico: Se realizarán 3 ensayos de peso específico del cemento asfáltico 85-100, del cual se obtendrá su promedio.

1.4.2.5. Mezcla asfáltica para determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Se realizan 15 pruebas, 3 por cada porcentaje tentativo de cemento asfáltico, se muestra en siguiente tabla:

Tabla 2. Variaciones del porcentaje de C.A.

Porcentaje de cemento asfáltico (% de CA)	Nro. de briquetas
4,5%	3
5,0%	3
5,5%	3
6,0%	3
6,5%	3
Total:	15

Fuente: Elaboración propia

1.4.2.6. Mezclas asfálticas convencionales

Se realizan 9 briquetas con mezcla asfáltica convencional 85/100.

1.4.2.7. Ensayo Marshall

Se realizan 3 briquetas por cada porcentaje de adición de polvo de acero. Estas varían desde 0,5 al 14%.

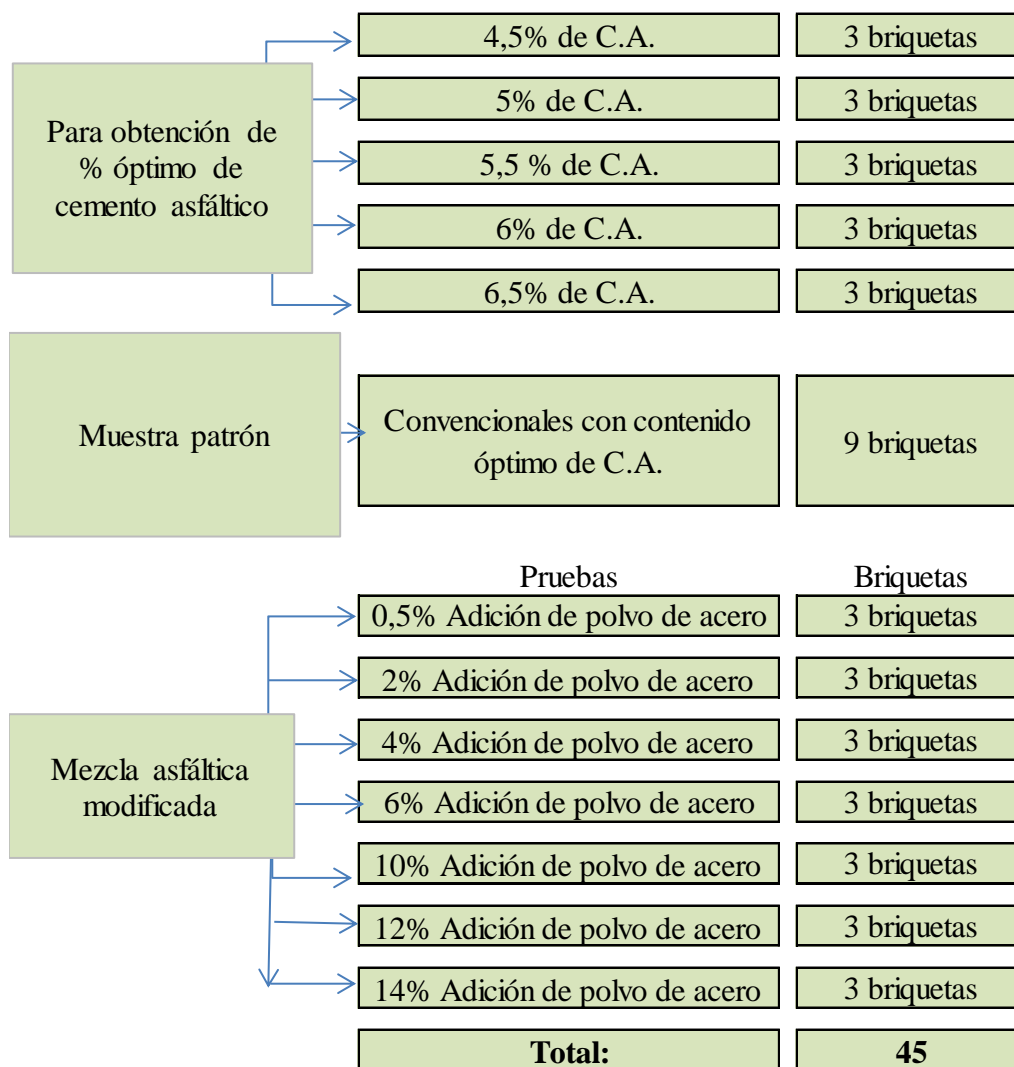
A continuación se indican el número de briquetas realizadas por cada variación de polvo de acero adicionado a la mezcla.

Tabla 3. Número de briquetas por porcentaje de adición de polvo de acero

Porcentaje de polvo de acero	Nro. briquetas
0,5%	3
2%	3
4%	3
6%	3
10%	3
12%	3
14%	3

Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Resumen del número de ensayos realizados



Fuente: Elaboración propia

1.4.3. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

1.4.3.1. Tratamiento de datos³

La investigación se realiza mediante el tratamiento de datos no probabilística espontanea.

Los análisis estadísticos se aplican a la información obtenida y se crean cuadros estadísticos según las variables estudiadas.

³ Metodología de la investigación científica para ingenieros, Ing. Manuel Borja Suárez, Chiclayo 2012 pág. 32

Estadística descriptiva: Se utilizan todas las herramientas conocidas.

La distribución de frecuencias

Las medidas de tendencia central

Las medidas de variabilidad

Se muestran las relaciones más importantes de la estadística descriptiva a continuación:⁴

Centralización: Indican valores con respecto a los que los datos parecen agruparse.

Media: Es la media aritmética (promedio) de los valores de una variable. Suma de los valores dividido por el tamaño muestra.

Conveniente cuando los datos se encuentran simétricamente con respecto a ese valor. Muy sensible a valores extremos. Centro de gravedad de los datos.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Mediana: Dado un conjunto de números agrupados en orden creciente de magnitud, la mediana es el número colocado en el centro del arreglo, de tal forma que una mitad de las observaciones está por encima y la otra por debajo de dicho valor. Si el número de observaciones es par, la mediana es la media de los dos valores que se hallan al medio del arreglo.

$$Me = \begin{cases} \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2}, & \text{si } n \text{ es par} \\ x_{(\frac{n+1}{2})}, & \text{si } n \text{ es impar} \end{cases}$$

Moda: Es un conjunto de números, la moda se define como el valor o número que ocurre con más frecuencia.

⁴ Introducción a la estadística, Wilfredo Caballero, San José de Costa Rica 1975

Desviación estándar: Es la raíz cuadrada de la varianza es la más usada de las medidas de dispersión.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Estadística inferencial: Se utilizan las siguientes herramientas estadísticas.

Varianza (σ)

$$V = (X_i - X_{\text{prom}})^2$$

Es el valor numérico que cuantifica el grado de dispersión de los valores de una variable respecto de una media aritmética.

Es el promedio de los cuadrados de las desviaciones de la variable respecto a su media aritmética.

Nota: La varianza nunca es negativa.

Cuando la variable toma un único valor; es decir, cuando constante entonces a varianza es cero.

Mientras más se aproxima a cero, más concentrados están los valores de la serie alrededor de la media. Por el contrario, mientras mayor sea la varianza, más dispersos están.

Coefficiente de variación (CV)

$$CV = \frac{S}{X_{\text{prom}}} * 100$$

Es la desviación estándar dividida sobre la media aritmética multiplicada por 100. El mismo permite comparar las desviaciones típicas de variables con unidades de medición distintas.

El coeficiente de variación se expresa en unidades independientes de la naturaleza variable.

Interpretación del coeficiente de variación

El coeficiente de variación, mide la variabilidad relativa a la media.

Expresa la proporción de variabilidad de una característica por cada unidad de la media.

En la práctica, se acostumbra considera la interpretación de un coeficiente de variación según la tabla.

Tabla 4. Interpretación del coeficiente de variación (CV)⁵

Valor del coeficiente de variación (%)	Interpretación del coeficiente	
	Variabilidad	Estabilidad
Igual a cero	Nula	Muy alta
Mayor de 0 hasta 20	Baja	Alta
Mayor de 20 hasta 60	Moderada	Moderada
Mayor de 60 hasta 90	Alta	Baja
Mayor de 90	Muy alta	Nula

Fuente: Métodos prácticos de inferencia estadística, Gildaberto Bonilla.

Tabla 5. Grado en que la media representa la serie

Valor del coeficiente de variabilidad	Grado en que la media representa a la serie
De 0 a menos de 10%	Media altamente representativa
De 10 a menos de 20%	Media bastante representativa
De 20 a menos de 30%	Media tiene representatividad
De 30 a menos de 40%	Media cuya representatividad es dudosa
De 40% a más	Media carente de representatividad

Fuente: Métodos prácticos de inferencia estadística, Gildaberto Bonilla

⁵ Métodos prácticos de inferencia estadística, Gildaberto Bonilla. UCA ediciones. 2a. ed. 1992, 4a. reimpresión 2005, San Salvador - El Salvador.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Asfalto

El asfalto es un material de color marrón oscuro a negro, cementante, termoplástico encontrado en un estado natural o fabricado en refinerías de petróleo por procesos de destilación atmosférica o vacío. El asfalto es sólido o altamente viscoso a temperatura ambiente. Es un material extremadamente complejo que contiene una gran cadena de componentes orgánicos de alto peso molecular.

Además que esta substancia también relacionada estrechamente con el petróleo, se caracteriza por tener una composición mucho menos uniforme en cuanto a la magnitud molecular. El asfalto se presenta en ciertas islas del Caribe (por ejemplo, lago de asfalto Trinidad) en el mar Muerto, en Neuchâtel (Suiza) y en otras regiones de la Tierra donde se forma yacimientos minerales de los que se extrae mediante explotaciones mineras, utilizándose (como los demás productos del tipo de la brea) como aglomerante para la construcción de pavimentos.⁶

El Asfalto de Penetración, también llamado Cemento Asfáltico, es el material por excelencia para la pavimentación, en virtud de sus propiedades y características. Es un material altamente cementante, termoplástico, repelente del agua y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales.

Para entender el comportamiento del ASFALTO producto del petróleo, es necesario conocer e interpretar el significado de sus propiedades físico – químicas a partir de su composición química, durante su fabricación para sus diferentes usos sea en pavimentación de carreteras y en la industria de recubrimientos:

2.1.1. Química del asfalto

Propiedades mecánicas

⁶ Tratado de química orgánica, F. Klages, Tomo 3. Pág. 26, 1961

Densidad

Propiedades eléctricas

Propiedades térmicas

Penetración

Punto de ablandamiento (PA)

Punto de inflamación

Los asfaltos tienen múltiples usos en la industria: en la preparación de mezclas asfálticas para pavimentación, como impermeabilizante y pinturas asfálticas, para techados de edificios y viviendas, revestimiento de diques y canales y materia prima para las emulsiones asfálticas entre otras. Por otro lado, es importante conocer la terminología de asfaltos de “pavimentación y especiales”, así como “Las clases y tipos de asfaltos” que existen, dando énfasis en esta oportunidad a los “Asfaltos Industriales” para uso de recubrimientos de “Techos”, sin embargo en la actualidad, el asfalto innovado tecnológicamente y con gran valor agregado con presencia de aditivos físicos y químicos, se usa en forma masiva en la industrial de recubrimientos de pisos, canales y tuberías entre otros.

2.2. 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.⁷

Los cementos de asfalto se consideran a menudo como un sistema coloidal que contiene varios constituyentes de hidrocarburos: asfaltenos, resinas y aceites. Se considera que las partículas de asfalto de alto peso molecular están cubiertas con una envoltura de resinas y dispersadas en el medio oleoso de peso molecular más bajo. Sin embargo, la disposición exacta de las partículas de asfalto dentro de la fase aceitosa variará dependiendo de las cantidades relativas de resina, asfalto y

⁷ Manual técnico para el diseño de carreteras en Bolivia de la ABC, Tomo 3 correspondiente a asfaltos. Glosario.

aceites. Es esta disposición y el grado de asociación entre las partículas de asfalto que rigen las propiedades reológicas del cemento.⁸

2.3. Refinación del asfalto

El crudo de petróleo varía en composición dependiendo de la fuente, produciendo diferentes tipos y cantidades de cemento asfáltico residual y otras fracciones destilables.

El crudo de petróleo puede clasificarse arbitrariamente de acuerdo a su gravedad API (American Petroleum Institute). La gravedad API es función de la densidad del material a 60°F y se obtiene de la siguiente expresión:

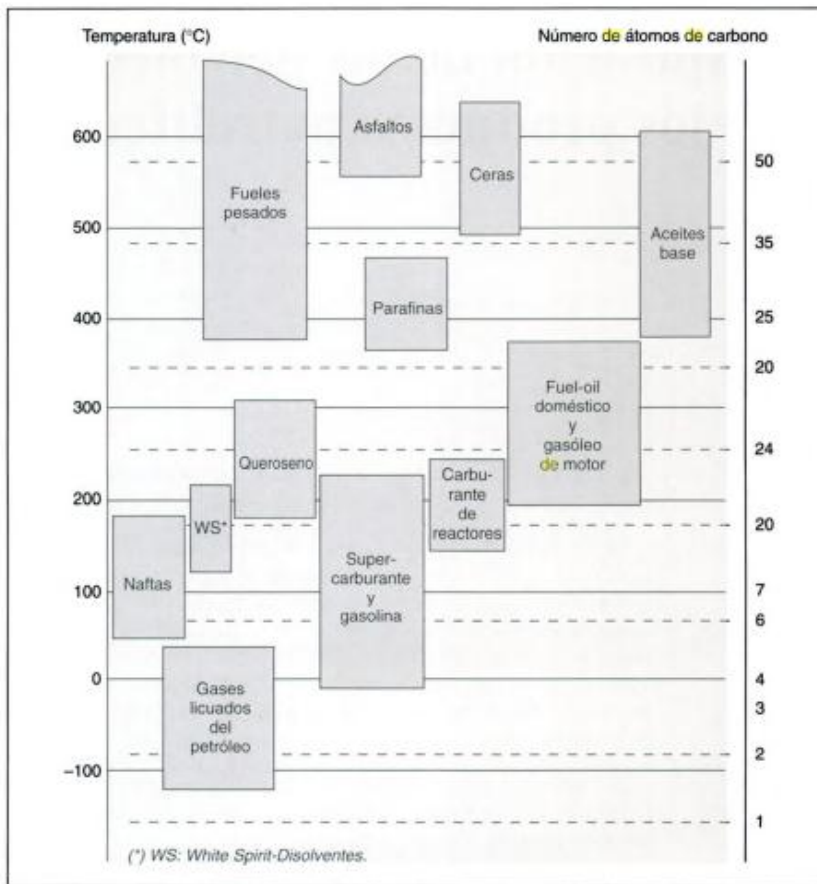
$$API_{\text{gravedad } (^\circ)} = \frac{141,5}{\text{gravedad específica}} - 131,5$$

La gravedad API del agua es 10. El asfalto, material más pesado, tiene una gravedad API entre 5 y 10, mientras que el API más liviano de la gasolina es alrededor de 55. Los procesos de refinación para la obtención de asfaltos dependen de las características del crudo y el rendimiento del asfalto que presentan. Los crudos de petróleo pesados con API menor a 25 resultan en mayores porcentajes de cementos asfálticos, mientras que los petróleos livianos con API mayor a 25 arrojan menores porcentajes de asfaltos. La siguiente ilustración presenta los porcentajes de asfalto resultante de crudos típicos.

Para crudos muy pesados de altos rendimientos de asfalto, basta una etapa de destilación al vacío. Para crudos de rendimientos intermedios de asfalto será necesario dos etapas de destilación: una a presión atmosférica y otra al vacío. Para crudos muy livianos de bajo rendimiento de asfalto se requiere una etapa adicional a las dos anteriores, que es la etapa de extracción.

⁸ Manual Shell Bitumen UK, Riversdell House, Surrey, UK , Whiteoak (1990). Pág. 35

Figura 5. Principales productos petrolíferos, intervalos de temperatura de ebullición y de número de átomos de carbono



Fuente: El refinado del petróleo, Jean-Pierre Wauquier, 2004

2.4. Avances del cemento asfáltico

En los últimos los 10 años se han producido avances destacables en las mezclas bituminosas, entre los que se puede destacar:

Se impusieron los betunes modificados a la venta del orden de 150000 tn. al año. Empezaron a utilizarse los betunes tipo BM-1 no desarrollados anteriormente. Los avances en la técnica de los ligante modificados, suponen uno de los aspectos más notables de la técnica moderna de las carreteras. Se ha olvidado ya el planteamiento pasivo de ver que las aplicaciones se podían dar a los limitados betunes existentes y se ha pasado a una tecnología activa de diseño de betunes incorporando a ellos los modificadores necesarios que permitan obtener el ligante adecuado para cada situación, incluso para las más complicadas.

Se iniciaron a generalizar las emulsiones termo adherentes para riegos de adherencia. El renovado interés en estos riegos tuvo dos orígenes. Uno fue la percepción de que la falta de adherencia es consecuencia de muchos fallos en nuestras carreteras.

Otro aspecto fue la necesidad de colocar riegos de adherencia más espesos que los habituales para preservar entre otras cosas, la impermeabilidad del firme que algunas de las modernas capas de rodadura no aseguran. Inicialmente se intentó aumentar la dotación y asegurar la integridad de los riegos mediante las ex tendedoras con barra de riego incorporada, pero su precio elevado y las dificultades operativas impidieron que se generalicen. Las emulsiones termoadherentes, fabricadas con betún duro y en algunos casos con betunes modificados han terminado imponiéndose.

2.5. Caracterización de los materiales asfálticos

Las propiedades y características de los materiales asfálticos dependen de su estructura y composición química; pero dada su gran complejidad, estos materiales se caracterizan mediante ensayos empíricos para valorar las propiedades que tiene que poseer para emplearse como ligante en obra de carreteras.

Las propiedades fundamentales que tiene que poseer los asfaltos para su empleo en carretera son:

Carácter termoplástico: por acción de la temperatura su consistencia debe disminuir de manera que sean capaces de "mojar" y envolver los áridos. Al enfriarse debe adquirir la consistencia primitiva y dar cohesión a la mezcla.

Buen comportamiento mecánico y reológico para resistir las tensiones impuestas por el tráfico y poder mantener a las temperaturas de servicio, la estructura de la mezcla asfáltica.

Resistir al envejecimiento frente a los agentes atmosféricos y condiciones ambientales para conservar sus propiedades con el tiempo.

2.6. Adhesividad a los áridos

Para que el asfalto se adhiera a los áridos es necesario en primer lugar, que haya un buen contacto entre la superficie del árido y el asfalto, en segundo lugar, que existan fuerzas de atracción entre ambos.

La adhesividad árido-ligante es un fenómeno muy complejo que depende de la naturaleza tanto del árido como del asfalto, así como de las condiciones específicas de estos materiales en la obra (limpieza y contenido de humedad del árido, temperatura de mezclado, etc.).

2.7. Reología del asfalto

La reología se encarga de estudiar la fluencia y la deformación de la materia. En sentido más estricto, la reología mide la deformación de los cuerpos que no son ni sólidos ni líquidos, es decir, de cuerpos intermedios entre sólido elástico y líquido viscoso.

Los materiales bituminosos se asumen como cuerpos ideales y elásticos.

Se usan los materiales bituminosos en condiciones donde el modelo elástico no tiene más validez.

Se puede obviar fenómenos secundarios en los que la teoría elástica no tiene importancia. Acero y hormigón no son elásticos, existe una relajación los aceros y variaciones en el hormigón.

2.8. Mezclas asfálticas

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.

El Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de Norteamérica, describe al asfalto como un cemento fuerte, fácilmente adhesivo, altamente impermeable, y durable. Es una sustancia plástica que proporciona una flexibilidad controlable a las mezclas de material mineral con las que usualmente se combina. No obstante que es un sólido o semisólido, en condiciones normales de temperatura ambiental el asfalto puede ser fácilmente licuado mediante aplicación de calor. El asfalto se considera como un cemento bituminoso, debido al hecho de que está constituido por hidrocarburos.

2.9. Tipos de mezclas asfálticas

Existen varias clasificaciones de mezclas asfálticas, de acuerdo con el parámetro considerado para establecer las diferencias. Así, conforme las fracciones de agregado pétreo empleado en la elaboración de la mezcla, éstas se dividen en mástico asfáltico; mortero asfáltico; macadam asfáltico; y concreto asfáltico. Si la temperatura es considerada, se dividen en mezclas en frío y mezclas en caliente. Si el parámetro considerado es el porcentaje de vacíos de aire, las mezclas pueden ser densas o cerradas; semidensas o semicerradas; abiertas y porosas, dependiendo de si tienen menos del 6%, entre el 6 y el 12% de vacíos de aire, entre el 12 y el 18% o más del 20%, respectivamente. Otra clasificación se establece de acuerdo con la estructura de los agregados pétreos; así, se tienen mezclas con o sin esqueleto mineral. Si se considera la curva granulométrica, se clasifican en mezclas asfálticas continuas o mezclas discontinuas. La mezcla asfáltica en caliente se tipifica así, porque tanto el agregado pétreo, como el asfalto, se calientan antes del mezclado; es un tipo de mezcla compuesta por un 93 a 97 % de agregado pétreo y por un 3 a 7 % de asfalto, con respecto a la masa total de la mezcla.

2.10. 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 (Cepeda, 2002). Para una aplicación específica e independientemente del procedimiento de diseño empleado, las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica en caliente son:

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

2.11. Diseño de una mezcla asfáltica

El objetivo principal del diseño de mezclas asfálticas de pavimentación, consiste en determinar una combinación y graduación económica de asfalto y agregados (dentro de los límites de las especificaciones del proyecto) que produzcan una mezcla con:

- ✓ Suficiente asfalto para proporcionar un pavimento durable.
- ✓ Buena estabilidad para satisfacer las demandas de tránsito sin producir deformaciones o desplazamientos.
- ✓ Suficiente trabajabilidad para evitar la segregación al momento de colocación.
- ✓ Un contenido de vacíos lo suficientemente alto, para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas producidas por el paso de vehículos sin que se produzca exudación.

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

Se han desarrollado algunos métodos de proporcionalidad de asfalto y agregado para una mezcla asfáltica en caliente. Siendo el más conocido el método Marshall.

2.12. Mezclas asfálticas en caliente

Los ensayos de áridos, además de fijar las características de forma, tamaño, granulometría, resistencia mecánica y resistencia a la alterabilidad, deben fijarse como objetivo la utilización de áridos exentos de suciedad, polvo y sobre todo finos arcillosos que rebajan extraordinariamente las características mecánicas de las mezclas. Para ello en caso de duda debe hacerse un análisis macroscópico o mineralógico de los finos para comprobar que estos no son activos.

2.13. Materiales pétreos que se emplean en las capas de pavimento

Los materiales que se emplean en la construcción de capas para carpetas en pavimentos flexibles se pueden clasificar en los grupos siguientes:

Materiales naturales, que requieren uno o varios de los siguientes tratamientos: disgregado, trituración o lavado.

Mezcla de dos o más materiales del grupo anterior.

2.14. El cemento asfáltico

El cemento asfáltico a emplearse debe ser un asfalto duro, con punto de ablandamiento alto. De esta forma se puede tener un valor de penetración en un rango de 10 a 30 décimas de milímetro y un punto de ablandamiento cercano a 70°C. Para obtener ligante duros de destilación directa en algunas ocasiones es necesario modificar el proceso en la refinería. Una alternativa a los asfaltos de destilación usada internacionalmente es la del soplado ligero de una mezcla de asfalto de desasfaltado y extractos aromáticos, con lo cual se obtienen asfaltos duros.

2.15. El clima

Los factores climatológicos que afectan a un pavimento son las lluvias y cambios de temperatura.

Las lluvias por su acción directa en la elevación del nivel freático influyen en la resistencia, la compresibilidad y los cambios volumétricos de los suelos de subrasante

especialmente. Este parámetro también influye en algunas actividades de la construcción tales como el movimiento de tierras y la colocación y compactación de capas granulares y asfálticas.

Los cambios de temperatura en las losas de pavimento rígidos ocasionan en éstos esfuerzos muy elevados, que en algunos casos pueden ser superiores a los generados por las cargas de los vehículos que circulan en ellas.

En los pavimentos flexibles y dado que el asfalto tiene una alta susceptibilidad térmica, el aumento o la disminución de temperatura puede ocasionar una modificación sustancial en el módulo de elasticidad de las capas asfálticas, ocasionando en ellas y bajo condiciones especiales, deformaciones o agrietamientos que influirían en el nivel de servicio de la vía.

2.16. Marco normativo

2.16.1. Caracterización de los materiales asfálticos

Las propiedades fundamentales que tiene que poseer los asfaltos para su empleo en carretera son:

- ✓ Carácter termoplástico, por acción de la temperatura su consistencia debe disminuir de manera que sean capaces de "mojar" y envolver los áridos. Al enfriarse debe adquirir la consistencia primitiva y dar cohesión a la mezcla.
- ✓ Buen comportamiento mecánico y reológico para resistir las tensiones impuestas por el tráfico y poder mantener a las temperaturas de servicio, la estructura de la mezcla asfáltica.
- ✓ Resistir al envejecimiento frente a los agentes atmosféricos y condiciones ambientales para conservar sus propiedades con el tiempo.

2.16.2. Ensayos empíricos de consistencia

La caracterización de las propiedades reológicas de los asfaltos, se realizan habitualmente mediante una serie de ensayos empíricos de fácil ejecución .A continuación se expone muy brevemente los más usuales.

2.16.2.1. Ensayo de viscosidad

Consiste en determinar el tiempo en segundos que demora en fluir 60 ml de muestra, a través de un orificio calibrado, medido bajo condiciones cuidadosamente controladas. El tiempo obtenido se corrige por un factor que depende de la abertura del orificio, el cuál es reportado como la viscosidad de la muestra a la temperatura de ensayo.

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método ASTM E-102

2.16.2.2. Ensayo de penetración

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100 gr y que la carga se aplica durante 5 seg. La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal. Es evidente que cuanto más blando sea el asfalto mayor será la cifra que indique su penetración.

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

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D5 - AASHTO T49-97).

2.16.2.3. Ensayo de ductilidad

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elongación) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra y de la forma descrita en 1 se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. Al contrario que otra condición se especifique,

el ensayo se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5$ °C y a una velocidad de 5 cm/min \pm 5%. Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad.

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D-113 AASHTO T51-00).

2.16.2.4. Ensayo de punto de inflamación

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja, a la cuál el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan sólo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método (ASTM D-92).

2.16.2.5. Ensayo de peso específico

Aunque normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del asfalto que se emplea. Este conocimiento es útil para hacer las correcciones de volumen cuando este se mide a temperaturas elevadas. Se emplea también como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactadas. El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Así, un peso especificado de 1.05 significa que el material pesa 1.05 veces lo que pesa el agua a temperatura fijada. Todos los líquidos y la mayor parte de los sólidos sufren cambios de volumen cuando varía la temperatura. Se expansiona cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. Para fijar condiciones determinadas aplicables a un valor dado del peso específico, debe indicarse la temperatura del material y la del agua. Así por ejemplo P.E. a 25/25 °C indica que la determinación se ha hecho con ambos materiales a una temperatura de 25° C.

El peso específico del asfalto se determina normalmente por el método del picnómetro, descrito en los métodos ASTM D-70.

2.16.2.6. Método de diseño Marshall

El método Marshall sólo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación, que usan cemento asfáltico clasificado por penetración o viscosidad y que contienen agregados con tamaño máximo de 25 mm (1 pulgada). Puede ser usado para el diseño en laboratorio o para el control de campo de pavimentos. Se deben utilizar probetas 64 × 102 mm de diámetro.

Los dos datos más importantes del diseño de mezclas del método Marshall son:

Análisis de la relación vacíos - densidad

Prueba de estabilidad- flujo de las muestras compactadas.

A continuación se presenta la metodología seguida en el diseño realizado.

Caracterización de agregados

Análisis granulométrico (ASTM D-422).

Porcentaje de caras fracturadas (ASTM D5821-95)

Equivalente de la arena y finos (ASTM D 2419)

Abrasión de agregado grueso máquina de los Ángeles(ASTM C-131)

Peso específico de agregado fino (ASTM D-128).

Peso específico y absorción agregado grueso (ASTM D-127).

2.17. Marco conceptual⁹

Los materiales para hacer la mezcla asfáltica se muestran a continuación, así también el concepto de cada uno de ellos:

2.17.1. Agregados grueso

Se denominará agregado grueso a la porción del agregado retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4). Para esta investigación debe ser procedente de trituración.

⁹ Manual técnico para el diseño de carreteras en Bolivia de la ABC, Tomo 3 correspondiente a asfaltos. Glosario.

2.17.2. Agregado fino

Se denomina agregado fino a la porción comprendida entre los tamices de 4,75mm (No. 4) y 75 μm (No. 200). El agregado fino deberá proceder de trituración de piedra de cantera, natural o de fuentes naturales de arena.

2.17.3. Fíller

Polvo mineral fino que podrá ser cemento hidráulico, cal u otro material inerte, libre de materia orgánica y partículas de arcilla. Debe cumplir la siguiente granulometría: Para tamices de 0,63; 0,315 y 0,08 el porcentaje que pasa en peso es de 100, 95 a 100 y 70 a 100% respectivamente

2.17.4. Cemento asfáltico

El asfalto es un material de propiedades aglutinantes e impermeabilizantes, tiene características de flexibilidad, consistencia, adhesividad y durabilidad, pero es susceptible a cambios de temperatura.

2.17.5. Acero¹⁰

El acero es una aleación hierro-carbono que contiene más de 0,06% y hasta 1,9% de carbono, en la que todo el carbono es soluble en el hierro gamma a las temperaturas típicas. Se lo clasifica en:

a) Los aceros al carbono que a su vez se subdividen en:

I) Aceros suaves o de bajo carbono, conteniendo hasta 0,4 % C.

II) Aceros semiduros, conteniendo hasta 0,6% C.

III) Aceros duros, conteniendo hasta 1,1 % C.

IV) Aceros extraduros, con más de 1,1 % C.

b) Los aceros aleados se denominan de acuerdo con los metales más importantes que contienen o el uso a que se destinan o sus propiedades. Ej.: aceros al cromo, aceros al níquel, al tungsteno, al molibdeno.

¹⁰ ESTRATEGIA NACIONAL PARA EL HIERRO Y EL ACERO, Fernando Baptista Gumucio, Mutun Santa Cruz y Cochabamba, 1982. pág. 137, 138 y 139

Acero crudo: Es el acero procedente de cualquier tipo de horno de aleación y comprende tanto el acero en lingotes como el procedente de colada continua en forma de palanquilla u otros productos. Se mide en toneladas.

Acero primario: Es el acero que se produce por afinación (aceración) del arrabio.

Acero colado: Es el acero vertido en un molde par tomar una forma determinada.

Acero inoxidable: Es el acero que contiene un mínimo de 12% de cromo, pudiendo contener otros elementos de aleación. Se clasifican en 4 categorías: ferríticos, martensíticos, austeníticos y de endurecimiento por precipitación de acuerdo a sus características micro-estructurales. Tiene alta resistencia a la corrosión y a temperaturas elevadas.

Arrabio (o hierro de primera fusión): Es el hierro producido por reducción de minerales de hierro en el alto horno, es un producto frágil y no forjable, que sale líquido del horno se vacía en forma de lingotes mediante una máquina lingoteadora. Según su composición y destino se les clasifica en: arrabio para aceración o básico y arrabio para fundición.

Las propiedades del acero se mencionan a continuación:

Resistencia al desgaste: Es la resistencia que ofrece un material a dejarse erosionar cuando está en contacto de fricción con otro material.

Tenacidad: Es la capacidad que tiene un material de absorber energía sin producir fisuras (resistencia al impacto).

Maquinabilidad: Es la facilidad que posee un material de permitir el proceso de mecanizado por arranque de viruta.

Dureza: Es la resistencia que ofrece un acero para dejarse penetrar. Se mide en unidades BRINELL (HB) o unidades ROCKWEL C (HRC), mediante test del mismo nombre.

El hierro se produce silicato de calcio, llamado también escoria. El hierro y la escoria se separan por gravedad, ya que la escoria es menos densa y flota sobre el metal. El Acero es una mezcla de metales (aleación) formada por varios elementos químicos, principalmente hierro y carbón como componente minoritario (desde el 0,25% hasta el 1,5% en peso). El acero inoxidable se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión. Es una mezcla de metales (aleación), formada por hierro p.

Es imposible especificar las propiedades del polvo de acero que se utiliza en el presente análisis, ya que los residuos de este provienen de desechos de la industria metalúrgica de la región y esta mezcla puede contener polvo de acero negro, polvo de acero inoxidable, polvo de lija, virutas, residuos de soldadura y otros, que posterior a su acopio deberán ser procesados en laboratorio para extraer de ellos una parte representativa de polvo descontaminado, que no presente residuos que puedan, en lugar de mejorar la mezcla asfáltica, desmejorarla.

No obstante es posible realizar una “descontaminación” de los residuos adversos para el análisis de mezclas asfálticas presentes en el material en laboratorio, la mezcla de polvo no es uniforme y es incierto en cuanto a su calidad y proporción en mezcla de uno y otro tipo de acero, así como también forma de fabricación y procedencia o más importante aún, formación química y mineralógica.

No obstante lo antes expuesto se deberá realizar el ensayo de granulometría para determinar la curva granulométrica y de esta manera analizar los porcentajes de los distintos tamaños que conforman el conjunto de muestra que se utilizará.

2.18. Propiedad

Es una característica mensurable capaz de calificar un comportamiento o una respuesta del mismo a sollicitaciones externas.

A continuación se hace mención a las propiedades que se cuantificarán en la prueba de carga del ensayo Marshall.

2.18.1. Fluencia

Es la deformación total expresada en mm que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla.

Entonces, el flujo es el movimiento total del prototipo, en unidades de 0,01 pulgada durante la prueba de estabilidad, a medida que la carga se incrementa del cero al máximo.¹¹

2.18.2. Estabilidad

La estabilidad se define como la resistencia máxima a la carga N en libras que el prototipo va a alcanzar a 140°F bajo condiciones especificadas.¹²

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.

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.

¹¹ Ingeniería de tránsito y carreteras, Nicholas J. Garber y Lester A. Joel, 2005. Pág. 949.

¹² Ingeniería de tránsito y carreteras, Nicholas J. Garber y Lester A. Joel, 2005. Pág. 950.

CAPÍTULO III
RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

3. RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Criterios

3.1.1. Selección de banco de materiales

Se utilizó material pétreo proveniente del banco de agregados de la Empresa Erika SRL, ubicada en El Rancho, debido a que este material cumple con las especificaciones para elaborar mezclas asfálticas convencionales, éstos se muestran a continuación:

Porcentaje de Filler entre 6 y 9

Porcentaje de agregado $\frac{3}{4}$ ", mayor a 75

Además que su disponibilidad es permanente.

3.1.2. Uso de polvo de acero

Se utilizó los *residuos* de polvo de acero producidas en instalaciones de la empresa MACOMET, ubicada en el barrio San Jorge de la ciudad de Tarija, ya que se trata de un taller metalúrgico de grandes proporciones y genera grandes cantidades de residuos de este material semanalmente. Además de que la gerencia mostró interés en el desarrollo del presente análisis y no limitará la provisión de material para la realización del presente estudio.

Cabe mencionar también que dichas instalaciones se encuentran totalmente cubiertas con estructura metálica, protegiendo de los agentes atmosféricos que pudieran afectar negativamente los residuos de polvo de acero. Es así que se extrajo muestras libres de oxidación o algún otro agente perjudicial.

3.1.3. Variación del porcentaje de polvo de acero

Preliminarmente se determinó el porcentaje óptimo de cemento asfáltico con una camada de prueba de 15 probetas.

Posteriormente se realizó el ensayo de estabilidad y fluencia con la prensa Marshall de una camada compuesta con 3 briquetas por cada uno de los siguientes porcentajes de adición de polvo de acero: 0,5%, 2%, 4%, 6%, 10%, 12% y 14%.

3.1.4. Cemento asfáltico

En nuestro medio es común el uso de cemento asfáltico BETUNEL 85/100 y su disponibilidad es permanente, por lo que se utilizó dicha marca de cemento asfáltico.

3.1.5. Ensayos realizados

3.1.5.1. Caracterización de agregados

Granulometría.- Se realiza una granulometría para cada tipo de agregado, es decir; arena, gravilla y grava.

Porcentaje de caras fracturadas.- Se realiza un ensayo para el agregado 3/8" y uno para el agregado 3/4".

Porcentaje de partículas laminadas.- Se realiza un ensayo para el agregado 3/8" y 3/4".

Porcentaje de partículas chatas y alargadas.- Se realiza un ensayo para el agregado 3/8" y 3/4".

Equivalente de arena y agregado fino.- Se realizan tres ensayos y se promedian resultados.

Abrasión del agregado grueso, desgaste de Los Ángeles.- Se realiza un ensayo para el agregado 3/8" y 3/4".

Peso específico del agregado fino.- Se realiza tres ensayos para el agregado fino y se promedian resultados.

Peso específico y abrasión del agregado grueso.- Se realiza tres ensayos para el agregado 3/8" y tres para el agregado 3/4".

Tabla 9. Resumen de ensayos, caracterización de agregados

Ensayo	Nro. de veces
Granulometría.	3
Porcentaje de caras fracturadas.	3
Porcentaje de caras laminadas.	1
Porcentaje de partículas chatas y alargadas.	1
Equivalente de arena.	3
Abrasión del agregado grueso.	1
Peso específico del agregado fino.	3
Peso específico del agregado grueso.	3

Fuente: Elaboración propia

3.1.5.2. Caracterización del cemento asfáltico

Ensayo de penetración.- Se realizan tres ensayos de penetración y se promedian resultados.

Ensayo de punto de inflamación.- Se realizan tres ensayos y se promedian resultados.

Ensayo de ductilidad.- Se realizan tres ensayos de ductilidad y se promedian resultados.

Ensayo de peso específico.- Se realizan dos ensayos y se promedian los resultados obtenidos.

Tabla 10. Resumen de ensayos, caracterización de cemento asfáltico

Ensayo	Nro. de veces
Penetración 25°C.	3
Punto de inflamación, vaso abierto Cleaveland.	3
Ductilidad 25°C.	3
Peso específico (gr/cm ³)	2

Fuente: Elaboración propia

3.1.5.3. Mezcla asfáltica para determinación de porcentaje óptimo de Cemento Asfáltico (% de CA)

Dosificación.- Se varía cinco veces el porcentaje de Cemento Asfáltico y se realiza tres briquetas por cada porcentaje, de acuerdo al siguiente detalle:

Tabla 11. Resumen de variación de porcentajes de CA para obtención del porcentaje óptimo

Porcentaje de cemento asfáltico (% de CA)	Nro. de briquetas
4,5	3
5	3
5,5	3
6	3
6,5	3
Total:	15

Fuente: Elaboración propia

Detalle de la investigación.- Se elaboraron nueve briquetas con mezcla convencional. Estas conforman la muestra patrón con las cuales se comparan las briquetas modificadas con porcentaje de polvo de acero.

Se evaluó estadísticamente las diferencias existentes en las propiedades de estabilidad y fluencia entre la muestra patrón y la modificada.

3.1.8. Levantamiento de la información

3.1.8.1. Ubicación de banco de materiales

Agregado pétreo.- El agregado pétreo procede del banco de materiales de la empresa constructora ERIKA, que se encuentra ubicado la comunidad de El Rancho, en la provincia Méndez del departamento de Tarija.

Cemento asfáltico.- El cemento asfáltico 85/100 que se utiliza en el presente análisis proviene de la Posta Municipal del Municipio Autónomo de la Provincia Cercado del Departamento de Tarija.

Polvo de acero.- Proviene de *residuos* de la industria metalúrgica de la ciudad de Tarija.

3.2. Ensayo en los agregados

A continuación se describen los ensayos y procesos realizados para la obtención de resultados de caracterización de los agregados.

3.2.1. Ensayo de determinación de porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821-95)

Definición.- Este método permite determinar la cantidad en porcentaje de peso de muestra, que tiene una o más de sus caras fracturadas.

Procedimiento.- Se pesa tres muestras de aproximadamente mil gramos para grava de $\frac{3}{4}$ " y para grava de $\frac{3}{8}$ ", posteriormente se separan las partículas que estén fracturadas en un porcentaje mayor a 25% de su superficie, además de separar también aquellas que presenten formas alargadas, laminadas o sean canto rodado.

Fotografía 1. Ensayo de caras fracturadas



Fuente: Fotografía de R. Montero. Tarija 2017

Para grava 3/8"

Tabla 12. Lecturas en ensayo caras fracturadas. Gravilla de 3/8"

Parámetro medido	Lecturas		
	1	2	3
Peso total (grs.) (a)	1016,9	993,6	993,1
Peso retenido en tamiz Nro. 8 (grs.) (b)	815,9	795	807,9

Fuente: Elaboración propia.

$$\% \text{ de caras fracturadas} = \frac{\text{Peso retenido en el tamiz Nro. N}^{\circ} 8}{\text{Peso total de la muestra}} * 100$$

$$\text{Promedio masa total} = \frac{1016,9 + 993,6 + 993,1}{3} = 1001,2 \text{ gr}$$

$$\text{Promedio Ret. tamiz N}^{\circ} 8 = \frac{815,9 + 795 + 807,9}{3} = 806,6 \text{ gr}$$

$$\% \text{ de caras fracturadas} = \frac{806,6}{1001,2} * 100 = 80,56\%$$

Tabla 13. Resultado ensayo de caras fracturadas. Gravilla de 3/8"

Detalle	Unidad	Lectura		
		1	2	3
Ensayo número:	-----	1	2	3
Peso total (a):	gr	1016,9	993,6	993,1
Peso retenido tamiz Nro. 8 (b):	gr	815,9	795	807,9
Caras no fracturadas (a-b):	gr	201	198,6	185,2
% Caras fracturadas (b/a)*100:	%	80,23	80,01	81,35

Promedio:	80,56	> 75 Cumple
------------------	--------------	-----------------------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Ensayo de laminaridad, gravilla 3/8"

Material	Peso Retenido (gr)	Peso retenido partículas laminares (gr)	% Retenido partículas laminares
3/8"	993,6	136,3	13,72
Peso total muestra:	993,6		
% Total de partículas laminares (Máximo 15%):			13,72

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Ensayo de determinación de partículas chatas y alargadas, grava 3/8"

Material	Peso retenido (gr)	Peso partículas chatas y alargadas (gr)	% Partículas chatas y alargadas
3/8"	993,6	55,8	5,62
Muestra total	993,6		
% Total de partículas chatas y alargadas (Máx 15%)			5,62

Fuente: Elaboración propia

Para grava 3/4"

Tabla 16. Resumen, ensayo de % de caras fracturas. Grava 3/4"

Detalle	Unidad	Lectura		
		1	2	3
Ensayo número:	-----	1	2	3
Peso total (a):	gr	1095	960	955
Peso retenido tamiz Nro. 8 (b):	gr	980,8	919,7	899,9
Caras no fracturadas (a-b):	gr	114,2	40,3	45,1
% Caras fracturadas (b/a)*100:	%	89,5	95,8	95,2

Promedio:	93,5	> 75 Cumple
------------------	-------------	-----------------------

Fuente: Elaboración propia

$$\% \text{ de caras fracturadas} = \frac{\text{Peso retenido en el tamiz Nro. N}^{\circ} 8}{\text{Peso total de la muestra}} * 100$$

$$\text{Promedio masa total} = \frac{1095 + 960 + 955}{3} = 1003,3 \text{ gr}$$

$$\text{Promedio Ret. tamiz N}^{\circ}8 = \frac{980,8 + 919,7 + 899,9}{3} = 933,47 \text{ gr}$$

$$\% \text{ de caras fracturadas} = \frac{933,47}{1003,3} * 100 = 93,04\%$$

Tabla 17. Ensayo de laminaridad, grava 3/4"

Material	Peso Retenido (gr)	Peso retenido partículas laminares (gr)	% Retenido partículas laminares
3/4"	1016,9	139,9	13,76
Peso total muestra:	1016,9		
% Total de partículas laminares (Máximo 15%):			13,76

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Ensayo de determinación de partículas chatas y alargadas, grava 3/4"

Material	Peso retenido (gr)	Peso partículas chatas y alargadas (gr)	% Partículas chatas y alargadas
3/4"	1016,9	50,7	4,99
Muestra total	1016,9		
% Total de partículas chatas y alargadas (Máx 15%)			4,99

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Equivalente de arena y agregados finos (ASTM D 2419)

Definición.- Porcentaje de arena propiamente tal con respecto al total de arena y de impurezas coloidales floculados, particularmente arcillosos, húmedas y eventualmente ferruginosas presentes en un pétreo fino (bajo tamiz 5mm).

Procedimiento.- Se debe tamizar el material con el tamiz Nro. 4 en estado natural, una cantidad representativa y separar de ella aproximadamente 40 gr mediante el método de cuarteo.

Se debe secar hasta masa constante en horno a una temperatura de 110+- 5°C; dejar enfriar a temperatura ambiente.

Después, en posición vertical se debe colocar el cilindro el tubo irrigador y proceder a introducir la solución con el uso del sifón hasta un nivel 100 ± 5 mm.

Verter la arena dentro de un cilindro graduado, en la medida de 85 ± 5 ml.

Se debe golpear ligeramente repetidas oportunidades para liberar lo más posible de aire atrapado en la porosidad de la muestra.

Dejar la probeta en reposo por un periodo de 10 min.

Colocar el tapón y aflojar la arena del fondo inclinando y sacudiendo el tubo.

Se agita la probeta y su contenido mediante agitación manual, sujetando la probeta en posición horizontal y agitar vigorosamente en un movimiento lineal horizontal con un desplazamiento de 230 ± 25 mm. Agitar 90 ciclos en aproximadamente 30 seg.

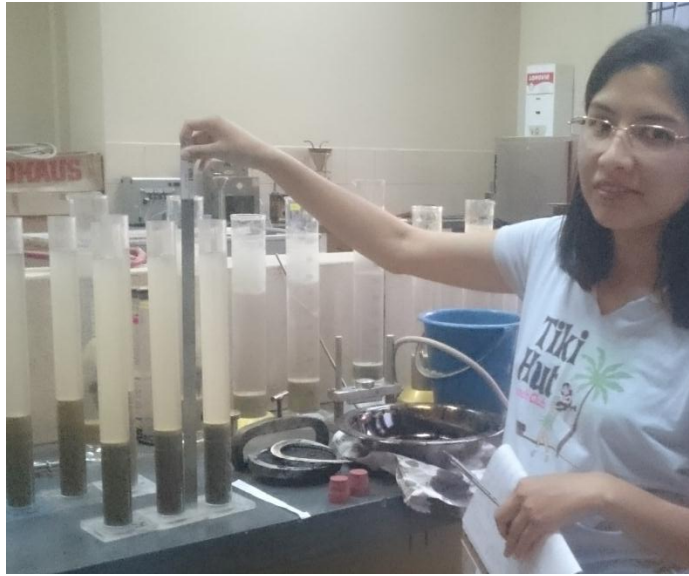
Colocar la probeta sobre una superficie plana y estable, destapar y lavar sus paredes con el tubo irrigador.

Se debe dejar sedimentar un periodo de $20 \text{ min} \pm 15 \text{ seg}$.

Al final del periodo de sedimentación se debe leer y registrar el nivel superior de la arcilla N_t aproximando al mm.

Se introduce un pisón en la probeta y se le hace descender lentamente hasta que quede apoyado en la arena. Se debe registrar el nivel superior de arena [Na] aproximado al mm.

Fotografía 2. Ensayo de equivalente de arena



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Tabla 19. Lecturas realizadas, ensayo equivalente de arena

Ensayo	Lecturas		
	1	2	3
Lectura Superior de arena N_a (cm)	11,4	11,7	11,7
Lectura Superior de arcilla N_t (cm)	12,25	12,7	12,55

Fuente: Elaboración propia

Fórmula utilizada:

$$EA\% = \frac{N_a}{N_t} * 100$$

Dónde:

EA% = Equivalente de arena (%).

N_a = Nivel superior de arena (mm).

N_t = Nivel superior de arcilla (mm).

Resultados:

Tabla 20. Resultados ensayo equivalente de arena

Promedio Na	11,6
Promedio Nt	12,5
EA (%)	92,8

Fuente: Elaboración propia

$$EA(\%)= 92,8\%$$

3.2.3. Ensayo para determinar el desgaste mediante desgaste la máquina de Los Ángeles (ASTM E-131)

Objetivo.- Determinar el desgaste producido en la superficie por pérdidas de material causadas por desgaste en la máquina de Los Ángeles.

Procedimiento.- Después de haber preparado la muestra de acuerdo a procedimiento de cuarteo se determina la granulometría.

La cantidad de material a utilizar se debe determinar de acuerdo a la tabla que se muestra más abajo.

Se ubica el material dentro del cilindro rotatorio de la máquina de Los Ángeles y una vez cumplido el número de revoluciones se retira el material, evitando pérdidas y contaminaciones.

Se procede a tamizar la muestra por el tamiz número 12, (1,7 mm).

Finalmente se debe lavar y secar hasta masa constante y se procede a hacer un nuevo pesaje.

Tabla 21. Grados de ensaye (definidos por sus rangos de tamaño, en mm)

Tamaño de partículas (mm)	1 (80-40)	2 (50-25)	3 (40-20)	4 (40-10)	5 (20-10)	6 (10-5)	7 (5-2,5)
Tamaño de las fracciones (gr)							
75-63	2,500+-50						
63-50	2,500+-50						
50-37,5	2,500+-50	5,000+-25					
37,5-25		5,000+-50	5,000+-25	1,250+-10			
25-19			5,000+-25	1,250+-25			
19-12,5				1,250+-10	2,500+-10		
12,5-9,5				1,250+-25	2,500+-10		
9,5-6,3						2,500+-10	
6,3-4,75						2,500+-10	
4,75-2,36							5,000+-10
Masa inicial de muestra (Mi)	10,000+-100	10,000+-100	10,000+-100	5,000+-10	5,000+-10	5,000+-10	5,000+-10
Esféras							
- Número	12			12	11	8	6
- Masa (gr)	5,000+-25			5,000+-25	4,584+-25	3,330+-25	2500+-15
Número de revoluciones	1,000			500			

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales asfaltos de la Administradora Boliviana de Carreteras, pp. 290

Fotografía 3 Muestra en ensayo de desgaste en máquina de Los Ángeles.

Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Fotografía 4. Muestra después de ensayo de desgaste en máquina de Los Ángeles



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Tabla 22. Datos iniciales para ensayo de desgaste de Los Ángeles

Tamiz	Masa inicial (gr)
Franja de trabajo	"3/4 y 1/2"
Masa inicial	5000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Datos obtenidos en ensayo de desgaste de máquina de Los Ángeles

Ensayo	Masa final (gr)
Masa después del desgaste*	3711,5

*(Después de tamizar por tamiz de 1/2", lavar y secar en horno hasta masa constante).

Fórmula utilizada:

$$P(\%) = \frac{(mi - mf)}{mi} * 100$$

Dónde:

P = Pérdida de masa de la muestra (%).

mi = Masa inicial de la muestra (gr).

mf = Masa final de la muestra (gr).

Resultados:

$$P (\%) = 25,77$$

3.2.4. Ensayo para determinar el peso específico de los suelos (ASTM D854)

Peso específico del agregado fino

Objetivo.- Determinar la densidad de partículas sólidas de suelos compuestos por partículas menores que 5mm.

Procedimiento.- Se separa y registra una porción de arena (pasa tamiz Nro.4), se seca en el horno y se registra su masa

Posteriormente se sumerge la muestra completamente en agua y se deja en reposo durante por lo menos 12 horas.

Transcurrido el tiempo mencionado anteriormente se deseca la muestra con un secador de aire caliente superficialmente y se introduce en un molde cónico y se compacta con ligeramente con 25 golpes de varilla.

Se introduce en un picnómetro graduado y se rellena con agua a 25°C hasta alcanzar dos tercios de su capacidad y se liberan las burbujas atrapadas en las porosidades del material, se pesa y registran estos valores.

Fotografía 5. Elaboración de ensayo de peso específico de agregado fino



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017

Tabla 24. Datos obtenidos en ensayo de peso específico del agregado fino

Detalle	Unidad	Lectura		
		1	2	3
Peso inicial de muestra	gr	490	491,2	490,1
Peso de frasco	gr	-	-	-
Peso muestra saturada con superficie seca	gr	500	500	500
Peso del agua	gr	826,6	826,6	826,6
Peso de muestra+agua	gr	1138,5	1137,6	1137,8

Fuente: Elaboración propia

De la anterior tabla se obtienen los siguientes promedios:

Tabla 25. Promedios de ensayos de peso específico del agregado fino

Detalle	Unidad	Promedio
Peso inicial de muestra	gr	490,4
Peso de frasco	gr	
Peso muestra saturada con superficie seca	gr	500,0
Peso del agua	gr	826,6
Peso de muestra+agua	gr	1138,0

Fuente: Elaboración propia

Se realizan los cálculos que siguen con los promedios obtenidos.

$$\text{Peso esp seco} = \frac{\text{Peso muestra seca}}{\text{Peso sup seca} + \text{Peso agua} - (\text{peso muestra} + \text{agua})}$$

$$\text{Peso específico seco} = \frac{490,4}{500 + 826,6 - 1138}$$

$$\text{Peso específico seco} = 2,6 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso esp saturado sup seca} = \frac{\text{Peso saturado sup seca}}{(\text{Peso sat sup seca} + \text{Peso agua}) - (\text{peso muestra} + \text{agua})}$$

$$\text{Peso específico saturado sup seca} = \frac{500}{500 + 826,6 - 1138}$$

$$\text{Peso específico saturado sup seca} = 2,7 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Tabla 26. Resumen de resultados de ensayo, peso específico del agregado fino

Descripción	Tamaño del agregado	Valor	Unidad
Peso específico seco	<5mm	2,6	gr/cm ³
Peso específico aparente	<5mm	2,7	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Peso específico del agregado grueso, grava 3/8"

Objetivo.- Determinar la densidad de partículas sólidas de suelos compuestos por partículas mayores que 5mm.

Procedimiento.- Se separa y registra una porción de arena (retenida tamiz Nro.4), se seca en el horno y se registra su masa.

Posteriormente se sumerge la muestra completamente en agua y se deja en reposo durante por lo menos 12 horas.

Se procede a registrar el peso de la muestra totalmente sumergida en agua, a una temperatura de 25°C, con el uso de balanza.

Una vez retirada del agua se procede a secar inmediatamente la superficie con un paño limpio y seco y se registra su peso en condición saturada con superficie seca.

Se obtienen los siguientes datos:

Tabla 27. Datos obtenidos en la práctica de peso específico del agregado grueso

Detalle	Unidad	Lectura	
		Grava 3/4"	Grava 3/8"
Peso inicial de muestra	gr	2043	1720
Peso muestra sumergida	gr	1276	1069
Peso muestra saturada con superficie seca	gr	2069	1740

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Peso esp seco (3/8")} = \frac{\text{Peso muestra seca}}{\text{Peso SSS} - (\text{peso muestra sumergida})}$$

$$\text{Peso esp seco (3/8")} = \frac{1720}{1740 - 1069}$$

$$\text{Peso esp seco (3/8")} = 2,56 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso esp SSS (3/8")} = \frac{\text{Peso muestra SSS}}{\text{Peso SSS} - (\text{peso muestra sumergida})}$$

$$\text{Peso esp SSS (3/8")} = \frac{1740}{1740 - 1069}$$

$$\text{Peso esp SSS (3/8")} = 2,59 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso esp Aparente (3/8")} = \frac{\text{Peso muestra seca}}{\text{Peso seco} - (\text{peso muestra sumergida})}$$

$$\text{Peso esp Aparente (3/8")} = \frac{1720}{1720 - 1069}$$

$$\text{Peso esp Aparente (3/8")} = 2,64 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso esp seco (3/4")} = \frac{\text{Peso muestra seca}}{\text{Peso SSS} - (\text{peso muestra sumergida})}$$

$$\text{Peso esp seco (3/4")} = \frac{2043}{2069 - 1276}$$

$$\text{Peso esp seco (3/4")} = 2,58 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso esp SSS (3/4")} = \frac{\text{Peso muestra SSS}}{\text{Peso SSS} - (\text{peso muestra sumergida})}$$

$$\text{Peso esp SSS (3/4")} = \frac{2069}{2069 - 1276}$$

$$\text{Peso esp SSS (3/4")} = 2,60 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso esp Aparente (3/4")} = \frac{\text{Peso muestra seca}}{\text{Peso seco} - (\text{peso muestra sumergida})}$$

$$\text{Peso esp Aparente (3/4")} = \frac{2043}{2043 - 1276}$$

$$\text{Peso esp Aparente (3/4")} = 2,66 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Tabla 28. Resultados obtenidos, ensayo de peso específico de agregado grueso

Descripción	Tamaño del agregado	Valor	Unidad
Peso específico seco	3/8"	2,56	gr/cm ³
Peso específico aparente	3/8"	2,64	gr/cm ³
Peso específico SSS	3/8"	2,59	gr/cm ³
Peso específico seco	3/4"	2,58	gr/cm ³
Peso específico aparente	3/4"	2,66	gr/cm ³
Peso específico SSS	3/4"	2,6	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Fotografía 6. Realización del ensayo de peso específico del agregado grueso, grava 3/4"



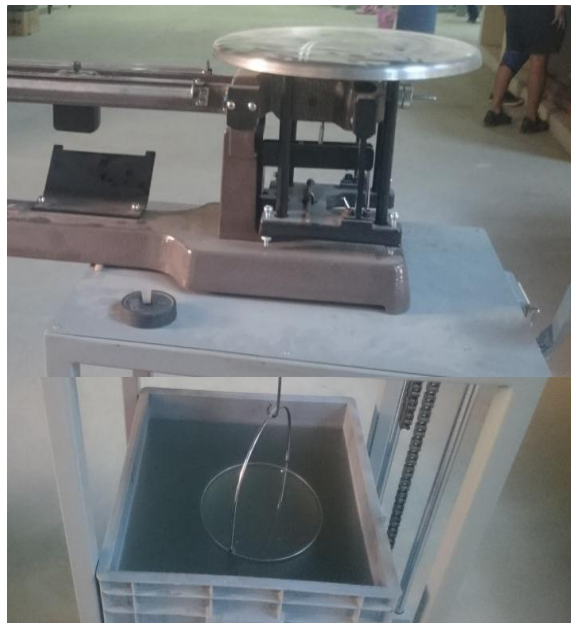
Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017, Tarija

Fotografía 7. Realización del ensayo de peso específico del agregado grueso, grava $\frac{3}{4}$ "



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Fotografía 8. Equipo utilizado para determinación de peso específico



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

3.3. Ensayos del ligante asfáltico

A continuación se muestran las especificaciones técnicas del cemento asfáltico utilizado en la presente investigación.

Tabla 29. Especificaciones técnicas, cemento asfáltico convencional 85/100 BETUNEL, origen Brasil

N°	Características	Detalle			Exigencia 85-100
		AASHTO	ASTM	NCh	
1	Penetración muestra original 25°C.	T-49	D-5	---	85-100
2	Vaso abiero Cleaveland, Punto de inflamación.	T-48	D-92	2338	> 232°C
3	Viscosidad Saybolt Furol a 135°C, seg	T-72	D-102	---	> a 85 seg
4	Solubilidad en tricloroetileno %	T-44	D-2042	2341	> a 99%
5	Ductilidad 25°C	T-51	D-113	2342	> a 100cm
6	Ensayo de la mancha heptanoxilol, (20% máximo de xilol)	T-102	---	2343	(-) Negativo
7	Ensayo de horno de película delgada.	T-179	D-1754	2346	> a 1
8	Penetración del residuo de pérdida por calentamiento % original	T-49	D-5	2340	> a 50
9	Porcentaje de agua	T-55	---	---	< a 0,2

Fuente: Betunel Indústria e Comércio Ltda. 2010. (CAP 85/100)

https://www.betunel.com.br/cap85100_espec.html

Seguidamente se muestran y se describen brevemente los ensayos realizados para caracterizar el ligante asfáltico 85/100.

3.3.1. Ensayo de penetración (ASTM D-5)

Índice de penetración.- Índice que se obtiene a partir de los valores de la penetración y del punto de ablandamiento anillo y bola de ligantes asfálticos modificados. Sirve como criterio de medida de la susceptibilidad de un asfalto modificado a los cambios de temperatura y de su comportamiento reológico.

Objetivo.- Este método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración, del ligante asfáltico 85/100.

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

Procedimiento.- Se coloca el ligante a ensayar de manera conveniente en el interior de tres recipientes de aproximadamente 50 gr.

Se introduce los moldes atemperados con ligante a temperatura de 25°C durante aproximadamente una hora.

Una vez concluido el tiempo de inmersión se lleva la muestra al ensayador de penetración. Se asienta la aguja, sin penetrar el ligante, se ajustan las llaves y se suelta el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado.

Finalmente se anota la distancia recorrida por la aguja dentro del ligante asfáltico, expresadas en décimas de milímetro.

Fotografía 9. Ensayo de penetración



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Tabla 30. Datos obtenidos en ensayo de penetración

Descripción	Unidad	Lectura	Lectura	Lectura
		1	2	3
Ensayo 1	mm	90	90	90
Ensayo 2	mm	89	93	91
Ensayo 3	mm	89	90	90

Fuente: Elaboración propia

Resultados.-

Tabla 31. Resultados obtenido en ensayo de penetración

Descripción	Unidad	Promedio
Ensayo 1	mm	90
Ensayo 2	mm	91
Ensayo 3	mm	90
Resultado de ensayo de penetración**	mm	90

** ensayo realizado a 25°C, 100s, 5s (0,1mm)

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Ensayo de ductilidad (ASTM D-113)

Definición.- La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra y de la forma descrita en 1 se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5$ °C y a una velocidad de 5 cm/min \pm 5%.

Procedimiento.- Primeramente se debe preparar el molde. Se arma el molde sobre una placa base, se debe cubrir cuidadosamente la superficie en donde va almacenado el ligante con una película delgada de desmoldante para prevenir que el material a ensayar se adhiera.

Posteriormente se debe verter cuidadosamente en un chorro delgado el ligante calentado a una temperatura de entre 80 a 110 °C.

Se debe dejar enfriar la mezcla a temperatura ambiente por un periodo de entre 30 a 40 minutos, luego se debe retirar el exceso con una espátula afilada y caliente.

En el ensayo se procede de la siguiente manera; se engancha los anillos de cada extremo de los clips a las clavijas del ductilímetro, se debe medir la distancia entre los clips traccionados en el momento de producirse la ruptura. Durante el desarrollo del ensayo, el agua en el estanque del ductilímetro debe cubrir la briqueta completamente y se debe mantener la temperatura constante de 25 °C.

Fotografía 10. Ensayo de ductilidad



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Resultados del ensayo:

Tabla 32. Datos obtenidos en el ensayo de ductilidad

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Ductilidad a 25 °c AASHTO T 51	cm	130	127	129

Fuente: Elaboración propia

Resultados.-

Valor medio		
Resultado ensayo de ductilidad a 25 °C AASHTO T 51	cm	129

El resultado de la ductilidad supera los 100 cm, por lo que el ligante asfáltico ha superado la prueba con éxito.

3.3.3. Ensayo de punto de inflamación (ASTM D-92)

Definición.- Punto de inflamación.- Menor temperatura de calentamiento de un hidrocarburo, a la cual, la aplicación de una llama sobre la muestra de ensayo, provoca un destello de los vapores en la superficie del líquido.

Objetivo.- El método define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para el ligante asfáltico y derivados de petróleo, excepto aceites por medio de este método de ensaye.

Procedimiento.- Llenar la copa con el cemento asfáltico y se aplica calor inicialmente de tal manera que se incremente la temperatura. Cuando la temperatura de la muestra este por debajo del punto de llama esperado, se disminuye el calor de manera que la temperatura se aumente, para los últimos 28°C (50°F) antes de llegar al punto de inflamación.

Pasar la llama de ensayo a través del centro de la copa. Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie.

Datos obtenidos:

Tabla 33. Datos del ensayo de punto de inflamación

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	256	258	257
Número de ensayos realizados	3			

Fuente: Elaboración propia

Fotografía 11. Realización del ensayo de punto de inflamación



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Resultados:

Tabla 34. Resultado de ensayo de punto de inflamación

Ensayo	Unidad	Promedio
Puntode inflamación	° C	257

Fuente: Elaboración propia

La exigencia de la norma establece que el resultado de punto de inflamación debe superar los 232°C, por lo que el cemento asfáltico ha superado este ensayo.

3.3.4. Ensayo de peso específico del ligante asfáltico (ASTM D-70).

Definición.- Se entiende como peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25°C.

Procedimiento.- Se limpia el picnómetro para su calibración, esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración

Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa con aproximación de 1 mg. El peso del picnómetro vacío, se designa por A. El peso del picnómetro lleno de agua, se designa por B.

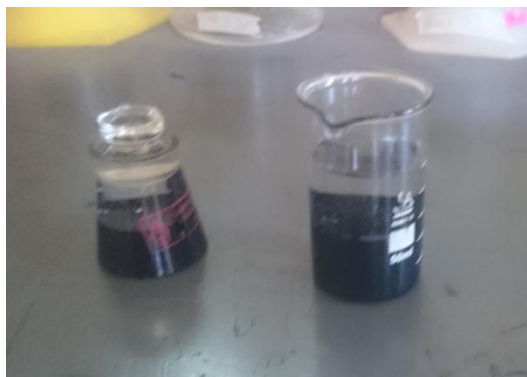
Preparación de la muestra.- Calentar con cuidado la muestra, hasta que sea fluida para que pueda ser vertida.

Verter una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente. El peso del picnómetro con la muestra, se designa como C.

Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón. Retornar luego el vaso al baño de agua a 25° C.

Mantener el picnómetro dentro del baño de agua durante un período no menor de 30 minutos. Sacar y pesar, este peso del picnómetro con la muestra y con agua, se designa como D.

Fotografía 12. Realización de ensayo de peso específico del ligante asfáltico



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Datos obtenidos:

Tabla 35. Datos del ensayo de peso específico

Ensayo	UNIDAD	Ensayo 1	Ensayo 2
Peso Picnómetro	gr.	62,02	62,0
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr.	142,75	142,8
Peso Picnómetro + Muestra	gr.	125,72	122,6
Peso Picnómetro + Agua + muestra	gr.	143,9	144
Número de ensayos realizados	2		

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo:

Peso específico del cemento asfáltico=

Peso picnometro+muestra

$$\frac{\text{Peso pic.} + \text{agua}}{(\text{Peso pic.} + \text{muest} - \text{peso pic.}) (\text{Peso pic.} + \text{agua} + \text{muest})} * 0,997077$$

$$\text{Peso Esp. del CA.} = \frac{125,72\text{gr}}{((142,75\text{gr}) + 125,72\text{gr} - 62,02\text{gr}) - (143,9)} * 0,997077$$

$$\text{Peso Esp. del CA.} = 1,015 \text{ gr/cm}^3$$

De igual manera se calcula el peso específico de cemento asfáltico con los datos del ensayo 2 y se obtiene un promedio.

Resultado:

$$\text{Peso específico del CA} = 1,016 \text{ gr/cm}^3$$

El resultado obtenido se encuentra dentro del rango establecido por norma, de 1 a 1,05 gr/cm³.

3.4. Resumen de resultados

De los ensayos realizados se tiene los siguientes resultados, los mismos que son comparados con su respectiva especificación exigida, proveniente de la normativa AASTHO y del distribuidor, valores se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 36. Resultados y comparaciones de Cemento Asfáltico con norma ASTM.

Ensayos	85-100		Resultado	Norma
	Mínimo	Máximo		
Penetración muestra original (25 °C, 100gr, 5s)mm/10	85	100	90,22	ASTM D-5
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51 (cm)	100	-	129	ASTM D-113
Punto de inflamación, Copa Cleveland, °C	232	-	257	ASTM D-92
Peso específico (gr/cm ³)	1	1,05	1,016	ASTM D-70

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV
INGENIERÍA DEL PROYECTO

CAPÍTULO IV

4. INGENIERÍA DEL PROYECTO

En esta sección de la investigación se muestran los métodos y técnicas para la elaboración de briquetas, en principio para la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico, seguidamente la elaboración de briquetas convencionales con este porcentaje ya determinado de cemento asfáltico y finalmente la elaboración de briquetas modificadas con adición de polvo de acero.

4.1. Granulometría utilizada

Se realizó tres granulometrías para cada clasificación de agregados, es decir; arena, grava 3/4" y grava 3/8".

Se llamará agregado fino a la arena triturada que se utilizó en la presente investigación. Asimismo se llamará agregado grueso a la grava 3/4" (grava) y a la grava 3/8" (gravilla).

Además se realizó la granulometría para la caracterización del polvo de acero utilizado.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las mencionadas granulometrías.

4.1.1. Granulometría del agregado fino

Tabla 68. Resultados preliminares, primera granulometría. Arena

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100	Nº200	Base	Total
Ensayo 1	0	0	0	0	7,5	1022	1200	990	1022	455	63,5	15,4	4999,7
% .	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	20,4	24,0	19,8	20,4	9,1	1,3	0,3	100,0
% Ret acum.	0	0	0	0	0,2	20,6	44,6	64,4	84,9	94,0	95,2	95,5	
% Pasa	100	100	100	100	100	79,4	55,4	35,6	15,1	6,0	4,8	4,5	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 69. Resultados preliminares, segunda granulometría. Arena

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
Ensayo 2	0	0	0	0	9,1	1045	1221	956	1041	458	61,2	14,3	4999,8
% .	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	20,9	24,4	19,1	20,8	9,2	1,2	0,3	100,0
% Ret acum.	0	0	0	0	0,2	21,1	45,5	64,6	85,4	94,6	95,8	96,1	
% Pasa	100	100	100	100	99,8	78,9	54,5	35,4	14,6	5,4	4,2	3,9	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 70. Resultados preliminares, tercera granulometría. Arena

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
Ensayo 3	0	0	0	0	9,8	1045	1207	990	1044	464	55,3	15,6	5000,8
% .	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	20,9	24,1	19,8	20,9	9,3	1,1	0,3	100,0
% Ret acum.	0,0	0	0	0	0,2	21,1	45,2	65,0	85,9	95,2	96,3	96,6	
% Pasa	100	100	100	100	99,8	78,9	54,8	35,0	14,1	4,8	3,7	3,4	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 71. Resumen de granulometrías realizadas con el agregado fino. Arena

Ensayo	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
1	0	0	0	0	7,5	1022	1200	990	1022	455	63,5	15,4	4999,7
2	0	0	0	0	9,1	1045	1221	956	1041	458	61,2	14,3	4999,8
3	0	0	0	0	9,8	1045	1207	990	1044	464	55,3	15,6	5000,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 72. Resumen de resultados. Arena

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
Prom. (gr)	0	0	0	0	8,8	1037	1210	978,7	1036	459,0	60,0
% Ret	0	0	0	0	0,2	20,7	24,2	19,6	20,7	9,2	1,2
% Ret acum.	0	0	0	0	0,2	20,9	45,1	64,7	85,4	94,6	95,8
%	100	100	100	100	100	79,1	54,9	35,3	14,6	5,4	4,2

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Granulometría del agregado grueso

4.1.2.1. Grava 3/4"

Tabla 73. Resultados preliminares, primera granulometría. Grava 3/4"

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100	Nº200	Base	Total
Ensayo 1	0	15,4	2704	1804	571	0	0	0	0	0	0	2,3	5097
% .	0,0	0,3	53,1	35,4	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
% Ret acum.	0,0	0,3	53,4	88,8	100	100	100	100	100	100	100	100	
% Pasa	100	99,7	46,6	11,2	0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 74. Resultados preliminares, segunda granulometría. Grava 3/4"

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100	Nº200	Base	Total
Ensayo 2	0	16,2	2587	1750	548	0	0	0	0	0	0	3,4	4905
% .	0,0	0,3	52,7	35,7	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	100,0
% Ret acum.	0	0,33	53,1	88,8	100	100	100	100	100	100	100	100	
% Pasa	100	99,7	46,9	11,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 75. Resultados preliminares, tercera granulometría. Grava 3/4"

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100	Nº200	Base	Total
Ensayo 3	0	15,5	2585	1842	553	0	0	0	0	0	0	1,7	4997
% .	0,0	0,3	51,7	36,9	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
% Ret acum.	0,0	0,31	52	88,9	100	100	100	100	100	100	100	100	
% Pasa	100	99,7	48	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 76. Resumen de granulometrías realizadas. Grava 3/4"

Ensayo	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100	Nº200	Base	Total
1	0	15,4	2704	1804	571	0	0	0	0	0	0	2,3	5097
2	0	16,2	2587	1750	548	0	0	0	0	0	0	3,4	4905
3	0	15,5	2585	1842	553	0	0	0	0	0	0	1,7	4997

Fuente: Elaboración propia

Tabla 77. Resumen de resultados. Grava 3/4"

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
Prom. (gr)	0	15,7	2626	1799	557	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
% Ret	0	0,3	54,1	36,1	11,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
% Ret acum.	0	0,3	54,4	90,5	100	100	100	100	100	100	100
% Pasa	100	99,7	45,6	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2. Grava 3/8"**Tabla 78. Resultados preliminares, primera granulometría. Grava 3/8"**

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
Ensayo 1	0	0	0	12	2838	1905	64,5	21,4	15,4	11,7	15,1	11,1	4894
% .	0,0	0,0	0,0	0,2	58,0	38,9	1,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	100,0
% Ret acum.	0	0	0	0,2	58,2	97,2	98,5	98,9	99,2	99,5	99,8	100,0	
% Pasa	100	100	100	99,8	41,8	2,8	1,5	1,1	0,8	0,5	0,2	0,0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 79. Resultados preliminares, segunda granulometría. Grava 3/8"

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
Ensayo 2	0	0	0	16,7	3002	1789	57,1	26,7	11,3	10,9	17,4	13,4	4945
% .	0,0	0,0	0,0	0,3	60,7	36,2	1,2	0,5	0,2	0,2	0,4	0,3	100,0
% Ret acum.	0	0	0	0,34	61,0	97,2	98,4	98,9	99,2	99,4	99,7	100,0	
% Pasa	100	100	100	99,7	39,0	2,8	1,6	1,1	0,8	0,6	0,3	0,0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 80. Resultados preliminares, tercera granulometría. Grava 3/8"

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
Ensayo 3	0	0	0	15,8	3153	1857	57,8	26	10,2	13,4	11,9	13,6	5158
% .	0,0	0,0	0,0	0,3	61,1	36,0	1,1	0,5	0,2	0,3	0,2	0,3	100,0
% Ret acum.	0,0	0	0	0,31	61,4	97,4	98,5	99,0	99,2	99,5	99,7	100,0	
% Pasa	100	100	100	99,7	38,6	2,6	1,5	1,0	0,8	0,5	0,3	0,0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 81. Resumen de granulometrías realizadas con el agregado grueso. Grava 3/8"

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
Prom. (gr)	0	0	0	14,8	2998	1850,2	59,8	24,7	12,3	12,0	14,8
% Ret	0,0	0,0	0,0	0,3	60,0	37,0	1,2	0,5	0,2	0,2	0,3
% Ret acum.	0	0,0	0,0	0,3	60,2	97,3	98,4	98,9	99,2	99,4	99,7
% Pasa	100	100,0	100,0	99,7	39,8	2,7	1,6	1,1	0,8	0,6	0,3

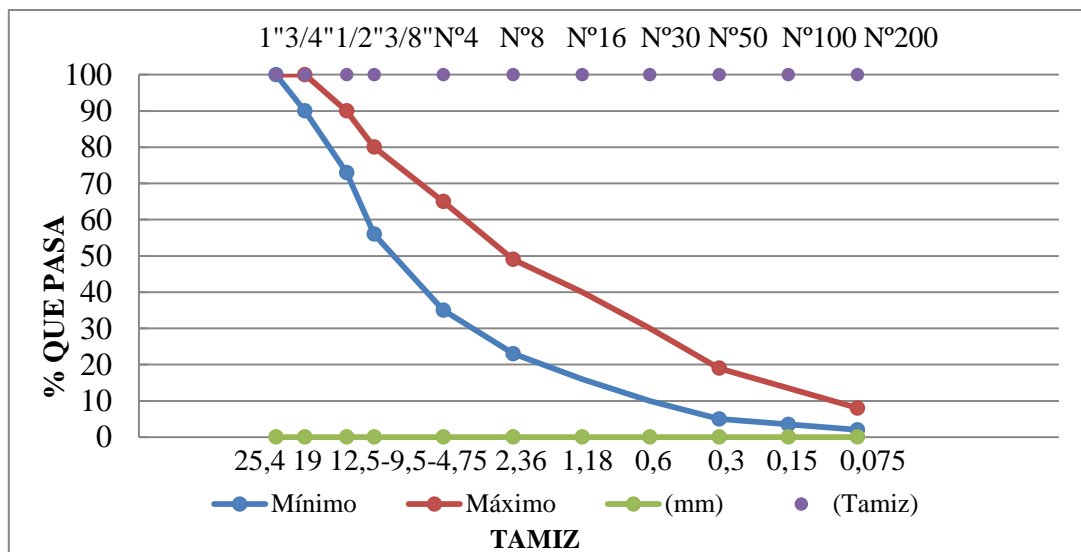
Fuente: Elaboración propia

Tabla 82. Resumen de resultados. Grava 3/8"

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
Prom. (gr)	0	0	0	14,8	2998	1850,2	59,8	24,7	12,3	12,0	14,8
% Ret	0,0	0,0	0,0	0,3	60,0	37,0	1,2	0,5	0,2	0,2	0,3
% Ret acum.	0	0,0	0,0	0,3	60,2	97,3	98,4	98,9	99,2	99,4	99,7
% Pasa	100	100,0	100,0	99,7	39,8	2,7	1,6	1,1	0,8	0,6	0,3

Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Faja de trabajo para mezcla convencional

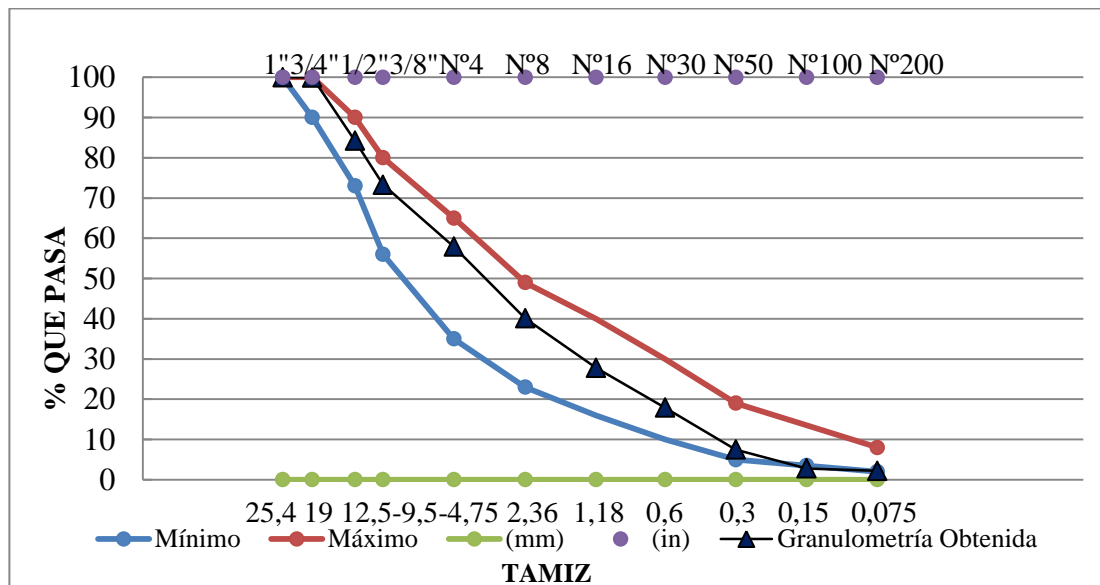


Fuente: Gradaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3515)

4.1.3.2. Faja de trabajo obtenida en el tanteo para realización de briquetas

Objetivo.- Conseguir el porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Figura 9. Granulometría obtenida (Arena, agregado 3/4" y agregado 3/8")



Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Granulometría del polvo de acero

Tabla Nro. 44. Granulometría del polvo de acero

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
Ret. (gr)	0	0	0	0	0	0	465,7	541,8	2471,7	441,3	191,1	88,4	4200

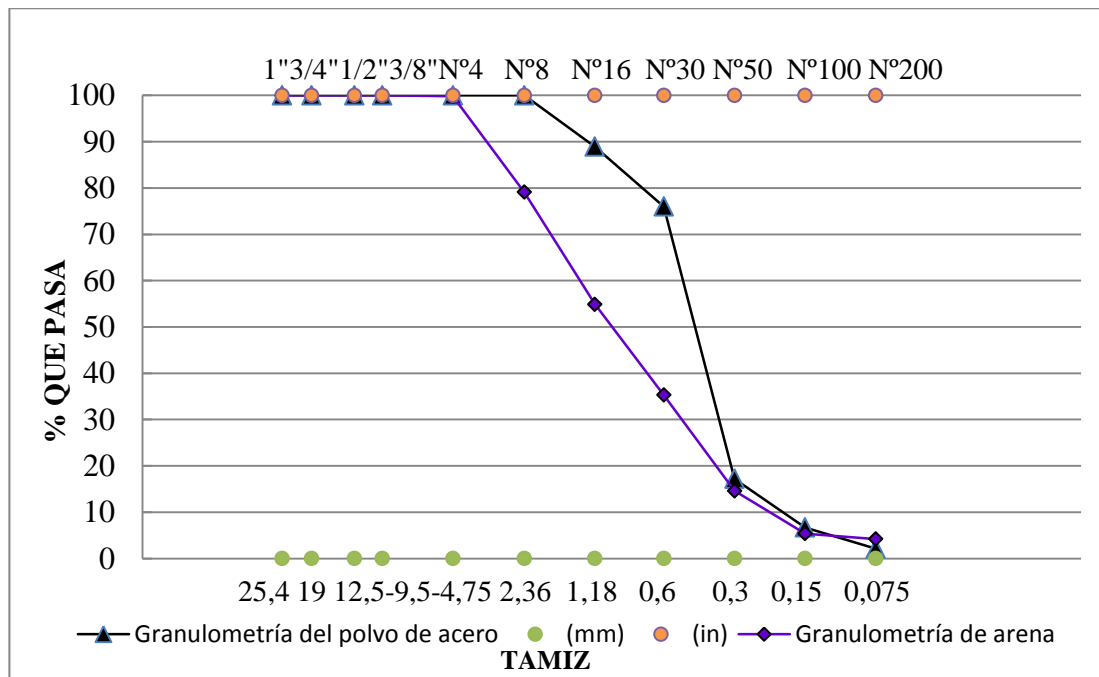
Fuente: Elaboración propia

Tabla Nro. 45. Resultados obtenidos de granulometría de polvo de acero

Tamiz	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Base	Total
Ret (gr)	0	0	0	0	0	0	465,7	541,8	2471,7	441,3	191,1	88,4	4200
% Ret.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,1	12,9	58,9	10,5	4,6	2,1	100
% Ret acum.	0	0	0	0	0,0	0,0	11,1	24,0	82,8	93,3	97,9	100	
% Pasa	100	100	100	100	100	100	88,9	76,0	17,2	6,7	2,1	0,0	

Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Curva granulométrica del polvo de acero y arena



Fuente: Elaboración propia

4.2. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico CA

4.2.1. Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall (ASTM D-1559)

Para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico se procede a verificar cinco diferentes porcentajes tentativos, de los cuales se elaboran tres briquetas de cada una. Los detalles se muestran a continuación.

4.2.1.1. Dosificación proyectada de granulometrías obtenidas

A continuación se muestra las granulometrías que se usaron para la conformación de la mezcla asfáltica final.

Tabla 83. Resumen de granulometrías obtenidas

Peso total (gr)	5000	Grava 3/4"	Grava 3/8"	Arena
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)
1"	25,40	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,00	15,70	0,00	0,00
1/2"	12,50	2625,50	0,00	0,00
3/8"	9,50	1798,70	14,80	0,00
N°4	4,75	557,00	2997,50	8,80
N°8	2,36	0,00	1850,20	1037,40
N°16	1,18	0,00	59,80	1209,50
N°30	0,60	0,00	24,70	978,70
N°50	0,30	0,00	12,30	1035,70
N°100	0,15	0,00	12,00	459,00
N°200	0,08	0,00	16,30	60,00
BASE	-	2,30	12,70	15,10
Total (gr)		4999,20	5000,30	5000,60

Fuente: Elaboración propia

Nota: La dosificación proyectada es ahora la granulometría con la que se trabaja para realizar el ensayo de contenido óptimo de CA. Se obtiene ponderando los siguientes porcentajes.

Tabla 84. Ponderación para los agregados

Grava 3/4"	30	%
Grava 3/4"	20	%
Arena	50	%
Total	100	%

Fuente: Elaboración propia

Los porcentajes que se muestran en la Tabla Nro. 48., se utilizan para hacer coincidir la granulometría ponderada dentro de la faja de trabajo que se debe cumplir por norma.

Tabla 85. Dosificación proyectada

Agregado	Grava 3/4"	Grava 3/8"	Arena	Masa total	5000 gr		
Porcentaje	0,3	0,2	0,5	Suma	Ret.	%	% Que pasa
Tamices					Acum.	Retenido	del total
1"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	4,7	0,0	0,0	4,7	4,7	0,1	99,9
1/2"	787,7	0,0	0,0	787,7	792,4	15,8	84,2
3/8"	539,6	3,0	0,0	542,6	1335,0	26,7	73,3
N°4	167,1	599,5	4,4	771,0	2106,0	42,1	57,9
N°8	0,0	370,0	518,7	888,7	2994,7	59,9	40,1
N°16	0,0	12,0	604,8	616,7	3611,4	72,2	27,8
N°30	0,0	4,9	489,4	494,3	4105,7	82,1	17,9
N°50	0,0	2,5	517,9	520,3	4626,0	92,5	7,5
N°100	0,0	2,4	229,5	231,9	4857,9	97,2	2,8
N°200	0,0	3,3	30,0	33,3	4891,2	97,8	2,2
BASE	1,1	2,5	7,6	11,1	4902,3	98,0	2,0

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2. Determinación aproximada del porcentaje óptimo de CA.

La siguiente ecuación se utiliza para conocer a priori, un porcentaje aproximado de cemento asfáltico. Posteriormente se trabaja acercando las tentativas a dicho porcentaje.

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

Dónde:

%A = % de asfalto en la mezcla

a = % Retenido en tamiz Nro.8

b = Porcentaje que pasa en tamiz Nro.8

K = 0,15 si el %retenido en 3/4" está entre 11 y 15%

0,18 si el %retenido en 3/4" está entre 6 y 10%

0,20 si el %retenido en 3/4" está entre 5% o menos

c = % de agregado que pasa la malla Nro.200

F = Absorción del material (Varía desde 0 hasta 2%)

Nota: Valores obtenidos de tabla Nro. 47. Dosificación proyectada

Reemplazando valores.

$$a = 59,9\%$$

$$b = 40,1\%$$

$$K = 0,2 \text{ (el \% retenido en } \frac{3}{4} \text{ es menor a 5, de}$$

$$c = 2\%$$

$$F = 0,4 * 1,218 + 0,6 * 1,9 = 1,627$$

$$\%A = 0,035 * 59,5 + 0,045 * 40,1 + 0,2 * 2 + 1,627$$

$$\%A = 5,914$$

Con la aproximación de porcentaje de CA de 5,915% se procede a realizar las cinco tentativas.

Se trabaja con los siguientes porcentajes:

Tabla 86. Porcentajes tentativos para determinación de porcentaje óptimo de CA

Nro de prueba	Porcentaje
1	4,5%
2	5,0%
3	5,5%
4	6,0%
5	6,5%

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestra la ponderación de estos porcentajes en masa de material

4.2.1.2.1. Diferentes porcentajes de cemento asfáltico

Tabla 87. Dosificación de CA 4,5%

Porcentaje de CA	4,5 %
Porcentaje de agregados	95,5 %
Grava 3/4"	343,8 gr
Grava 3/8"	229,2 gr
Arena	573,0 gr
CA	54,0 gr
Peso de la muestra	1146,0 gr
Peso del CA	54,0 gr
Peso total	1200,0 gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 88. Dosificación de CA 5,0%

Porcentaje de CA	5,0 %
Porcentaje de agregados	95,0 %
Grava 3/4"	342,0 gr
Grava 3/8"	228,0 gr
Arena	570,0 gr
CA	60,0 gr
Peso de la muestra	1140,0 gr
Peso del CA	60,0 gr
Peso total	1200,0 gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 89. Dosificación de CA 5,5%

Porcentaje de CA	5,5 %
Porcentaje de agregados	94,5 %
Grava 3/4"	340,2 gr
Grava 3/8"	226,8 gr
Arena	567,0 gr
CA	66,0 gr
Peso de la muestra	1134,0 gr
Peso del CA	66,0 gr
Peso total	1200,0 gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 90. Dosificación de CA 6,0%

Porcentaje de CA	6,0 %
Porcentaje de agregados	94,0 %
Grava 3/4"	338,4 gr
Grava 3/8"	225,6 gr
Arena	564,0 gr
CA	72,0 gr
Peso de la muestra	1128,0 gr
Peso del CA	72,0 gr
Peso total	1200,0 gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 91. Dosificación de CA 6,5%

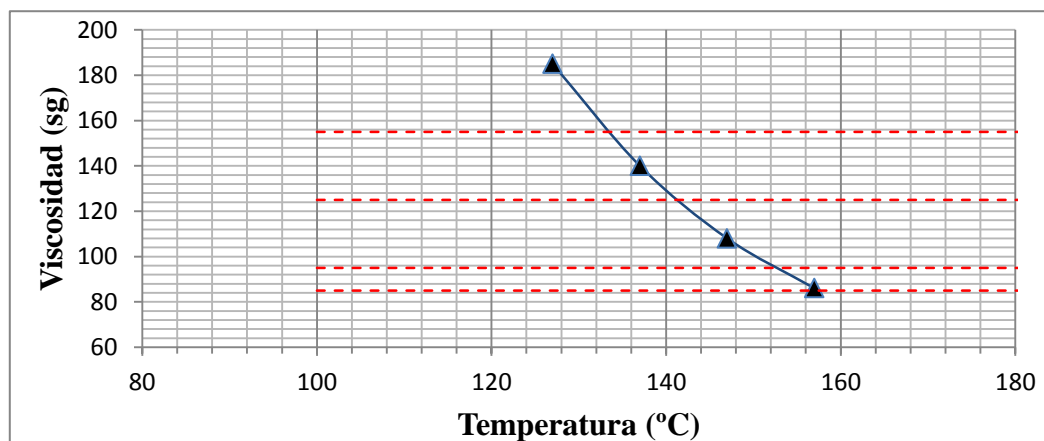
Porcentaje de CA	6,5 %
Porcentaje de agregados	93,5 %
Grava 3/4"	336,6 gr
Grava 3/8"	224,4 gr
Arena	561,0 gr
CA	78,0 gr
Peso de la muestra	1122,0 gr
Peso del CA	78,0 gr
Peso total	1200,0 gr

Fuente: Elaboración propia

Las cinco anteriores tablas se utilizan para la elaboración de briquetas con diferentes porcentajes contenidos de cemento asfáltico, desde 4,5 hasta 6,5%.

Luego de elaborar las briquetas, y de medir sus propiedades de estabilidad y fluencia, mediante el equipo “prensa Marshall” se elaboran gráficas de las cuales se obtendrá el porcentaje óptimo de CA, para el posterior diseño de mezclas asfálticas convencionales y modificadas con porcentaje de polvo de acero.

Ensayo de viscosidad y fluencia versus temperatura

Figura 11. Temperatura Vs Viscosidad

Fuente: Elaboración propia

De la anterior figura se extrae la temperatura mínima y máxima a la que se debe someter la mezcla asfáltica; es decir 155°C, esta no debe sobrepasar 160°C.

Procedimiento para la elaboración de briquetas

Previamente, se debe calentar las probetas de 4" de diámetro y 3" de altura en horno. Hasta el momento en que la mezcla asfáltica se encuentre lista.

Se debe pesar el material, de acuerdo a los valores especificados en las tablas de dosificación de CA.

Se calienta el material pétreo a una temperatura entre 155°C y 160°C.

Se incorporar el CA diluido a una temperatura entre 120 y 137°C.

Se revuelve uniformemente sobre la hornalla para obtener una mezcla homogénea.

Se verifica la temperatura con un termómetro y una vez alcanzada la consistencia y cubrimiento de todas las partículas se debe verter la mezcla en la probeta.

Se uniformiza la mezcla y se fija un disco circular de 3+7/8" en la superficie de la mezcla asfáltica. Se procede a compactar con 75 golpes de martillo (por cada cara) de 10 libras y altura de caída de 18".

Se deja enfriar la mezcla durante al menos 12 horas y se desmolda con gato hidráulico.

Fotografía 25. Prensa Marshall



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

4.3. Ensayo de estabilidad y fluencia

Con las briquetas ya elaboradas se procedió a efectuar en ensayo de estabilidad y fluencia en la prensa Marshall.

Los datos previos necesarios son los siguientes.

Alturas de cada briqueta identificada, se debe medir con un vernier en sus cuatro ejes para determinar el promedio de estas y luego se efectúa una corrección por altura.

Previo a la realización del ensayo se debe mantener sumergida las briquetas en baño maría durante un periodo de aproximadamente media hora, a una temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Se procede a limpiar las superficies interiores de las mordazas, estas se deben encontrar a una temperatura entre 21 y 38°C . También se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite, de este modo la mordaza superior desliza fácilmente sin adherirse a esta. Se verifica que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición inicial cero.

Luego de retirar las briquetas del baño maría, es necesario limpiar completamente la superficie de esta con un paño limpio y seco.

Se ubica la biqueta entre las mordazas y se aplica carga a una velocidad de deformación constante de $2''/\text{min}$ ($50,8\text{mm}/\text{min}$) hasta producir rotura. La carga máxima de rotura es definida con la mayor carga resistida, este es el valor que debe anotarse como estabilidad Marshall.

4.3.1. Resumen de datos obtenidos en ensayo Marshall para obtención de porcentaje óptimo de cemento asfáltico

A continuación se muestran los resultados obtenidos con la camada de las primeras 15 probetas con diferentes porcentajes de cemento asfáltico, para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico, para la posterior conformación de una camada de nueve especímenes que serán la muestran patrón en el presente estudio.

Tabla 92. Lectura de datos, ensayo Marshall, briquetas Nro. 0-15, para obtención de % óptimo de CA

Nro	Altura				Peso			Lectura dial	
Briqueta	H1	H2	H3	H4	Seco	Sumergido	SSS	Estabilidad	Fluencia
----	cm	cm	cm	cm	gr	gr	gr	mm	----
1	6,7	6,9	6,8	6,8	1183,9	666	1197,1	433	130
2	6,8	6,9	6,9	6,8	1183,9	670	1210,8	424	130
3	6,8	6,7	6,8	6,8	1187,9	668	1202,1	451	150
4	6,9	6,8	6,8	6,8	1196,5	669,5	1205,5	542	190
5	6,5	6,6	6,5	6,5	1187,1	672,5	1192,4	551	180
6	6,8	6,7	6,8	6,8	1194,5	671,5	1207,6	531	180
7	6,6	6,6	6,6	6,5	1181,2	665	1186,7	684	210
8	6,8	6,8	6,7	6,8	1200,3	679	1209,1	679	210
9	7	6,9	7	7	1194,8	681	1198	698	220
10	6,9	6,9	6,9	6,8	1194,3	668	1205,3	795	230
11	6,6	6,7	6,6	6,6	1172,2	668	1176,9	781	220
12	6,6	6,5	6,6	6,6	1192,4	674,5	1196,7	814	240
13	6,8	6,8	6,8	6,8	1148,6	684,5	1194,4	755	240
14	6,8	6,9	6,8	6,8	1158,1	663,5	1176	783	250
15	6,9	6,9	6,8	6,9	1150,2	674	1178,4	764	240

Fuente: Elaboración propia

4.4. Procedimiento para corrección de estabilidad y fluencia

Los siguientes datos corresponden a las lecturas obtenidas en la rotura de briquetas con contenido de CA de 4,5%.

a) Identificación

b) Altura de briqueta

Tabla 93. Altura de briquetas (4,5% CA)

Identificación de briketa	H1	H2	H3	H4	Altura promedio (cm)
1	6,8	6,8	6,9	6,8	6,8
2	6,9	6,9	6,8	6,8	6,9
3	6,8	6,9	6,8	6,8	6,8
Altura promedio (cm)					6,8

Fuente: Elaboración propia

c) Porcentaje de asfalto

c1) Base de la mezcla

Base de la mezcla=4,5%

c2) Base de agregado

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

$$\text{Base de agregado} = \frac{4,5 * 100}{100 - 4,5}$$

Base de agregado=4,71

d) Peso de briketa en el aire

Tabla 94. Peso de briquetas en el aire (4,5% CA)

Identificación de briketa	Peso de briketa en el aire (gr)
1	1183,9
2	1183,9
3	1187,9
Peso promedio (cm)	1185,2

Fuente: Elaboración propia

e) Peso de briqueta en el aire, saturado y superficialmente seco (SSS)

Este valor se refiere al peso obtenido después de sumergir las briquetas durante 30 minutos a una temperatura de 25°C y transcurrido este tiempo, secándolas superficialmente por completo.

Tabla 95. Peso de briquetas SSS (4,5% CA)

Identificación de briqueta	Peso de briqueta SSS (gr)
1	1197,1
2	1210,8
3	1202,1
Peso promedio (cm)	1203,3

Fuente: Elaboración propia

f) Peso de briqueta sumergida en agua

Se refiere al valor del peso obtenido durante la sumersión completa de las briquetas en agua a 25°C durante 30 minutos.

Tabla 96. Peso de briquetas sumergidas en agua (4,5% CA)

Identificación de briqueta	Peso de briqueta sumergidas (gr)
1	666
2	670
3	668
Peso promedio (cm)	668,0

Fuente: Elaboración propia

g) Volumen de briqueta

$$\text{Volumen}_1 \text{ briqueta} = \text{Peso SSS} - \text{Peso sumergido}$$

$$\text{Volumen de briqueta} = 1197,1 - 666$$

$$\text{Volumen de briqueta} = 531,1 \text{ gr}$$

h) Densidad de briqueta

h1) Densidad real de briqueta

$$\text{Densidad real}_1 = \frac{\text{Peso briqueta en el aire}}{\text{Volumen de briqueta}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1183,9}{531,1}$$

$$\text{Densidad real} = 2,23 \text{ gr/cm}^3$$

h2) Densidad máxima teórica de la briqueta

$$\text{Densidad}_{\text{máx teórica}} = \left(\frac{\% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico asfalto}} \right)^{100} + \frac{100 - \% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico agregado grueso}}$$

$$\text{Densidad}_{\text{máx teórica}} = 100 / \left[\frac{4,5}{1,016} + \frac{100 - 4,5}{2,58} \right]$$

$$\text{Densidad}_{\text{máx teórica}} = 2,42 \text{ gr/cm}^3$$

i) Porcentaje de vacíos

i1) Porcentaje de vacíos de la mezcla

$$V_v = \frac{\text{Densidad}_{\text{máx teórica}} - \text{Densidad}_{\text{promedio de briquetas}}}{\text{Densidad}_{\text{máx teórica}}} * 100$$

$$V_v = \frac{2,42 - 2,21}{2,42} * 100$$

$$V_v = 8,39 \%$$

i2) Porcentaje de vacíos de los agregados

$$VAM = \frac{\% \text{ de asfalto} * \text{Densidad}_{\text{promedio de briquetas}}}{\text{Peso específico del asfalto}} + V_v$$

$$VAM = \frac{4,5 * 2,21}{1,016} + 8,39$$

$$VAM = 18,19 \%$$

i3) Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

$$RBM = \frac{VAM - V_v}{VAM} * 100$$

$$RBM = \frac{18,19 - 8,39}{18,19} * 100$$

$$RBM = 53,89 \%$$

j) Estabilidad y fluencia

Tabla 97. Lecturas dial, obtenidas de ensayo Marshall

Identificación	Lectura dial	
	Estabilidad	Fluencia
	(mm)	-
1	433	130
2	424	130
3	451	150

Fuente: Elaboración propia

Corrección por calibración del equipo Marshall

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

Remplazando el valor número 1 en la ecuación anterior, se tiene:

$$\text{Carga} = (0,012 * 433 - 0,0812) * 102 * 2,2$$

$$\text{Carga} = 1148 \text{ lb}$$

Corrección por altura de briqueta número 1:

Tabla 98. Factores de corrección, briquetas 4,5% CA

Identificación de briqueta	Altura promedio (cm)	Factor de corrección por altura***
1	6,8	0,8975
2	6,9	0,8769
3	6,8	0,8975

*** Tabla véase en anexos

Fuente: Elaboración propia

La altura promedio del espécimen número 1 es 6,9cm. El factor de corrección para esta altura es de 0,8975.

Corrección por calibración de Marshall, para espécimen número 1.

$$\text{Estabilidad}_{\text{corregida 1}} = 1148 * 0,8975$$

$$\text{Estabilidad}_{\text{corregida 1}} = 1030,1 \text{ lb}$$

Tabla 99. Valores reales de ensayo Marshall (Marshall corregido)

Estabilidad corregida	Estabilidad
	lb
1	1030,1
2	985,22
3	1073,6
Estabilidad promedio	1030

Fuente: Elaboración propia

Estabilidad promedio, porcentaje número 16.

Estabilidad promedio = 1030 lb

Corrección de fluencia

$$\text{Fluencia corregida} = \left(\frac{\text{Lectura dial fluencia}}{100} \right) / (25,4)$$

$$\text{Fluencia corregida}_1 = \frac{130}{25,4}$$

$$\text{Fluencia corregida}_1 = 5,11$$

Tabla 100. Fluencia corregida

Identificación de briqueta	Lectura dial	
	Fluencia	Fluencia corregida
	-	1/100
1	130	5,1181
2	130	5,1181
3	150	5,9055
Promedio		5,381

Fuente: Elaboración propia

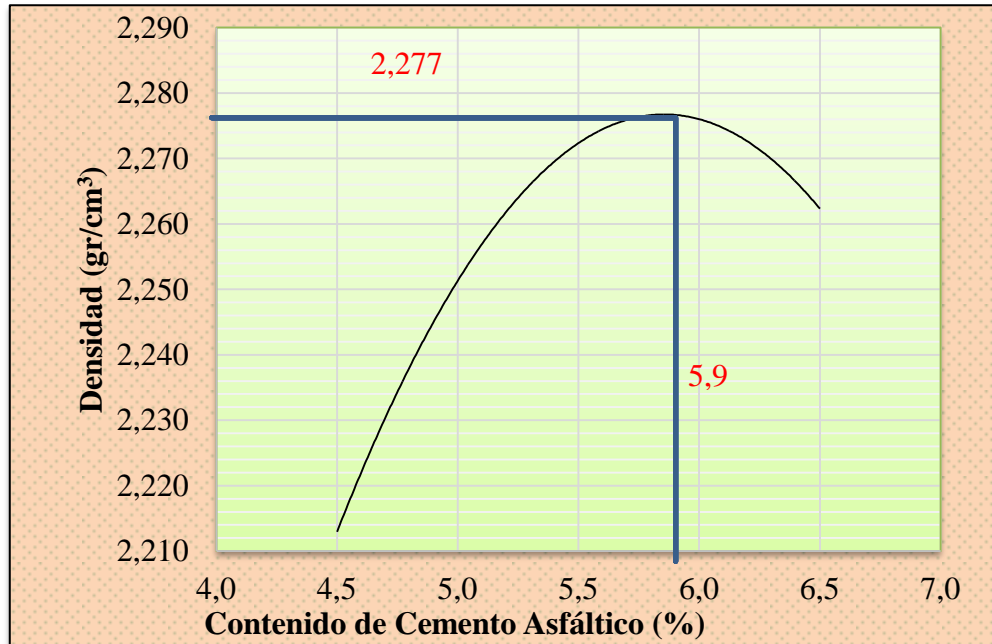
Fluencia promedio, porcentaje número 1:

Fluencia promedio = 5,381 (1/100)

Se realiza las mismas consideraciones anteriores con los diferentes porcentajes de contenido de cemento asfáltico, es así que se obtienen cinco puntos con los que se realizan las gráficas que se muestran a continuación.

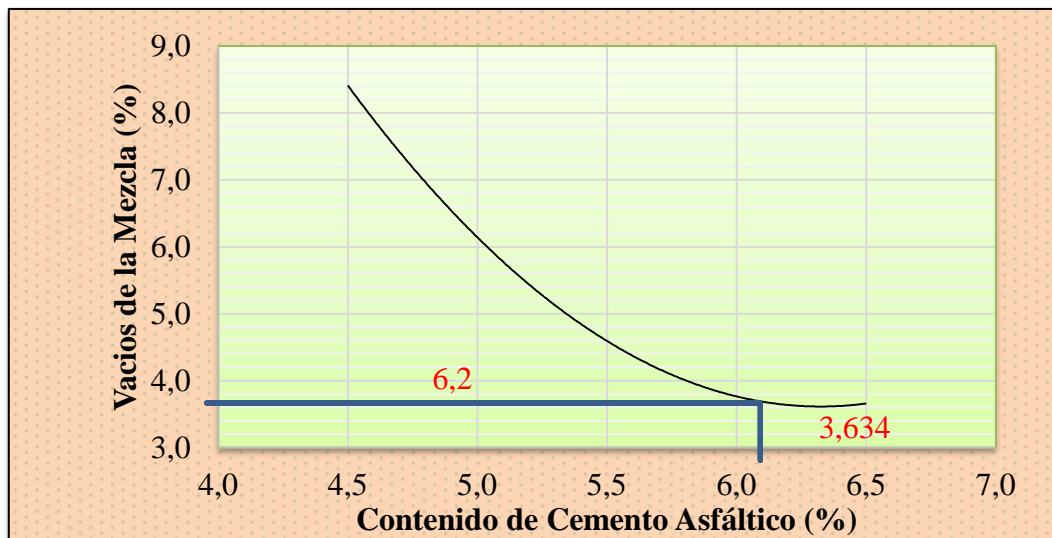
4.4.1. Curvas de diseño de mezcla asfáltica, método Marshall

Figura 12. Porcentaje de Asfalto Vs. Densidad de la probeta



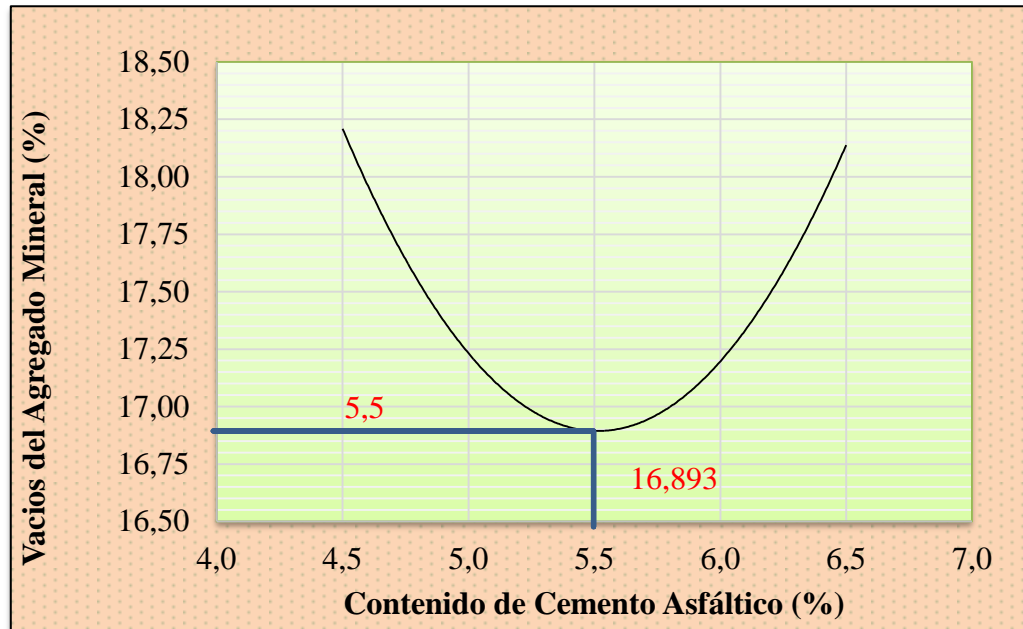
Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Porcentaje de Asfalto Vs. Porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total



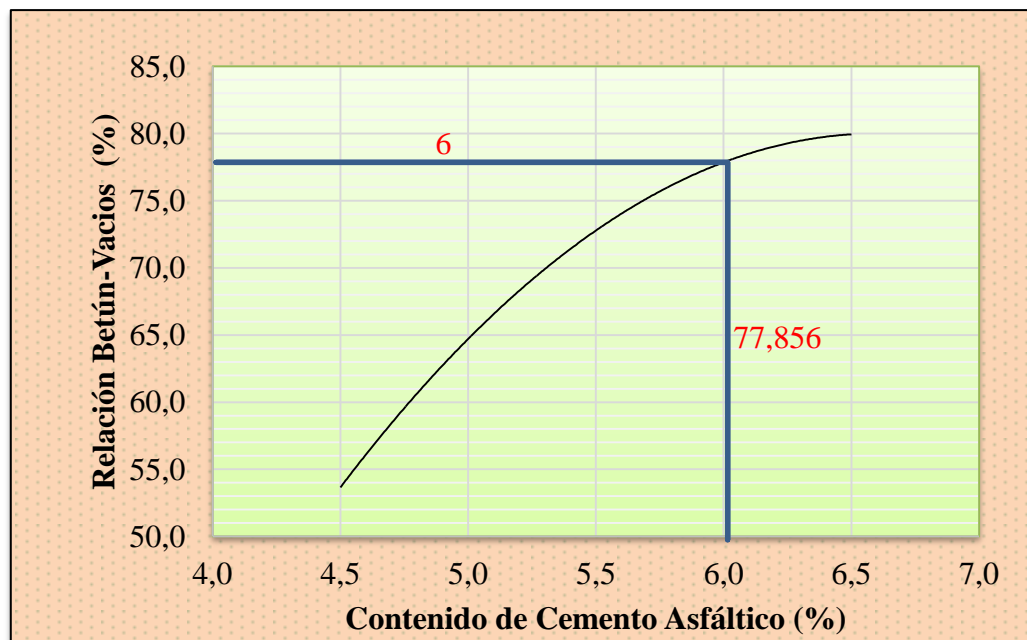
Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Porcentaje de Asfalto Vs. Vacíos de agregado mineral (VAM)



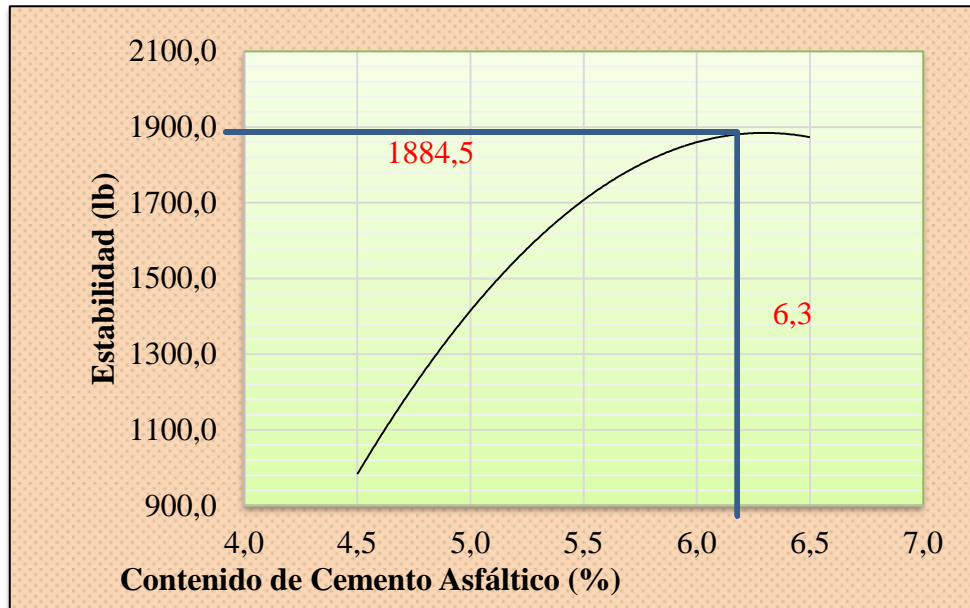
Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Porcentaje de Asfalto Vs. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV)



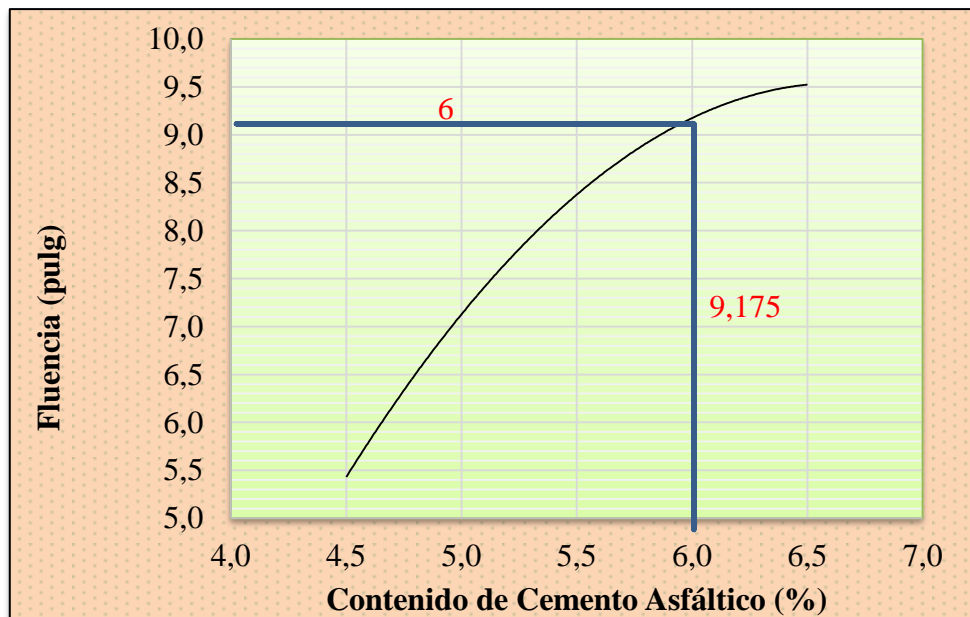
Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Porcentaje de Asfalto Vs. Estabilidad corregida



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Porcentaje de Asfalto Vs. Fluencia (Flujo)



Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Resultados de ensayo Marshall para obtención de porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

De las gráficas mostradas se obtienen la siguiente tabla de resultados.

Tabla 101. Resultados obtenidos de gráficas, ensayo Marshall

Valores				
Características	% de asfalto	Obtenido de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad	5,9	2,27	-----	-----
% Vacíos	6,2	3,634	3	5
V.A.M.	5,5	16,893	15	
R.B.V.	6,1	78,513	75	82
Estabilidad (Lb)	6,3	1884,5	>1800 Lb (75 Golpes)	
Fluencia 1/100''	6	9,175	8	14
Contenido de asfalto (%)	6,13	Determinación del contenido óptimo de Asfalto. Tomando en cuenta Estabilidad, Densidad máxima y % de Vacíos de la mezcla		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 102. Resultados finales de estabilidad y fluencia, con contenido óptimo de CA

Valores obtenidos del diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con % óptimo de CA	Especificaciones técnicas	
Densidad	6,13	2,274	-----	-----
% Vacíos	6,13	3,666	3	5
V.A.M.	6,13	17,378	15	
R.B.V.	6,13	78,686	75	82
Estabilidad (Lb)	6,13	1876,7	>1800 Lb (75 Golpes)	
Fluencia 1/100''	6,13	9,309	8	14
Contenido óptimo de asfalto (%)	6,13	Determinación del contenido óptimo de Asfalto. Tomando en cuenta Estabilidad, Densidad máxima y % de Vacíos de la mezcla		

Fuente: Elaboración propia

Resultado:

Contenido óptimo de cemento asfáltico: 6,13 %.

Tanto las briquetas convencionales como las modificadas con porcentaje de polvo de acero se realizan con este porcentaje óptimo de CA en mezcla asfáltica.

Fotografía 26. Verificación de temperatura óptima de mezclado

Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Fotografía 27. Briqueta con mezcla asfáltica con contenido óptimo de CA

Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Fotografía 28. Compactación manual con martillo de 10 libras



Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Fotografía 29. Identificación de briquetas



Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Fotografía 30. Uso de gata hidráulica para desmoldar



Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Fotografía 31. Control de temperatura de agua para baño maría



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017 Tarija

Fotografía 32. Uso de equipo Marshall



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017, Tarija

Fotografía 33. Equipo Marshall



Fuente: Fotografía de R. Montero. 2017, Tarija

4.5. Elaboración de briquetas

Conociendo ya los parámetros establecidos de los que se hará uso para modificar la mezcla asfáltica, se procede a fabricar la siguiente cantidad de briquetas con los

diferentes porcentajes establecidos y con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico de 6,13%. Se muestra un detalle a continuación:

Tabla 103. Detalle de elaboración de briquetas convencionales y modificadas con porcentaje óptimo de cemento asfáltico de 6,13%

Nro. Prueba	Detalle	% De polvo de acero	Nro. De especímenes	Identificación de briquetas	Consideración
1ra Patrón	Muestra patrón con contenido óptimo de CA	Convencional	9	16-24	Muestra patrón
1ra Prueba	Porcentaje de polvo de acero	0,50%	3	25-27	Bajo
2da Prueba		2,00%	3	28-30	
3ra Prueba		4,00%	3	31-33	Medio
4ta Prueba		6,00%	3	34-36	
5ta Prueba		10,00%	3	37-39	Alto
6ta Prueba		12,00%	3	40-42	
7ma Prueba		14,00%	3	42-45	
Total:			30		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 104. Lectura de datos, ensayo Marshall, briquetas Nro. 16-24, convencionales con porcentaje de 6,13% de CA (Muestra patrón).

Nro Briqueta	Altura				Peso			Lectura dial	
	H1 cm	H2 cm	H3 cm	H4 cm	Seco gr	Sumergido gr	SSS gr	Estabilidad mm	Fluencia ----
16	7	7	7	6,8	1204	691	1219,5	831	240
17	8,7	8,4	8,5	8,7	1479,3	821	1505,8	812	230
18	6,9	6,9	7,1	7,05	1191,9	686	1215,7	815	240
19	6,9	6,9	7,2	7	1179,9	679,5	1189,5	794	230
20	6,9	6,9	6,9	7	1175,3	669	1188,3	833	240
21	6,9	7,1	6,8	7	1184,3	671	1201,7	829	240
22	6,6	7,1	6,8	6,8	1196	673	1204,9	824	240
23	8,3	8	8,15	8,3	1417,2	790	1440,2	796	230
24	6,5	6,5	6,2	6,3	1143	660	1160,2	774	230

Fuente: Elaboración propia

4.5.1. Elaboración de mezcla convencional, porcentaje óptimo de CA 6,13%

Se realizan nueve briquetas con mezcla asfáltica convencional, con contenido de CA de 6,13%, a continuación se muestran un detalle.

Tabla 105. Dosificación para mezcla convencional con contenido óptimo de CA, 6,13%

Porcentaje de CA	6,13	%
Porcentaje de agregados	93,9	%
Grava 3/4"	337,9	gr
Grava 3/8"	225,3	gr
Arena	563,2	gr
CA	73,6	gr
Peso de la muestra	1126,4	gr
Peso del CA	73,6	gr
Peso total	1200,0	gr

Fuente: Elaboración propia

a) Identificación

Los siguientes datos corresponden a las lecturas obtenidas en la rotura de briquetas con contenido de óptimo de CA de 6,13%, correspondientes al primer grupo de ensayo: briquetas 16-18.

b) Altura de briqueta

Tabla 106. Altura de briquetas 16-18, 6,13% de CA

Identificación de briqueta	H1	H2	H3	H4	Altura promedio (cm)
16	7	7	7	6,8	7,0
17	8,7	8,4	8,5	8,7	8,6
18	6,9	6,9	7,1	7	7,0
Altura promedio (cm)					7,5

Fuente: Elaboración propia

c) Porcentaje de asfalto

c1) Base de la mezcla

Base de la mezcla=6,13%

C2) Base de agregado

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

$$\text{Base de agregado} = \frac{6,13 * 100}{100 - 6,13}$$

Base de agregado=6,53%

d) Peso de briqueta en el aire

Tabla 107. Peso de briquetas en el aire 16-18, 6,13% de CA

Identificación de briqueta	Peso de briqueta en el aire (gr)
16	1204
17	1479,3
18	1191,9
Peso promedio (cm)	1291,7

Fuente: Elaboración propia

e) Peso de briqueta en el aire, saturado y superficialmente seco (SSS)

Este valor se refiere al peso obtenido después de sumergir las briquetas durante 30 minutos a una temperatura de 25°C y transcurrido este tiempo, secándolas superficialmente por completo.

Tabla 108. Peso de briquetas SSS 16-18, 6,13% de CA

Identificación de briqueta	Peso de briqueta SSS (gr)
16	1219,5
17	1505,8
18	1215,7
Peso promedio (cm)	1313,7

Fuente: Elaboración propia

f) Peso de briqueta sumergida en agua

Se refiere al valor del peso obtenido durante la sumersión completa de las briquetas en agua a 25°C durante 3 minutos.

Tabla 109. Peso de briquetas sumergidas en agua, 6,13% de CA

Identificación de briqueta	Peso de briqueta sumergidas (gr)
16	691
17	821
18	686
Peso promedio (cm)	732,7

Fuente: Elaboración propia

g) Volumen de briqueta

Volumen ₁ briqueta=Peso SSS-Peso sumergido

Volumen de briqueta=1219,5-691

Volumen de briqueta=528,5 gr

h) Densidad de briqueta

h1) Densidad real de briqueta

$$\text{Densidad real}_1 = \frac{\text{Peso briqueta en el aire}}{\text{Volumen de briqueta}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1204,0}{528,5}$$

$$\text{Densidad real} = 2,26 \text{ gr/cm}^3$$

h2) Densidad máxima teórica de la briqueta

$$\text{Densidad}_{\text{máx teórica}} = 100 / \left(\frac{100}{\text{peso específico del asfalto}} + \frac{100 - \% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico agregado grueso}} \right)$$

$$\text{Densidad}_{\text{máx teórica}} = 100 / \left[\frac{6,13}{1,016} + \frac{100 - 6,13}{2,58} \right]$$

$$\text{Densidad}_{\text{máx teórica}} = 2,36 \text{ gr/cm}^3$$

i) Porcentaje de vacíos

i1) Porcentaje de vacíos de la mezcla

$$V_v = \frac{\text{Densidad}_{\text{máx teórica}} - \text{Densidad}_{\text{promedio de briquetas}}}{\text{Densidad}_{\text{máx teórica}}} * 100$$

$$V_v = \frac{2,36 - 2,26}{2,36} * 100$$

$$V_v = 4,09 \%$$

i2) Porcentaje de vacíos de los agregados

$$\text{VAM} = \frac{\% \text{ de asfalto} * \text{Densidad}_{\text{promedio de briquetas}}}{\text{Peso específico del asfalto}} + V_v$$

$$VAM = \frac{6,13 * 2,26}{1,016} + 4,09$$

$$VAM = 17,15 \%$$

i3) Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

$$RBM = \frac{VAM - V_v}{VAM} * 100$$

$$RBM = \frac{17,15 - 4,09}{17,15} * 100$$

$$RBM = 76,98 \%$$

j) Estabilidad y fluencia

Tabla 110. Lecturas dial, obtenidas de ensayo Marshall, 6,13% de CA

Identificación de briqueta	Lectura dial	
	Estabilidad	Fluencia
	(mm)	-
16	831	240
17	812	230
18	815	240

Fuente: Elaboración propia

Corrección por calibración del equipo Marshall

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

Remplazando el valor número 1 en la ecuación anterior, se tiene:

$$\text{Carga} = (0,012 * 831 - 0,0812) * 102 * 2,2$$

$$\text{Carga} = 2219 \text{ lb}$$

Corrección por altura de briqueta número 16:

Tabla 111. Factores de corrección por altura, 6,13% de CA

Identificación de briqueta	Altura promedio (cm)	Factor de corrección por altura***
16	7,0	0,8676
17	6,9	0,8769
18	6,8	0,8975

Fuente: Elaboración propia

La altura promedio del espécimen número 16 es 7cm. El factor de corrección para esta altura es de 0,8676.

Corrección por calibración de Marshall, para espécimen número 16.

$$\text{Estabilidad}_{\text{corregida } 16} = 2219 * 0,8676$$

$$\text{Estabilidad}_{\text{corregida } 1} = 1925,6 \text{ lb}$$

Tabla 112. Valores reales de ensayo Marshall (Marshall corregido), 6,13% de CA

Estabilidad corregida	Estabilidad (lb)
16	1925,6
17	1783,5
18	1876,1
Estabilidad promedio	1862

Fuente: Elaboración propia

4.5.1.1. Estabilidad promedio, briquetas 16-18.

$$\text{Estabilidad promedio} = 1901 \text{ lb}$$

Corrección de fluencia

Fluencia correspondiente a briqueta número 16.

$$\text{Fluencia corregida} = \left(\frac{\text{Lectura dial fluencia}}{25,4} \right)$$

$$\text{Fluencia corregida}_1 = \frac{240}{25,4}$$

$$\text{Fluencia corregida}_1 = 9,448$$

Tabla 113. Fluencia corregida, 6,13% de CA

Identificación de briqueta	Lectura dial	
	Fluencia	Fluencia corregida
	-	1/100
16	240	9,4488
17	230	9,0551
18	240	9,4488
Promedio		9,318

Fuente: Elaboración propia

4.5.1.2. Fluencia promedio, briquetas 16-18, 6,13% CA

Fluencia promedio = 9,318 (1/100)

Se realiza las mismas consideraciones anteriores con las designaciones de briquetas 19-24, de los cuales se extraen los siguientes resultados:

4.5.1.3. Resumen general de resultados obtenidos, especímenes 16-24

Tabla 114. Resumen de resultados ensayo Marshall, briquetas 16-24 con contenido óptimo de CA de 6,13%

Identificación de briquetas	Estabilidad corregida	Fluencia corregida
	(Lb)	(1/100")
16	1925,6	9,055
17	1783,5	9,055
18	1876,1	9,449
19	1819,1	9,055
20	1942,8	9,449
21	1921	9,449
22	1964,1	9,449
23	1748	9,055
24	1854,2	9,055
Media	1870,5	9,230
Desviación estándar	75,1	0,207
M+Desv (Límite superior)	1945,6	9,4
M+Desv (Límite inferior)	1795,4	9

Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Elaboración de mezcla asfáltica modificada con diferentes porcentajes de polvo de acero y contenido óptimo de CA, 6,13 %

Descripción del ensayo

Para la elaboración de mezclas asfálticas modificadas con adición de polvo de acero, agrega el porcentaje a ensayar sobre el peso total de la briketa, es decir; 1200gr +x% de polvo de acero.

Se toma este criterio, debido a que no existe una especificación en cuanto a porcentaje de adición en mezclas modificadas, además que no existe siquiera una

recomendación. Esta solución es bastante conveniente, ya que el porcentaje de agente modificador no afectará a la mezcla debido a sus bajos porcentajes.

Se utiliza las mismas proporciones de agregados que se utilizaron para la obtención de porcentaje óptimo de cemento asfáltico. Se mantiene la misma faja de trabajo.

A continuación se muestra el primer porcentaje de polvo de acero utilizado para modificar la mezcla asfáltica.

Tabla 115. Dosificación para mezcla modificada con contenido óptimo de CA y 0,5% de adición de polvo de acero

Porcentaje de CA	6,13	%
Porcentaje de agregados	93,87	%
Porcentaje de polvo de acero***	0,5	%
Polvo de acero	6,0	gr
Grava 3/4"	337,9	gr
Grava 3/8"	225,3	gr
Arena	563,2	gr
CA	73,6	gr
Peso del polvo de acero	6,0	gr
Peso del agregado	1126,4	gr
Peso del CA	73,6	gr

***Se adiciona al 100% del peso de la briqueta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 116. Dosificación para mezcla modificada con contenido óptimo de CA y 2% de adición de polvo de acero

Porcentaje de CA	6,13	%
Porcentaje de agregados	93,87	%
Porcentaje de polvo de acero***	2,0	%
Polvo de acero	24,0	gr
Grava 3/4"	337,9	gr
Grava 3/8"	225,3	gr
Arena	563,2	gr
CA	73,6	gr
Peso del polvo de acero	24,0	gr
Peso del agredado	1126,4	gr
Peso del CA	73,6	gr

***Se adiciona al 100% del peso de la briqueta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 117. Dosificación para mezcla modificada con contenido óptimo de CA y 4% de adición de polvo de acero

Porcentaje de CA	6,13	%
Porcentaje de agregados	93,87	%
Porcentaje de polvo de acero***	4,0	%
Polvo de acero	48,0	gr
Grava 3/4"	337,9	gr
Grava 3/8"	225,3	gr
Arena	563,2	gr
CA	73,6	gr
Peso del polvo de acero	48,0	gr
Peso del agredado	1126,4	gr
Peso del CA	73,6	gr

***Se adiciona al 100% del peso de la briqueta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 118. Dosificación para mezcla modificada con contenido óptimo de CA y 6% de adición de polvo de acero

Porcentaje de CA	6,13	%
Porcentaje de agregados	93,87	%
Porcentaje de polvo de acero***	6,0	%
Polvo de acero	72,0	gr
Grava 3/4"	337,9	gr
Grava 3/8"	225,3	gr
Arena	563,2	gr
CA	73,6	gr
Peso del polvo de acero	72,0	gr
Peso del agregado	1126,4	gr
Peso del CA	73,6	gr

***Se adiciona al 100% del peso de la briqueta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 119. Dosificación para mezcla modificada con contenido óptimo de CA y 10% de adición de polvo de acero

Porcentaje de CA	6,13	%
Porcentaje de agregados	93,87	%
Porcentaje de polvo de acero***	10,0	%
Polvo de acero	120,0	gr
Grava 3/4"	337,9	gr
Grava 3/8"	225,3	gr
Arena	563,2	gr
CA	73,6	gr
Peso del polvo de acero	120,0	gr
Peso del agregado	1126,4	gr
Peso del CA	73,6	gr

***Se adiciona al 100% del peso de la briqueta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 120. Dosificación para mezcla modificada con contenido óptimo de CA y 12% de adición de polvo de acero

Porcentaje de CA	6,13	%
Porcentaje de agregados	93,87	%
Porcentaje de polvo de acero***	12,0	%
Polvo de acero	144,0	gr
Grava 3/4"	337,9	gr
Grava 3/8"	225,3	gr
Arena	563,2	gr
CA	73,6	gr
Peso del polvo de acero	144,0	gr
Peso del agregado	1126,4	gr
Peso del CA	73,6	gr

***Se adiciona al 100% del peso de la briqueta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 121. Dosificación para mezcla modificada con contenido óptimo de CA y 14% de adición de polvo de acero

Porcentaje de CA	6,13	%
Porcentaje de agregados	93,87	%
Porcentaje de polvo de acero***	14,0	%
Polvo de acero	168,0	gr
Grava 3/4"	337,9	gr
Grava 3/8"	225,3	gr
Arena	563,2	gr
CA	73,6	gr
Peso del polvo de acero	168,0	gr
Peso del agregado	1126,4	gr
Peso del CA	73,6	gr

***Se adiciona al 100% del peso de la briqueta

Fuente: Elaboración propia

4.5.2.1. Descripción del ensayo

Equipo e instrumentos necesarios

4 Probetas de 4" de diámetro

1 Martillo compactador de 10 libras

1 Extractor de probetas (gata hidráulica)

1 Balanza de precisión $\pm 0,1$ gr

10 Bandejas, fuentes metálicas

1 Cocina

1 Termómetro de 300°C de sensibilidad

4 Espátulas

500 ml de aceite lubricante

Procedimiento

Previo a realizar cualquier acción se debe tener limpios los moldes y base de compactación, ingresarlos en el horno a una temperatura de entre 100 a 150°C.

Se procede pesando el agregado, el cemento asfáltico y el agente modificador, polvo de acero en la balanza de precisión en las fracciones ya determinadas.

Seguidamente se lleva la fuente metálica y su contenido a la hornalla de cocina y se coloca encima de una placa metálica de calentamiento para evitar el contacto directo con la llama, ya que esta puede deteriorar el cemento asfáltico y producir una mezcla de mala calidad.

Durante el tiempo que se encuentre sobre la llama de la cocina es necesario revolver constantemente el contenido de la fuente con una espátula, así como también verificar el incremento de temperatura, estos cuidados lograrán un buen resultado en la mezcla asfáltica.

Una vez alcanzada la temperatura de entre 153 y 175°C se procede a retirar de la llama y se debe introducir de manera inmediata en el interior del molde de compactación, procurando una distribución homogénea de la mezcla.

Se cubre con un disco circular de 3 7/8" por encima de la mezcla, previamente aceitado para evitar que se adhiera a la misma.

Se procede a realizar 75 golpes por cara con el martillo compactador de 10 libra y 18" de caída libre, procurando golpes constantes verticales para obtener briquetas regulares.

Una vez finalizada la compactación se deja enfriar las briquetas a temperatura ambiente durante una noche, posterior a esto se extrae del molde con una gata hidráulica.

4.5.2.2. Resumen general de resultados obtenidos, especímenes con diferentes porcentajes de polvo de acero y porcentaje óptimos de cemento asfáltico

Del presente ensayo se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 122. Lectura de datos, ensayo Marshall, briquetas Nro. 25-45, modificadas con porcentaje de polvo de acero

Nro Briqueta	Altura				Peso			Lectura dial		Adición %acero
	H1	H2	H3	H4	Seco	Sumergido	SSS	Estabilidad	Fluencia	
----	cm	cm	cm	cm	gr	gr	gr	mm	----	
25	6,9	6,9	6,8	6,7	1184,2	669	1200,9	834	240	Bajo 0,5%
26	6,9	6,9	6,7	6,7	1183,7	683	1200	807	230	
27	6,8	6,9	7	6,9	1183,4	681	1201,5	817	240	
28	6,8	7	7,2	7	1217,6	692	1236,1	837,0	260	Bajo 2%
29	7,3	7,1	7	7,3	1214,9	722	1271,2	864,0	250	
30	6,9	6,9	6,9	7	1230,9	711	1241,5	847,0	250	
31	7,1	7,1	7,2	7,2	1255,6	689	1233,3	871,0	250	Medio 4%
32	7	6,9	6,9	6,9	1257,7	708,5	1269,9	837,0	240	
33	7,1	7	7	7,1	1270,3	718	1289,2	894,0	260	
34	7,2	7,2	7	6,9	1286,7	734	1304,6	878,0	260	Medio 6%
35	6,8	7,1	7	7,2	1244,9	705	1259,8	897,0	260	
36	7,1	6,9	7,3	7,3	1283	728	1288,7	865,0	250	
37	7,5	7,3	7,2	7,4	1298,7	748	1316	1024	250	Alto 10%
38	7,3	7,2	7,3	7,2	1317,5	760,5	1339,7	1080	260	
39	7,2	7,5	7,2	7,3	1313,6	758,5	1336,3	1104	250	
40	7,5	7,7	7,7	7,5	1349,4	765	1366,9	1200	270	Alto 12%
41	7,5	7,4	7,4	7,4	1369	778	1353,2	1247	280	
42	7,4	7,5	7,7	7,4	1344	780	1388	1198	270	
43	7,5	7,4	7,5	7,5	1354	770	1370,8	1245	350	Alto 14%
44	7,6	7,6	7,6	7,7	1340,5	783	1369	1340	360	
45	7,7	7,5	7,7	7,6	1353,9	780	1384,7	1313	350	

Fuente: Elaboración propia

4.5.2.3. Depuración de datos, ensayos de estabilidad realizados con equipo Marshall, especímenes 16-45

Tabla 123. Resumen de ensayo de estabilidad. Muestra patrón, briquetas 16-24, % óptimo de CA (6,13%)

Identificación de briquetas	Estabilidad corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	Xi	Xi-X	(Xi-X)^2
16	1925,6	55,11	3037,23
17	1783,5	-86,99	7567,07
18	1876,1	5,61	31,48
19	1819,1	-51,39	2640,82
20	1942,8	72,31	5228,90
21	1921	50,51	2551,37
22	1964,1	93,61	8763,04
23	1748	-122,49	15003,53
24	1854,2	-16,29	265,33
Media=	1870,5	Σ=	45088,77

Fuente: Elaboración propia

Tabla 124. Tratamiento estadístico, briquetas 16-24

Varianza	$\sigma^2=$	5636,10
D.S.	$\sigma=$	75,07
Coefficiente de variación	CV=	4,01%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	25,02
Nivel de confianza	NC=	99,70%
	z=	3,00
Error probable	Ep=	75,07
Valor aceptado (superior)	Va s=	1945,56
Valor aceptado (inferior)	Va i=	1795,41

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Las briquetas número 17, 22 y 23, se encuentran fuera de las condiciones estadísticas de borde. No son tomados en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 125. Resultados finales, briquetas 16-24

Muestra patrón	Estabilidad corregida (lb)
16-24	1889,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 126. Resumen de ensayo de estabilidad. Briquetas 25-27, % óptimo de CA (6,13%) y 0,5% de adición de polvo de acero (porcentajes bajos)

Identificación de briquetas	Estabilidad corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	Xi	Xi-X	(Xi-X)^2
25	1999,2	50,40	2540,16
26	1934	-14,80	219,04
27	1913,2	-35,60	1267,36
Media=	1948,8	Σ=	4026,56

Fuente: Elaboración propia

Tabla 127. Tratamiento estadístico, briquetas 25-27

Varianza	$\sigma^2=$	2013,28
D.S.	$\sigma=$	44,87
Coefficiente de variación	CV=	2,30%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	25,91
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	50,77
Valor aceptado (superior)	Va s=	1999,57
Valor aceptado (inferior)	Va i=	1898,03

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Todos los datos están dentro del rango de confianza.

Tabla 128. Resultados finales, briquetas 25-27

Muestra con polvo de acero 0,5%	Estabilidad corregida (lb)
25-27	1948,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 129. Resumen de ensayo de estabilidad. Briquetas 28-30, % óptimo de CA (6,13%) y 2% de adición de polvo de acero (porcentajes bajos)

Identificación de briquetas	Estabilidad corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	Xi	Xi-X	(Xi-X)^2
28	1918,4	-16,47	271,15
29	1902,1	-32,77	1073,65
30	1984,1	49,23	2423,92
Media=	1934,9	Σ=	3768,73

Fuente: Elaboración propia

Tabla 130. Tratamiento estadístico, briquetas 28-30

Varianza	$\sigma^2=$	1884,36
D.S.	$\sigma=$	43,41
Coefficiente de variación	CV=	2,24%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	25,06
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	49,12
Valor aceptado (superior)	Va s=	1983,99
Valor aceptado (inferior)	Va i=	1885,74

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 30, ya que esta se encuentra fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dicho dato depurado no es tomado en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 131. Resultados finales, briquetas 28-30

Muestra con polvo de acero 2%	Estabilidad corregida (lb)
28-30	1910,25

Fuente: Elaboración propia

Tabla 132. Resumen de ensayo de estabilidad. Briquetas 31-33, % óptimo de CA (6,13%) y 4% de adición de polvo de acero (porcentajes medios)

Identificación de briquetas	Estabilidad corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	Xi	Xi-X	(Xi-X)^2
31	1953,5	-19,60	384,16
32	1960,4	-12,70	161,29
33	2005,4	32,30	1043,29
Media=	1973,1	Σ=	1588,74

Fuente: Elaboración propia

Tabla 133. Tratamiento estadístico 31-33

Varianza	$\sigma^2=$	794,37
D.S.	$\sigma=$	28,18
Coef. de variación	CV=	1,43%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	16,27
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	31,89
Valor aceptado (superior)	Va s=	2004,99
Valor aceptado (inferior)	Va i=	1941,21

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 33, ya que esta se encuentra fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dicho dato depurado no es tomado en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 134. Resultados finales, briquetas 31-33

Muestra con polvo de acero 4%	Estabilidad corregida (lb)
31-33	1956,95

Fuente: Elaboración propia

Tabla 135. Resumen de ensayo de estabilidad. Briquetas 34-36, % óptimo de CA (6,13%) y 6% de adición de polvo de acero (porcentajes medios)

Identificación de briquetas	Estabilidad corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	Xi	Xi-X	(Xi-X)^2
34	1991,9	18,80	353,44
35	2057,1	84,00	7056,00
36	1962,5	-10,60	112,36
Media=	2003,8	Σ=	7521,80

Fuente: Elaboración propia

Tabla 136. Tratamiento estadístico, briquetas 34-36

Varianza	$\sigma^2=$	3760,90
D.S.	$\sigma=$	48,42
Coef. de variación	CV=	2,42%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	27,95
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	54,79
Valor aceptado (superior)	Va s=	2058,62
Valor aceptado (inferior)	Va i=	1949,05

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 35, ya que esta se encuentra fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dicho dato depurado no es tomado en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 137. Resultados finales, briquetas 34-36

Muestra con polvo de acero 6%	Estabilidad corregida (lb)
34-36	2003,83

Fuente: Elaboración propia

Tabla 138. Resumen de ensayo de estabilidad. Briquetas 37-39, % óptimo de CA (6,13%) y 10% de adición de polvo de acero (porcentajes altos)

Identificación de briquetas	Estabilidad corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
		Xi	(Xi-X)^2
37	2221,5	-111,53	12439,68
38	2381,4	48,37	2339,33
39	2396,2	63,17	3990,03
Media=	2333,0	Σ=	18769,05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 139. Tratamiento estadístico, briquetas 37-39

Varianza	$\sigma^2=$	9384,52
D.S.	$\sigma=$	96,87
Coefficiente de variación	CV=	4,15%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	55,93
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	109,62
Valor aceptado (superior)	Va s=	2442,66
Valor aceptado (inferior)	Va i=	2223,41

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 37, ya que esta se encuentra fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dicho dato depurado no es tomado en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 140. Resultados finales, briquetas 37-39

Muestra con polvo de acero 10%	Estabilidad corregida (lb)
37-39	2388,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 141. Resumen de ensayo de estabilidad. Briquetas 40-42, % óptimo de CA (6,13%) y 12% de adición de polvo de acero (porcentajes altos)

Identificación de briquetas	Estabilidad corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
		$X_i - X$	$(X_i - X)^2$
	X_i		
40	2451,6	-75,93	5765,87
41	2645,0	117,47	13798,42
42	2486,0	-41,53	1725,02
Media=	2527,5	$\Sigma=$	21289,31

Fuente: Elaboración propia

Tabla 142. Tratamiento estadístico, briquetas 40-42

Varianza	$\sigma^2=$	10644,65
D.S.	$\sigma=$	103,17
Coefficiente de variación	CV=	4,08%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	59,57
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	116,75
Valor aceptado (superior)	Va s=	2644,28
Valor aceptado (inferior)	Va i=	2410,78

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 41.

Tabla 143. Resultados finales, briquetas 40-42

Muestra con polvo de acero 12%	Estabilidad corregida (lb)
40-42	2468,8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 144. Resumen de ensayo de estabilidad. Briquetas 43-45, % óptimo de CA (6,13%) y 14% de adición de polvo de acero (porcentajes altos)

Identificación de briquetas	Estabilidad corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	Xi	Xi-X	(Xi-X)^2
43	2584,1	-84,97	7219,33
44	2739,3	70,23	4932,72
45	2683,8	14,73	217,07
Media=	2669,1	Σ=	12369,13

Fuente: Elaboración propia

Tabla 145. Tratamiento estadístico, briquetas 43-45

Varianza	$\sigma^2=$	6184,56
D.S.	$\sigma=$	78,64
Coefficiente de variación	CV=	2,95%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	45,40
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	88,99
Valor aceptado (superior)	Va s=	2758,06
Valor aceptado (inferior)	Va i=	2580,07

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Todos los datos se encuentran dentro del rango de confianza, se utilizan todos ellos en los cálculos posteriores.

Tabla 146. Resultados finales, briquetas 43-45

Muestra con polvo de acero 14%	Estabilidad corregida (lb)
43-45	2669,07

Fuente: Elaboración propia

4.5.2.4. Depuración de datos, ensayos de fluencia realizados con equipo Marshall, especímenes 16-45

Tabla 147. Resumen de ensayos de fluencia. Muestra patrón, briquetas 16-24, % óptimo de CA (6,13%)

Identificación de briquetas	Fluencia corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	Xi	Xi-X	(Xi-X)^2
16	9,055	-0,18	0,03
17	9,055	-0,18	0,03
18	9,449	0,22	0,05
19	9,055	-0,18	0,03
20	9,449	0,22	0,05
21	9,449	0,22	0,05
22	9,449	0,22	0,05
23	9,055	-0,18	0,03
24	9,055	-0,18	0,03
Media=	9,230	Σ=	0,34

Fuente: Elaboración propia

Tabla 148. Tratamiento estadístico, briquetas 16-24

Varianza	$\sigma^2=$	0,04
D.S.	$\sigma=$	0,21
Coefficiente de variación	CV=	2,25%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	0,07
Nivel de confianza	NC=	99,70%
	z=	3,00
Error probable	Ep=	0,21
Valor aceptado (superior)	Va s=	9,44
Valor aceptado (inferior)	Va i=	9,02

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de las briquetas número 18, 20, 21 y 22, ya que estas se encuentran fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dichos datos depurados no son tomados en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 149. Resultados finales, briquetas 16-24

Muestra patrón	Fluencia corregida (lb)
16-24	9,1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 150. Resumen de ensayo de. Briquetas 25-27, % óptimo de CA (6,13%) y 0,5% de adición de polvo de acero (porcentajes bajos)

Identificación de briquetas	Fluencia corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	X_i	$X_i - X$	$(X_i - X)^2$
25	9,449	0,13	0,02
26	9,055	-0,26	0,07
27	9,449	0,13	0,02
Media=	9,318	$\Sigma=$	0,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 151. Tratamiento estadístico, briquetas 25-27

Varianza	$\sigma^2=$	0,05
D.S.	$\sigma=$	0,23
Coefficiente de variación	CV=	2,44%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	0,13
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	0,26
Valor aceptado (superior)	Va s=	9,58
Valor aceptado (inferior)	Va i=	9,06

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 26, ya que esta se encuentra fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dicho dato depurado no es tomado en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 152. Resultados finales, briquetas 25-27

Muestra con % de polvo de acero 0,5%	Fluencia corregida (lb)
25-27	9,449

Fuente: Elaboración propia

Tabla 153. Resumen de ensayo de fluencia. Briquetas 28-30, % óptimo de CA (6,13%) y 2% de adición de polvo de acero (porcentajes bajos)

Identificación de briquetas	Fluencia corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	X_i	$X_i - X$	$(X_i - X)^2$
28	10,236	0,26	0,07
29	9,843	-0,13	0,02
30	9,843	-0,13	0,02
Media=	9,974	$\Sigma=$	0,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 154. Tratamiento estadístico, briquetas 28-30

Varianza	$\sigma^2=$	0,05
D.S.	$\sigma=$	0,23
Coefficiente de variación	CV=	2,27%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	0,13
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	0,26
Valor aceptado (superior)	Va s=	10,23
Valor aceptado (inferior)	Va i=	9,72

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 28, ya que esta se encuentra fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dicho dato depurado no es tomado en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 155. Resultados fin ales, briquetas 28-30

Muestra con % de polvo de acero 2%	Fluencia corregida (lb)
28-30	9,843

Fuente: Elaboración propia

Tabla 156. Resumen de ensayos de fluencia. Briquetas 31-33, % óptimo de CA (6,13%) y 4% de adición de polvo de acero (porcentajes medios)

Identificación de briquetas	Fluencia corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	X_i	$X_i - X$	$(X_i - X)^2$
31	9,843	0,002	0,00
32	9,443	-0,398	0,16
33	10,236	0,395	0,16
Media=	9,841	Σ=	0,31

Fuente: Elaboración propia

Tabla 157. Tratamiento estadístico, briquetas 31-33

Varianza	$\sigma^2 =$	0,16
D.S.	$\sigma =$	0,40
Coficiente de variación	CV=	4,03%
Error medio de la media	$\sigma_m =$	0,23
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	0,45
Valor aceptado (superior)	Va s=	10,29
Valor aceptado (inferior)	Va i=	9,39

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Todos los datos se cumplen las condiciones estadísticas de borde, por lo que todas serán útiles en cálculos posteriores.

Tabla 158. Resultados finales, briquetas 31-33

Muestra con % de polvo de acero 4%	Fluencia corregida (lb)
31-33	9,840

Fuente: Elaboración propia

Tabla 159. Resumen de ensayo de fluencia. Briquetas 34-36, % óptimo de CA (6,13%) y 6% de adición de polvo de acero (porcentajes medios)

Identificación de briquetas	Fluencia corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	Xi	Xi-X	(Xi-X)^2
34	10,236	0,13	0,02
35	10,236	0,13	0,02
36	9,843	-0,26	0,07
Media=	10,105	Σ=	0,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 160. Tratamiento estadístico, briquetas 34-36

Varianza	$\sigma^2=$	0,05
D.S.	$\sigma=$	0,23
Coef. de variación	CV=	2,25%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	0,13
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	0,26
Valor aceptado (superior)	Va s=	10,36
Valor aceptado (inferior)	Va i=	9,85

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 36, ya que esta se encuentra fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dicho dato depurado no es tomado en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 161. Resultados finales, briquetas 34-36

Muestra con % de polvo de acero 6%	Fluencia corregida (lb)
34-36	10,236

Fuente: Elaboración propia

Tabla 162. Resumen de ensayo de fluencia. Briquetas 37-39, % óptimo de CA (6,13%) y 10% de adición de polvo de acero (porcentajes altos)

Identificación de briquetas	Fluencia corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	X_i	$X_i - X$	$(X_i - X)^2$
37	10,236	-0,13	0,02
38	10,236	-0,13	0,02
39	10,630	0,26	0,07
Media=	10,367	$\Sigma=$	0,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 163. Tratamiento estadístico, briquetas 37-39

Varianza	$\sigma^2=$	0,05
D.S.	$\sigma=$	0,23
Coefficiente de variación	CV=	2,19%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	0,13
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	$E_p=$	0,26
Valor aceptado (superior)	Va s=	10,62
Valor aceptado (inferior)	Va i=	10,11

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 39, ya que esta se encuentra fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dicho dato depurado no es tomado en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 164. Resultados finales, briquetas 37-39

Muestra con % de polvo de acero 10%	Fluencia corregida (lb)
37-39	10,236

Fuente: Elaboración propia

Tabla 165. Resumen de ensayo de fluencia. Briquetas 40-42, % óptimo de CA (6,13%) y 12% de adición de polvo de acero (porcentajes altos)

Identificación de briquetas	Fluencia corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	Xi	Xi-X	(Xi-X)^2
40	10,63	-0,13	0,02
41	11,02	0,26	0,07
42	10,63	-0,13	0,02
Media=	10,761	Σ=	0,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 166. Tratamiento estadístico, briquetas 40-42

Varianza	$\sigma^2=$	0,05
D.S.	$\sigma=$	0,23
Coefficiente de variación	CV=	2,11%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	0,13
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	0,26
Valor aceptado (superior)	Va s=	11,02
Valor aceptado (inferior)	Va i=	10,50

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 41, ya que esta se encuentra fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dicho dato depurado no es tomado en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 167. Resultados finales, briquetas 40-42

Muestra con % de polvo de acero 12%	Fluencia corregida (lb)
40-42	10,630

Fuente: Elaboración propia

Tabla 168. Resumen de ensayo de fluencia. Briquetas 43-45, % óptimo de CA (6,13%) y 14% de adición de polvo de acero (porcentajes altos)

Identificación de briquetas	Fluencia corregida (lb)	Tratamiento estadístico	
	X_i	$X_i - X$	$(X_i - X)^2$
43	12,598	-0,13	0,02
44	12,992	0,26	0,07
45	12,598	-0,13	0,02
Media=	12,729	$\Sigma=$	0,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 169. Tratamiento estadístico, briquetas 43-45

Varianza	$\sigma^2=$	0,05
D.S.	$\sigma=$	0,23
Coef. de variación	CV=	1,79%
Error medio de la media	$\sigma_m=$	0,13
Nivel de confianza	NC=	95,00%
	z=	1,96
Error probable	Ep=	0,26
Valor aceptado (superior)	Va s=	12,99
Valor aceptado (inferior)	Va i=	12,47

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se depuran los datos resultados obtenidos en la evaluación de la briqueta número 44, ya que esta se encuentra fuera de las condiciones estadísticas de borde. Dicho dato depurado no es tomado en cuenta en los cálculos posteriores.

Tabla 170. Resultados finales, briquetas 43-45

Muestra con % de polvo de acero 14%	Fluencia corregida (lb)
43-45	12,598

Fuente: Elaboración propia

4.5.2.5. Análisis estadístico, coeficiente de variación (CV)

Estabilidad

Tabla 171. Resumen de resultados de Coeficiente de variación. Datos de estabilidad, especímenes 16-45

Muestra	CV Estabilidad promedio	Valor de CV	Grado en que la media representa a la serie
	%		
16-24	2,3	Entre 0 y 10%	Media altamente representativa
25-27	0,5	Entre 0 y 10%	Media altamente representativa
28-30	0,4	Entre 0 y 10%	Media altamente representativa
31-33	0,2	Entre 0 y 10%	Media altamente representativa
34-36	0,7	Entre 0 y 10%	Media altamente representativa
37-39	0,3	Entre 0 y 10%	Media altamente representativa
40-42	0,7	Entre 0 y 10%	Media altamente representativa
43-45	1,4	Entre 0 y 10%	Media altamente representativa

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados: Como se puede observar los valores de CV se encuentran en un rango de 0 a 10%, por lo que la serie de datos de estabilidad y fluencia se consideran altamente representativos.

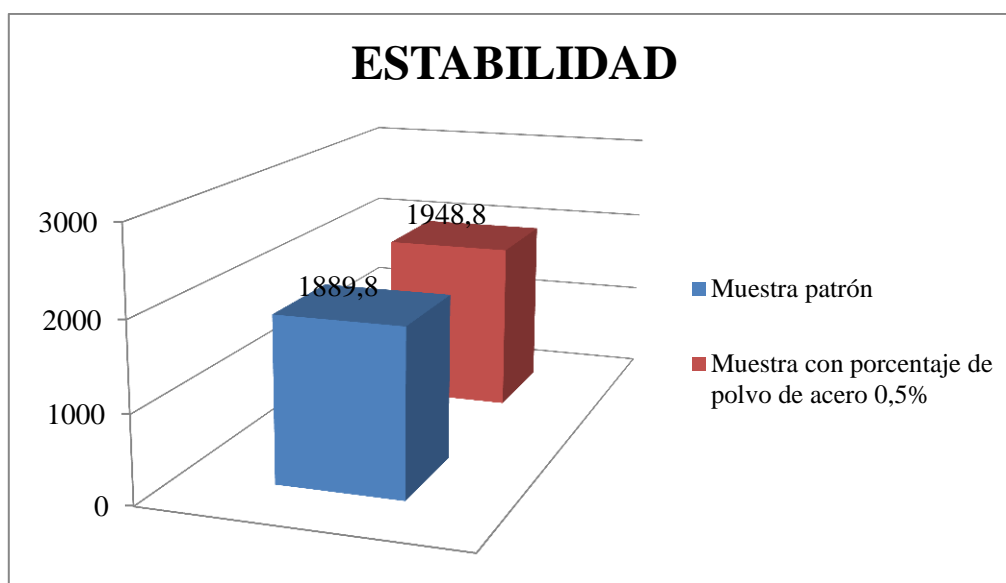
4.6. Análisis de resultados de estabilidad obtenidos, especímenes 16-45

Tabla 172. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 25-27

Muestra patrón	Estabilidad corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 0,5%	Estabilidad corregida
	(lb)		(lb)
16-24	1889,8	25-27	1948,8

Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 25-27



Fuente: Elaboración propia

Tabla 173. Diferencia porcentual, especímenes 25-27

Muestra con porcentaje de polvo de acero 0,5%	Estabilidad corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
25-27	1948,8	3,12

Fuente: Elaboración propia

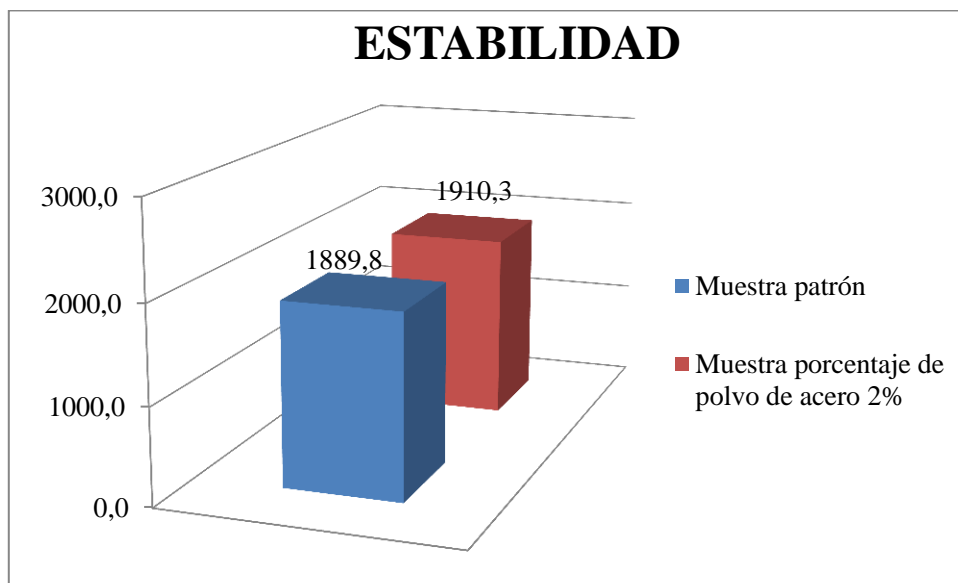
Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 0,5% incrementa su propiedad de estabilidad en un 3,12%.

Tabla 174. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 28-30

Muestra patrón	Estabilidad corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 2%	Estabilidad corregida
	(lb)		(lb)
16-24	1889,8	28-30	1910,25

Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 28-30



Fuente: Elaboración propia

Figura 20. Diferencia porcentual, especímenes 28-30

Muestra con porcentaje de polvo de acero 2%	Estabilidad corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
28-30	1910,3	1,08

Fuente: Elaboración propia

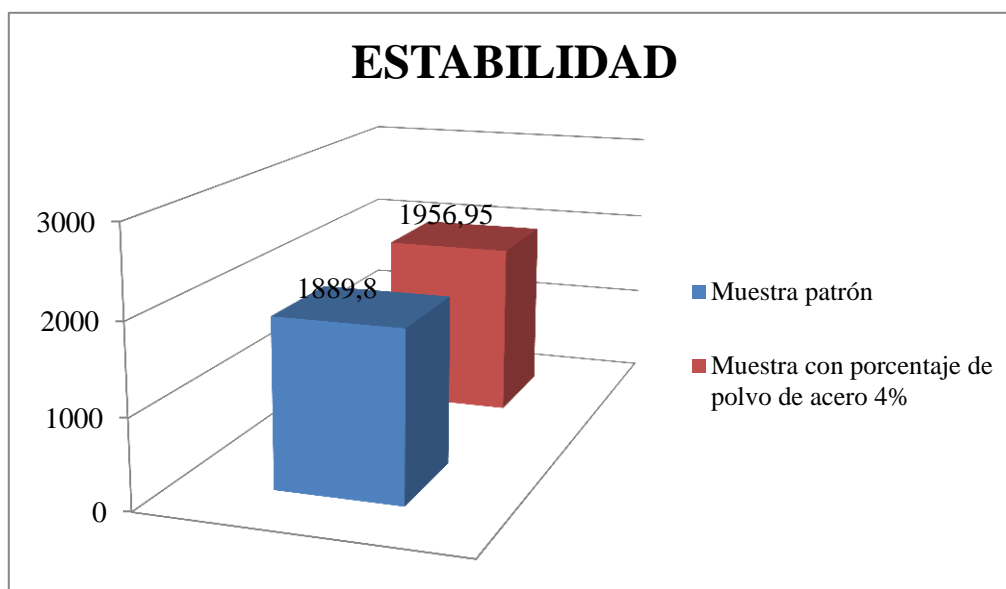
Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 2% incrementa su propiedad de estabilidad en un 1,08%.

Tabla 175. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 31-33

Muestra patrón	Estabilidad corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 4%	Estabilidad corregida
	(lb)		(lb)
16-24	1889,8	31-33	1956,95

Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 31-33



Fuente: Elaboración propia

Tabla 176. Diferencia porcentual, especímenes 31-33

Muestra con porcentaje de polvo de acero 4%	Estabilidad corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
31-33	1957,0	3,55

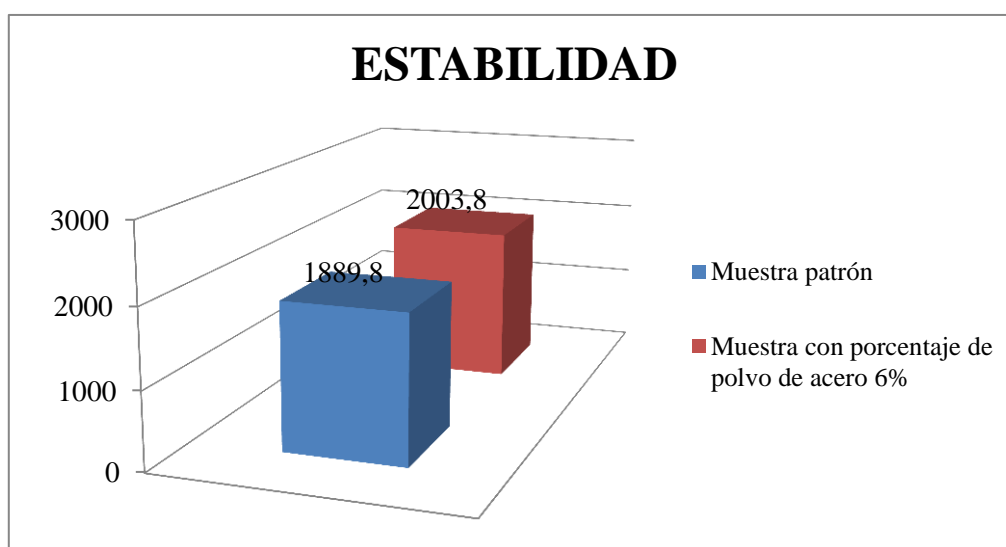
Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 4% incrementa su propiedad de estabilidad en un 3,55%.

Tabla 177. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 34-36

Muestra patrón	Estabilidad corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 6%	Estabilidad corregida
	(lb)		(lb)
16-24	1889,8	34-36	2003,8

Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 34-36

Fuente: Elaboración propia

Tabla 178. Diferencia porcentual, especímenes 34-36

Muestra con porcentaje de polvo de acero 6%	Estabilidad corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
34-36	2003,8	6,03

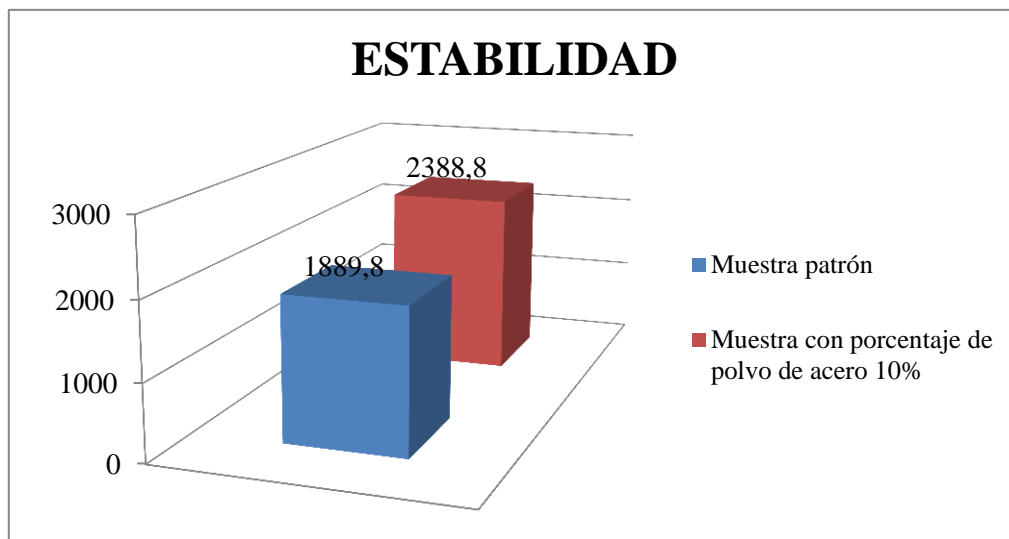
Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 6% incrementa su propiedad de estabilidad en un 6,03%.

Tabla 179. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 37-39

Muestra patrón	Estabilidad corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 10%	Estabilidad corregida
	(lb)		(lb)
16-24	1889,8	37-39	2388,8

Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 37-39

Fuente: Elaboración propia

Tabla 180. Diferencia porcentual, especímenes 37-39

Muestra con porcentaje de polvo de acero 10%	Estabilidad corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
37-39	2388,8	26,40

Fuente: Elaboración propia

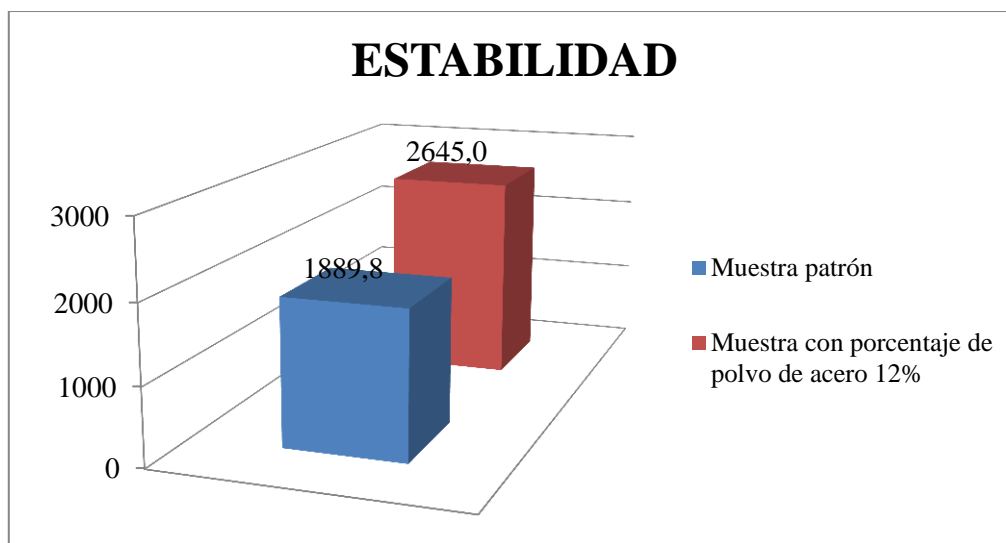
Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 10% incrementa su propiedad de estabilidad en un 26,40%.

Tabla 181. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 40-42

Muestra patrón	Estabilidad corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 12%	Estabilidad corregida
	(lb)		(lb)
16-24	1889,8	40-42	2645,0

Fuente: Elaboración propia

Figura 24. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 40-42



Fuente: Elaboración propia

Tabla 182. Diferencia porcentual, especímenes 40-42

Muestra con porcentaje de polvo de acero 12%	Estabilidad corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
40-42	2645,0	39,96

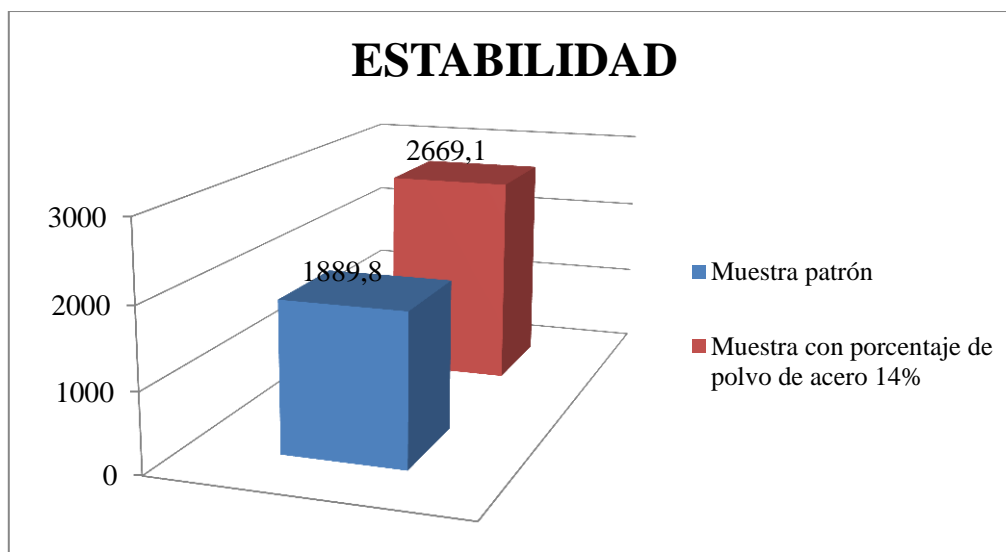
Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 12% incrementa su propiedad de estabilidad en un 39,96%.

Tabla 183. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 43-45

Muestra patrón	Estabilidad corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 14%	Estabilidad corregida
	(lb)		(lb)
16-24	1889,8	43-45	2669,1

Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Resultados corregidos de estabilidad, especímenes 43-45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 184. Diferencia porcentual, especímenes 43-45

Muestra con porcentaje de polvo de acero 14%	Estabilidad corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
43-45	2669,1	41,24

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 14% incrementa su propiedad de estabilidad en un 41,24%.

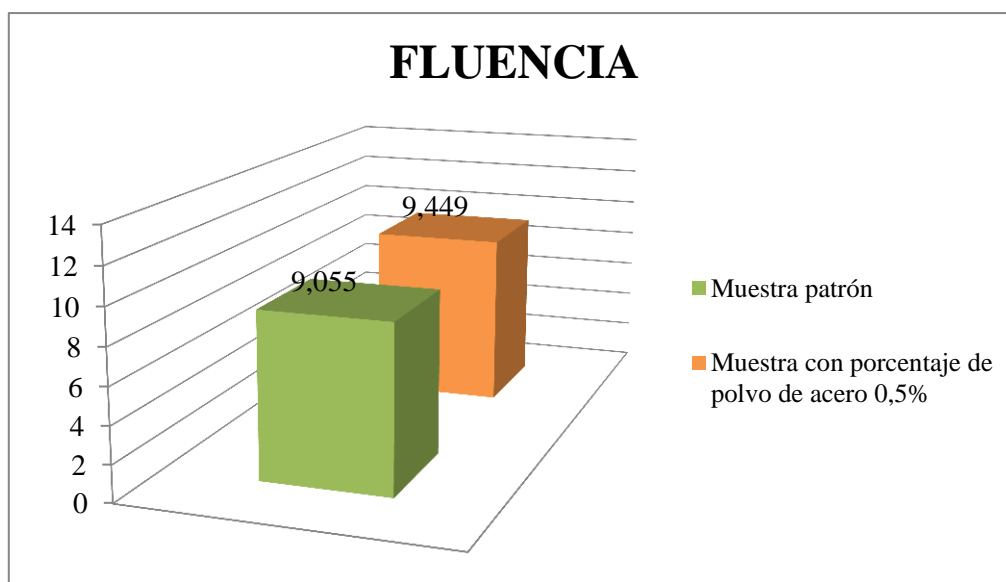
4.7. Análisis resultados de fluencia obtenidos, especímenes 16-45

Tabla 185. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 25-27

Muestra patrón	Fluencia corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 0,5%	Fluencia corregida
	(lb)		1/100"
16-24	9,055	25-27	9,449

Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 25-27



Fuente: Elaboración propia

Tabla 186. Diferencia fluencia, especímenes 25-27

Muestra con porcentaje de polvo de acero 0,5%	Fluencia corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
25-27	9,4	4,35

Fuente: Elaboración propia

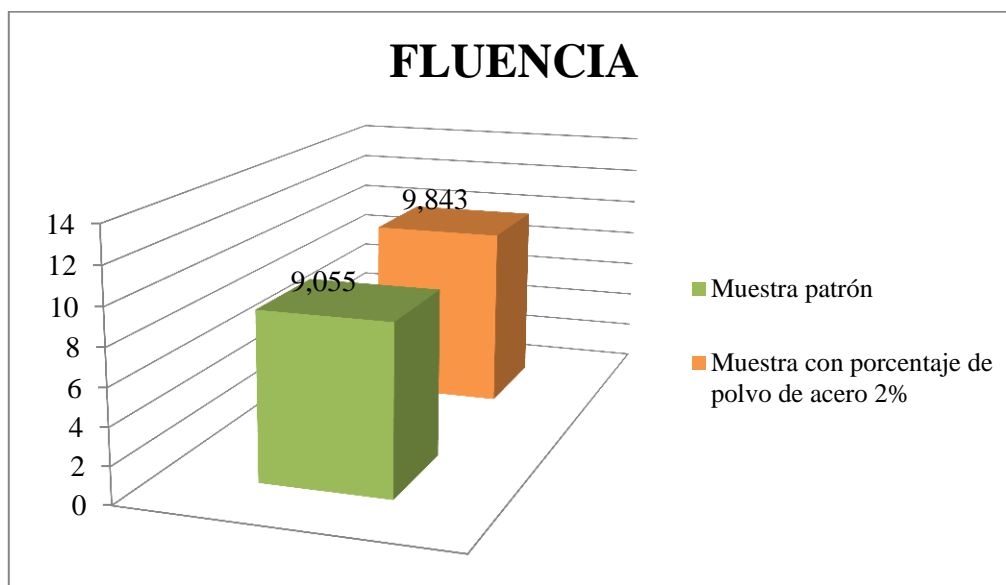
Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 0,5% incrementa su propiedad de fluencia en un 4,35%.

Tabla 187. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 28-30

Muestra patrón	Fluencia corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 2%	Fluencia corregida
	(lb)		1/100"
16-24	9,055	28-30	9,843

Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 28-30



Fuente: Elaboración propia

Tabla 188. Diferencia fluencia, especímenes 28-30

Muestra con porcentaje de polvo de acero 2%	Fluencia corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
28-30	9,8	8,70

Fuente: Elaboración propia

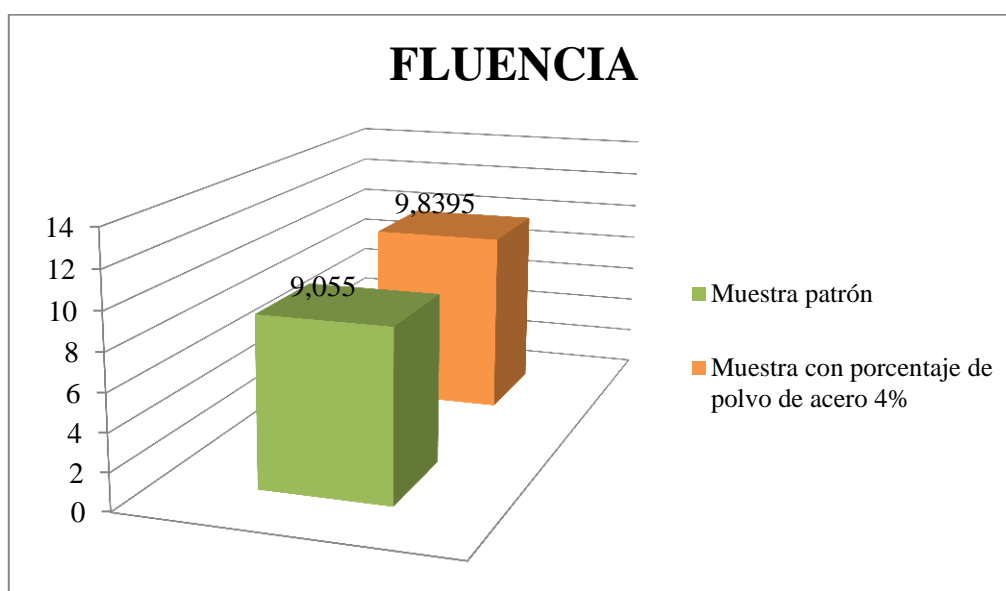
Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 2% incrementa su propiedad de fluencia en un 8,70%.

Tabla 189. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 31-33

Muestra patrón	Fluencia corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 4%	Fluencia corregida
	(lb)		1/100"
16-24	9,055	31-33	9,8395

Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 31-33



Fuente: Elaboración propia

Tabla 190. Diferencia fluencia, especímenes 31-33

Muestra con porcentaje de polvo de acero 4%	Fluencia corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
31-33	9,8	8,66

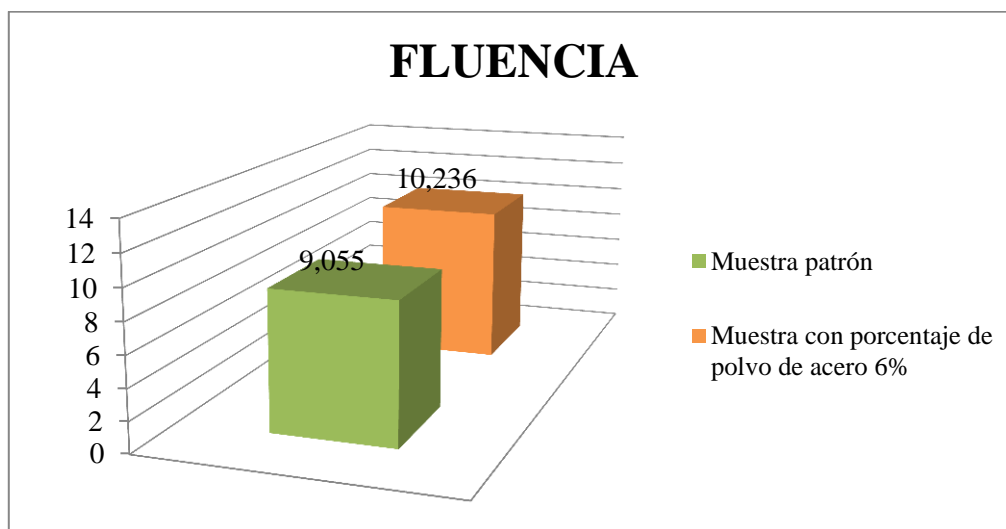
Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 4% incrementa su propiedad de fluencia en un 8,66%.

Tabla 191. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 34-36

Muestra patrón	Fluencia corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 6%	Fluencia corregida
	(lb)		1/100"
16-24	9,055	34-36	10,236

Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 34-36

Fuente: Elaboración propia

Tabla 192. Diferencia fluencia, especímenes 34-36

Muestra con porcentaje de polvo de acero 6%	Fluencia corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
34-36	10,2	13,04

Fuente: Elaboración propia

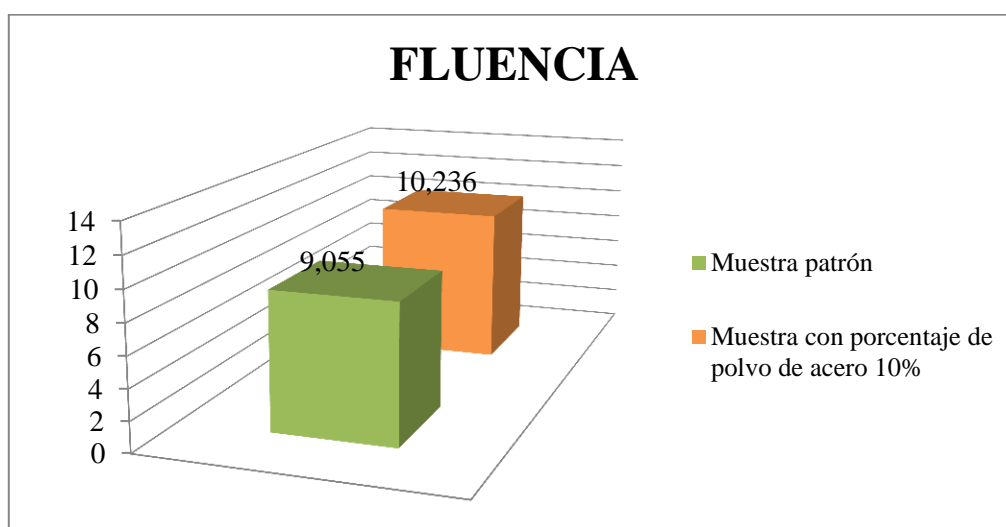
Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 6% incrementa su propiedad de fluencia en un 13,04%.

Tabla 193. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 37-39

Muestra patrón	Fluencia corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 10%	Fluencia corregida
	(lb)		1/100"
16-24	9,055	37-39	10,236

Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 37-39



Fuente: Elaboración propia

Tabla 194. Diferencia fluencia, especímenes 37-39

Muestra con porcentaje de polvo de acero 10%	Fluencia corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
37-39	10,2	13,04

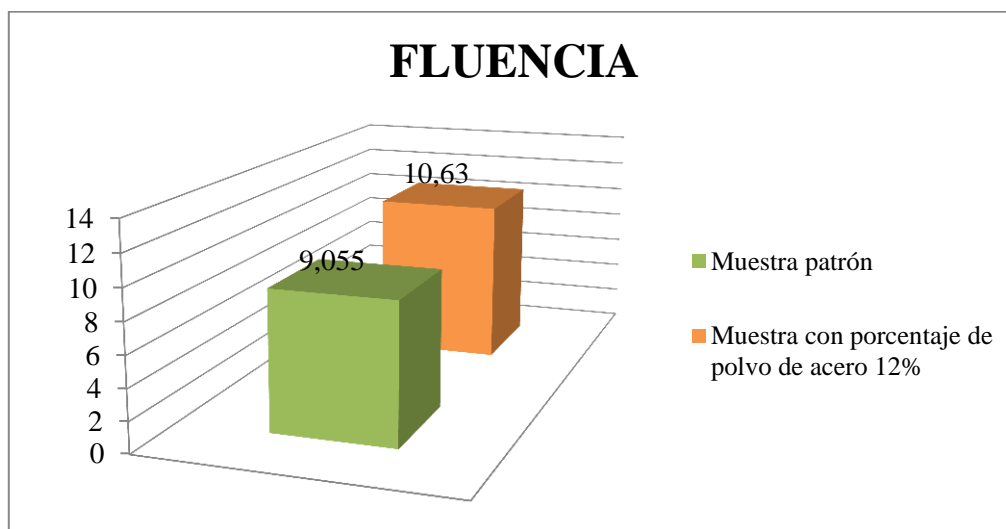
Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 10% incrementa su propiedad de fluencia en un 13,04%.

Tabla 195. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 40-42

Muestra patrón	Fluencia corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 12%	Fluencia corregida
	(lb)		1/100"
16-24	9,055	40-42	10,63

Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 40-42

Fuente: Elaboración propia

Tabla 196. Diferencia fluencia, especímenes 40-42

Muestra con porcentaje de polvo de acero 12%	Fluencia corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
40-42	10,6	17,39

Fuente: Elaboración propia

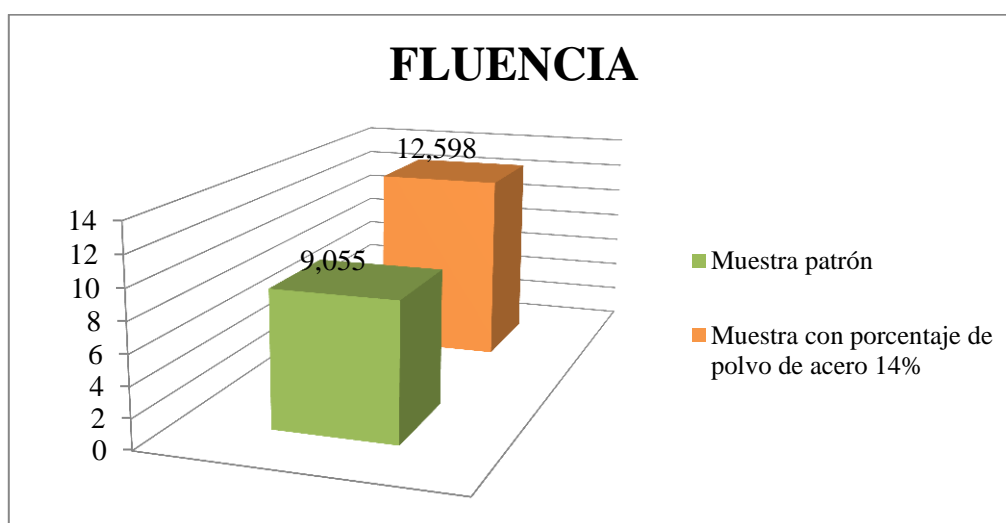
Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 12% incrementa su propiedad de fluencia en un 17,39%.

Tabla 197. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 43-45

Muestra patrón	Fluencia corregida	Muestra con porcentaje de polvo de acero 14%	Fluencia corregida
	(lb)		1/100"
16-24	9,055	43-45	12,598

Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Resultados corregidos de fluencia, especímenes 43-45



Fuente: Elaboración propia

Tabla 198. Diferencia fluencia, especímenes 43-45

Muestra con porcentaje de polvo de acero 14%	Fluencia corregida	Diferencia porcentual convencional
	(lb)	%
43-45	12,6	39,13

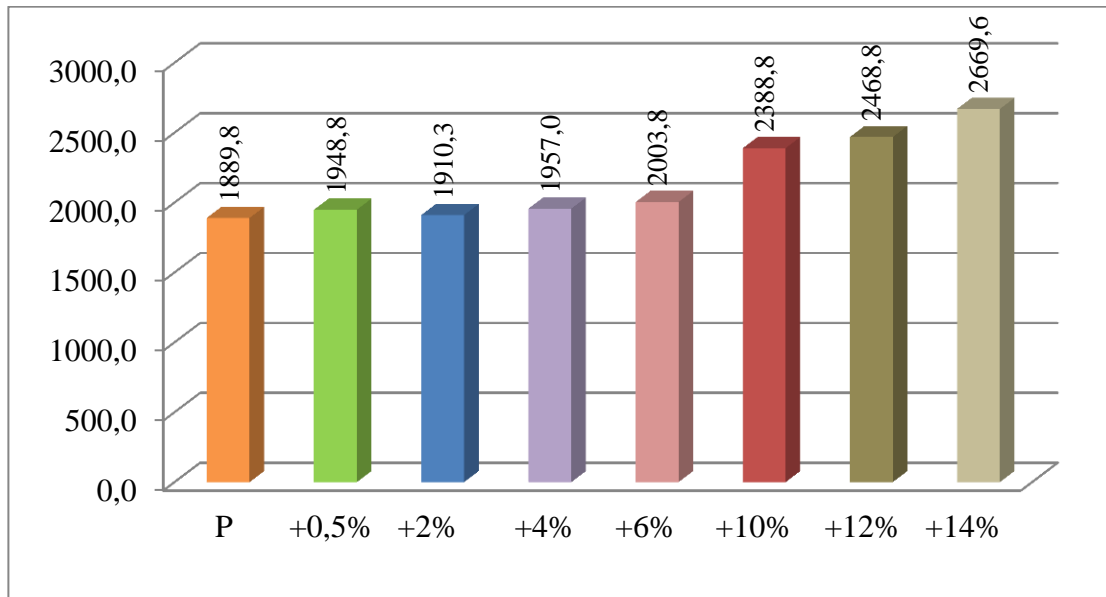
Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados: La adición de polvo de acero a una mezcla asfáltica convencional en un 14% incrementa su propiedad de fluencia en un 39,13%.

4.8. Análisis de resultados

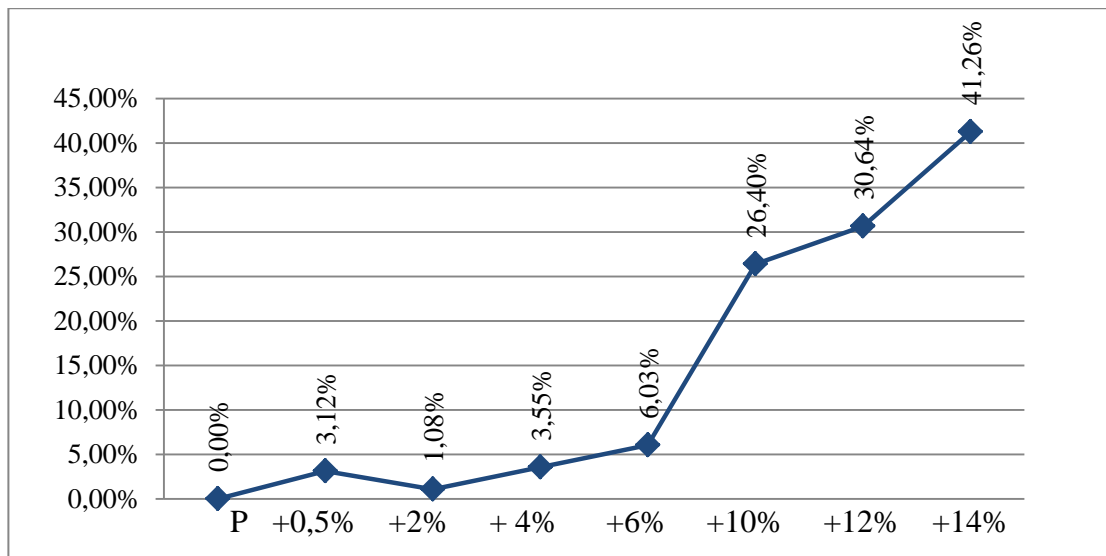
4.8.1. Estabilidad

Figura 33. Comparación de variación de resultados de estabilidad obtenidos en ensayo Marshall, especímenes 16-45



Fuente: Elaboración propia

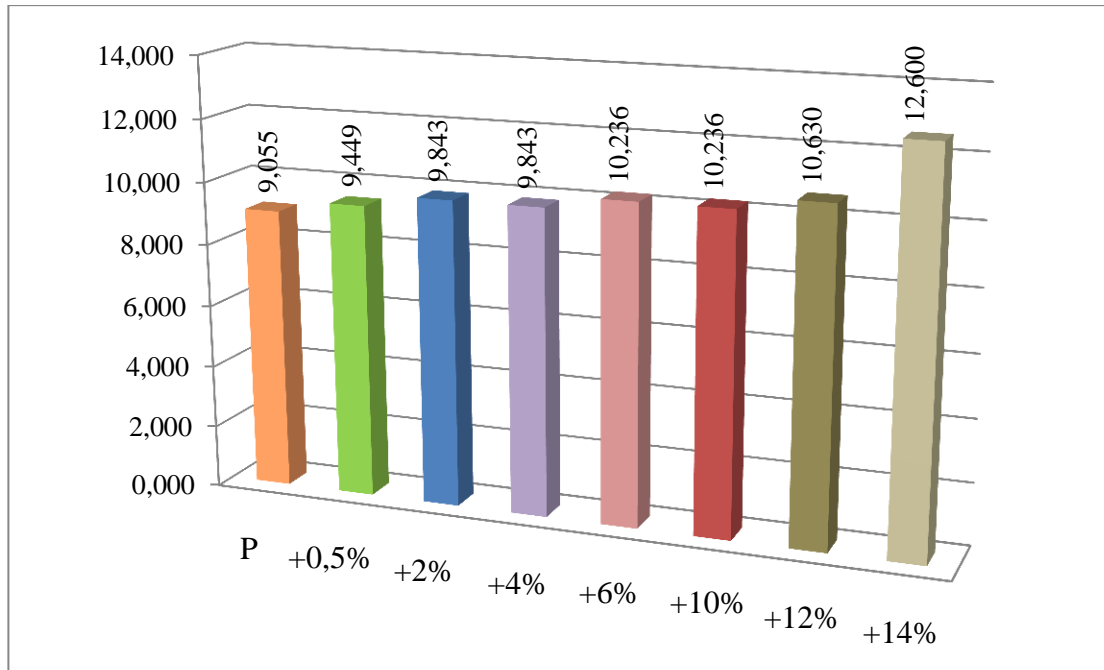
Figura 34. Comparación de variación porcentual de resultados de estabilidad obtenidos en ensayo Marshall, especímenes 16-45



Fuente: Elaboración propia

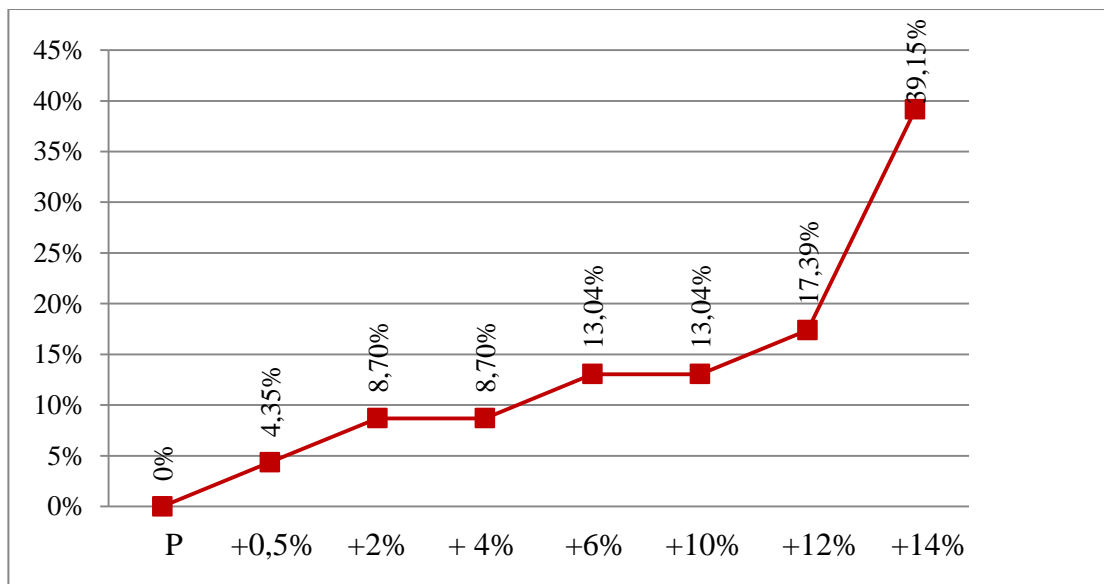
4.8.2. Fluencia

Figura 35. Comparación de variación de resultados de fluencia obtenidos en ensayo Marshall, especímenes 16-45



Fuente: Elaboración propia

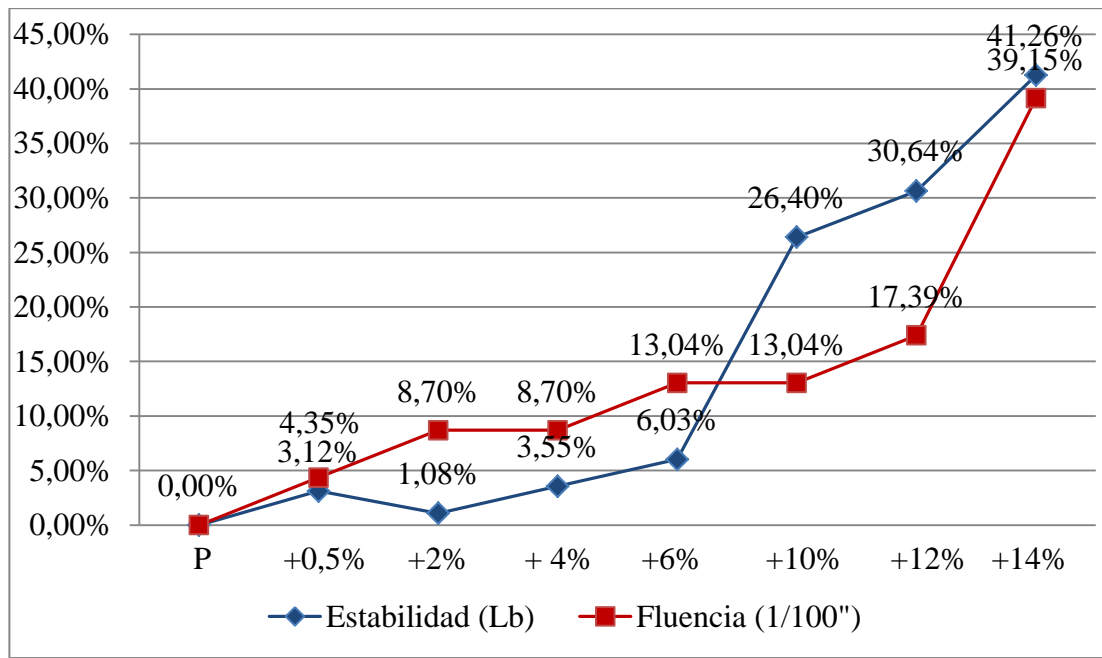
Figura 36. Comparación de variación porcentual de resultados de fluencia obtenidos en ensayo Marshall, especímenes 16-45



Fuente: Elaboración propia

4.8.3. Estabilidad y fluencia

Figura 37. Variación porcentual de resultados de Estabilidad y Fluencia obtenidos en ensayo Marshall, especímenes 16-45



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Se observa que la estabilidad y la fluencia se incrementan muy sutilmente, hasta un 6,03% y 13,04% respectivamente, con adiciones porcentuales que van desde 0,5 hasta 6%.

Se observa que la estabilidad sufre un cambio en su tendencia a partir del porcentaje de adición del agente modificador polvo de acero de 10%, es así que sufre un incremento vertiginoso de la propiedad de estabilidad, hasta alcanzar un pico máximo de 41,26% con el máximo porcentaje de adición de acero en polvo, correspondiente al 14%.

La fluencia se mantiene sin cambios representativos desde el porcentaje 0,5% al 10%. A partir de 12% se observa un incremento repentino, que alcanza un pico máximo de 30,64%, esto indica que al ser la mezcla más estable es también más deformable, sin

embargo todas las muestras se encuentran dentro de los límites permisibles según norma, que indica un rango entre 8 y 16 (1/100")

Se puede observar que existe una relación intrínseca entre la estabilidad y la fluencia y sus incrementos porcentuales en función al aumento de adición de agente modificador, que es directamente proporcional a este.

Tabla 199. Resumen general de resultados obtenidos, especímenes 16-45

Nro.	Adición de polvo de acero (%)	Densidad Promedio	Densidad Máxima Teórica	% de Vacíos mezcla total	V.A.M. (Vacíos agregado mineral)	R.B.V. (Relación Betumen Vacíos)	Estabilidad (lb)	Fluencia (1/100")
Patrón 16-24	0	2,27	2,36	3,84%	17,54%	78,11%	1889,8	9,055
25-27	0,5	2,26	2,36	4,13%	17,78%	76,79%	1948,8	9,449
28-30	4	2,26	2,36	4,40%	18,02%	75,58%	1910,3	9,843
31-33	6	2,26	2,36	4,39%	18,01%	75,63%	1957,0	9,843
34-36	8	2,26	2,37	4,35%	17,69%	75,40%	2003,8	10,236
37-39	10	2,26	2,36	4,38%	18,00%	75,67%	2388,8	10,236
40-42	12	2,25	2,36	4,58%	18,17%	75,22%	2468,8	10,630
43-45	14	2,25	2,36	4,80%	18,36%	74,99%	2669,6	12,600
Norma:	-	-	-	de 3 a 5	>15	de 75 a 85	>1800	de 8 a 14

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Se observa que la densidad promedio sufre cambios despreciables e imperceptibles cambios durante la adición de agente modificador. Esta se mantiene en una media de 2,26 gr/cm³.

Se puede observar cambios despreciables en cuanto a la densidad máxima teórica cuando se adiciona porcentajes de polvo de acero a la mezcla asfáltica. Esta se mantiene en una media de 2,36%.

La relación betumen vacíos, R.B.V., sufre un decremento gradual, durante la adición de polvo de acero. Se puede observar que este es inversamente proporcional al incremento de agente modificador. Al incrementarse el porcentaje de adición del polvo de acero se hace insuficiente el porcentaje de cemento asfáltico. Es así que en el promedio de especímenes 43, 44 y 45; el porcentaje de R.B.V. llega al límite mínimo permisible que indica la norma ($R.B.V > 75\%$). Los especímenes 25 al 42 cumplen satisfactoriamente con la norma. Es así que el máximo porcentaje de adición de polvo de acero que puede cumplir con los rigores de la norma es el de 12%, en desmedro de la estabilidad que puede seguir incrementando con adiciones de mayor cuantía, y la fluencia, que se encuentra aún entre los rangos permisibles en la norma.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En ciertos porcentajes adicionados, el uso de polvo de acero como agente modificador en mezclas asfálticas, mejora la propiedad de estabilidad de las mezclas asfálticas, sin embargo; la propiedad de fluencia no mejora, es más a mayor adición del agente modificador, este desmejora sus propiedades, aumentando sus valores hasta quedar por fuera de lo permitido por la norma.

Los resultados de estabilidad obtenidos con adición de polvo de acero mayor a 10% comienzan a elevarse vertiginosamente, siendo este porcentaje de interés para la realización de mezclas asfálticas modificadas con este agente modificador.

El porcentaje correspondiente al 14% de adición de polvo de acero, no cumple con las especificaciones del límite mínimo del valor permisible que establece la norma, en cuanto a R.B.V. (Relación Betumen Vacíos) se refiere, que debe ser mayor a 75%, el valor obtenido con dicho porcentaje alcanza un valor de R.B.V. de 74,99%.

Con el porcentaje de 14% de adición de polvo de acero se obtuvieron valores de V.A.M (Vacíos de agregado Mineral) que cumplen con los rangos establecidos por norma, que van desde valores mayores a 15%.

El mejor resultado obtenido en cuanto a la propiedad de estabilidad de la mezcla asfáltica alcanzó un máximo de 41,26%, con adición de 14% de polvo de acero a la masa total de la briqueta ensayada, sin embargo este porcentaje produce resultados de R.B.V. que se encuentran fuera de norma.

El peor resultado obtenido en cuanto a la propiedad de fluencia de la mezcla asfáltica alcanzó un máximo de 39,15%, con adición de 14% de polvo de acero a la masa total de la briqueta ensayada.

La densidad de la mezcla asfáltica no sufre variaciones considerables con el aumento de porciones de polvo de acero, esto indica que la granulometría de este agente se adecúa bastante bien a la curva granulométrica del agregado fino utilizado para la elaboración de especímenes en la presente investigación.

Se establece que no es recomendable el uso de residuo de polvo de acero como agente modificador, ya que a pesar de que se obtiene buenos resultados en cuanto a la estabilidad, los resultados de la fluencia son muy malos.

Dados estos resultados no se puede recomendar la utilización de ningún porcentaje de adición en mezcla de residuo de polvo de acero, ya que a pesar de que el resultado de la propiedad de estabilidad es mejor en relación a una mezcla convencional, no justifica su adición ya que encarecería mucho la conformación de esta clase de pavimentos.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda ensayar los mismos porcentajes de adición de polvo de acero con diferentes granulometrías para poder comparar con el presente estudio.

Se recomienda el uso de polvo de acero comercial para un proyecto de investigación posterior.

Se recomienda exponer el polvo de acero y las mezclas asfálticas modificadas con este agente, durante un tiempo prolongado a la intemperie, para analizar si existe variación en sus propiedades a lo largo del tiempo.

Se recomienda realizar un análisis con agregados de mala calidad, como es el caso de la zona del chaco tarijeño, en donde son escasos y podría haber una justificación del uso de este aditivo en mezclas asfálticas.