

CAPÍTULO I
DISEÑO TEÓRICO DE LA
INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO

1.1 Introducción

En la presente investigación se analiza la influencia que tiene el talco industrial en reemplazo de filler en una mezcla asfáltica en caliente en la cual se ira aumentando progresivamente el porcentaje de talco para ver su comportamiento en la mezcla asfáltica y de esta manera establecer si se puede usar como alternativa de un material de construcción.

Esta investigación se fundamenta en estudios previos que vinieron investigando de cómo mejorar la resistencia de una mezcla asfáltica con la adición de un mineral como ser (Evaluación de la influencia del polvo de ladrillo como reemplazo de filler en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas), del cual se obtuvieron buenos resultados.

En el presente trabajo se analiza el uso de talco industrial como filler en una mezcla asfáltica, lo que potencialmente puede influir en la resistencia y durabilidad de las mezclas. Este estudio explora cómo diferentes concentraciones de talco afectan las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, enfocándose en su impacto en la resistencia al desgaste y la estabilidad de los pavimentos.

Dentro del aporte teórico, el trabajo se enfoca en la teoría respecto al diseño de mezclas asfálticas con el método Marshall, donde se tiene especificaciones técnicas que debe cumplir la mezcla asfáltica. La aplicación práctica será una posible alternativa en la construcción de pavimentos flexibles.

El desarrollo de este proyecto es una aplicación directa de la ingeniería civil, pero también integra aportes de otras disciplinas que enriquecen el análisis. La química de materiales es esencial para comprender las propiedades del talco industrial y su interacción con el asfalto, lo que permite optimizar su uso como filler. Asimismo, la mecánica de materiales proporciona un marco teórico sobre el comportamiento de las

mezclas bajo diferentes condiciones de carga y temperatura, crucial para evaluar su resistencia y durabilidad.

La relevancia social es de proporcionar una mezcla asfáltica con mejoras en su resistencia que nos dará una garantía de durabilidad, beneficiará de gran manera en el área de las obras civiles, ya que la adición del talco industrial sería una alternativa para futuras construcciones de carreteras. Además, la investigación promueve el uso de materiales industriales subutilizados, fomentando prácticas más sostenibles en la ingeniería civil.

1.2 Antecedentes

En la ingeniería de pavimentos, los fillers son materiales finos incorporados en mezclas asfálticas con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas y físicas. Estos fillers, como el carbonato de calcio, el yeso y la ceniza volante, desempeñan un papel crucial al llenar los espacios vacíos entre los agregados más grandes, lo que contribuye a una mejor cohesión y estabilidad de la mezcla. La incorporación de fillers puede resultar en una reducción de la porosidad, una mejora en la resistencia al desgaste, y una mayor durabilidad de los pavimentos.

La investigación se basa en un trabajo realizado en Bolivia “Evaluación de la influencia del polvo de ladrillo como reemplazo de filler en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas”, en el cual su objetivo principal es evaluar los cambios que experimentan las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente, utilizando como filler el polvo de ladrillo gambote proveniente de los residuos de las construcciones o demoliciones, de tal manera se pueda verificar la influencia en las propiedades mecánicas de mezcla asfáltica, en dicha investigación se concluyó que al añadir polvo de ladrillo como filler las propiedades de la mezcla asfáltica esta mejora considerablemente.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación académica

Las teorías involucradas en esta investigación son las siguientes:

- Componentes de una mezcla asfáltica: Describe los componentes que debe tener una mezcla asfáltica, la gradación de los agregados, y el porcentaje de cada componente presente en la mezcla
- Características de una mezcla asfáltica: Características y su influencia que puede tener el comportamiento de la mezcla tales como densidad de la mezcla, vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral, contenido de asfalto
- Diseño de mezclas asfálticas (Marshall): Metodología estándar en el diseño de mezclas asfálticas, que consideran la estructura, composición y propiedades de la mezcla para garantizar su desempeño.

1.3.2 Justificación sobre la aplicación técnica - practica

El propósito de esta investigación es aportar conocimiento sobre la adición de un mineral el cual será usado como filler en una mezcla asfáltica como es el talco industrial, como instrumento de uso para todos los profesionales, empresas y distintas instituciones relacionadas a la ingeniería civil que se dedican al diseño y construcción vial de carreteras.

1.3.3 Justificación e importancia social

Se busca realizar una mezcla asfáltica más resistente y duradera a diferencia de una mezcla convencional, el objetivo se logrará al precisar un porcentaje de adición de talco industrial que mejore las propiedades de la mezcla asfáltica.

En la sociedad el principal efecto positivo sería el proporcionar carreteras más seguras, de mayor durabilidad y menor mantenimiento, que beneficiara de gran manera al desarrollo de la economía del país.

1.4 Planteamiento del problema

1.4.1 Situación problemática

El talco industrial está compuesto principalmente por silicato de magnesio hidratado se lo utiliza como filler en las mezclas asfálticas para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

La influencia del talco puede tener varios efectos en las propiedades mecánicas de la mezcla. Algunos de los aspectos en los que el talco industrial puede influir incluyen: mejora de la cohesión, reducción de la deformación permanente, mejora de la trabajabilidad.

El no realizar la prueba, no se podrá estimar el porcentaje óptimo que se requiere para mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica, teniendo la incertidumbre si podrá mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica.

Este análisis servirá como referencia para la utilización del talco industrial como filler de una mezcla asfáltica alterando sus propiedades mecánicas.

1.4.2 Delimitación del espacio

- Área de trabajo: Mezclas asfálticas.
- Base de operaciones: Laboratorio de asfaltos.
- Aplicación: Carreteras

1.4.3 Delimitación temporal

Tabla 1.1: Línea del tiempo del proyecto desarrollado.

Fecha aproximada	Evento	¿Cómo tributa este dato?
Abril de 2023	Inicio de investigación sobre uso del talco industrial en mezclas asfálticas	Marca el momento en el que el tema comienza a ser explorada en profundidad, sentando bases para su análisis.

Junio de 2023	Se da procedente el título de la investigación	Validación oficial del tema, lo que permite avanzar en el desarrollo de la tesis.
Julio de 2023	Se aprueba la asignatura CIV - 501	Perfil aprobado en su diseño teórico y metodológico.
Agosto de 2023	Se presenta cartas a la alcaldía para la donación del cemento asfáltico y áridos	Muestra el interés por contar con materiales necesarios para la investigación, facilitando la fase experimental del estudio.
Septiembre de 2023	Se ingresa a laboratorio de suelos y hormigón	Obtención de datos específicos sobre las propiedades del agregado, para realizar el diseño de una mezcla asfáltica.
Octubre de 2023	Se ingresa a laboratorio de asfaltos	Permite determinar el contenido óptimo y elaborar briquetas variando el porcentaje de talco como filler.
Mayo de 2024	Se ingresa a laboratorio de asfaltos	Se elaboran briquetas con el contenido óptimo de cemento asfáltico, variando el porcentaje de filler convencional.
Junio de 2024	Entrega de borrador al docente guía	Borrador completo para ser revisado y aprobado por el docente.
05 de julio de 2024	Predefensa	Predefensa con tribunales designados por el jefe de departamento.
05 de noviembre de 2024	Defensa Publica	Defensa Publica con tribunales designados por el jefe de departamento.

Fuente: Elaboración propia.

1.4.4 Formulación del problema

¿Cuál es la influencia del filler talco industrial en la resistencia de una mezcla asfáltica en caliente?

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo General

Analizar la influencia del talco industrial como filler en una mezcla asfáltica en caliente, considerando las resistencias del método de diseño Marshall; de esta manera, establecer si se puede usar como alternativa de un material de construcción.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información sobre mezclas asfálticas modificadas con talco industrial como filler
- Realizar la caracterización de los agregados y talco industrial.
- Encontrar el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica convencional.
- Elaborar briquetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico en diferentes porcentajes de talco industrial.
- Determinar la resistencia de la mezcla asfáltica convencional.
- Analizar la resistencia alcanzada por la mezcla asfáltica con talco industrial en diferentes porcentajes.

1.6 Hipótesis

Tipo causal/explicativo:

“La mezcla asfáltica elaborada con talco industrial mejora la resistencia Marshall frente a una mezcla asfáltica convencional”

- Variable independiente: Adición de talco industrial.
- Variable dependiente: Resistencia de la mezcla asfáltica.

1.7 Conceptualización y operacionalización de variables

Adición de talco industrial: Es un mineral que se usara como filler en una mezcla asfáltica para mejorar su resistencia. El filler debe ser agregado gradualmente para no

enfriar al asfalto rápidamente; mezclado en forma continua y permitir la salida de aire ocluido en la masa del asfalto.

Resistencia de la mezcla asfáltica: Estabilidad o resistencia Marshall de una mezcla asfáltica es la carga máxima en Kg que soporta una probeta de 6.35 cm. de altura y 10.16 cm. de diámetro cuando se lo ensaya a una temperatura dada cargándola en sentido diametral a una velocidad de 5.08 cm/minuto.

Tabla 1.2: Operacionalización de variables.

Variable Independiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Adición de talco industrial	Sustancia mineral utilizada como filler	Composición de la mezcla	Porcentaje de talco en la mezcla asfáltica	2% - 10% del peso total de la mezcla asfáltica

Variable dependiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Resistencia de la mezcla asfáltica	Propiedades mecánicas	Estabilidad	Libras	Estabilidad mínima 1800
		Fluencia	0.01 pulgadas	Entre 8 – 16

Fuente: Elaboración propia.

1.8 Alcance y tipo de la investigación

El alcance de la investigación se trata de una variable con manipulación que tiene un diseño experimental grado mínimo de manipulación de la variable, tratándose de una muestra única donde se realizó la medición estímulo medición, considerándose que la investigación llega a un pre-experimento.

CAPÍTULO II
ESTADO DE CONOCIMIENTO

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1 Marco conceptual

Un pavimento de una estructura, asentado sobre una fundación apropiada, tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática. Hay una gran diversidad de tipos de pavimento, dependiendo del tipo de vehículos que transitarán y del volumen de tráfico.

En un camino no pavimentado, las condiciones de funcionamiento son precarias, lo que genera limitaciones en las velocidades y las cargas de los vehículos, también se elevan los costos operacionales (mantenimiento y combustible). La utilización de un camino de tierra depende de las condiciones climáticas y de un drenaje satisfactorio. En un camino con revestimiento primario (cascajo o un suelo pedregoso arenoso), las condiciones climáticas pueden ser menos importantes, pero si un drenaje eficaz.

Un pavimento difícilmente sufre una ruptura catastrófica, a menos que exista un error en el proyecto geotécnico en casos como los de pavimentos asentados en terraplenes sobre suelos expansivos. Esa degradación se da, usualmente, de forma continua a lo largo del tiempo es desde la abertura al tráfico, por medio de mecanismos complejos y que no están íntegramente relacionados, donde gradualmente se van acumulando deformaciones plásticas y siendo formadas a través de las capas (asfálticas o cementadas), provenientes de una combinación entre la acción de las cargas del tráfico y los efectos de la intemperie (variaciones de temperatura y humedad a lo largo del tiempo).

Además, la condición de "ruptura" de un pavimento es, hasta cierto punto, indefinida y subjetiva, existiendo divergencias entre los técnicos y administradores en cuanto al mejor momento para restaurar un pavimento que presenta un cierto nivel de deterioro estructural y/o funcional.

Tipos de pavimentos

- Pavimentos flexibles.
- Pavimentos rígidos.
- Pavimentos semirrígidos.

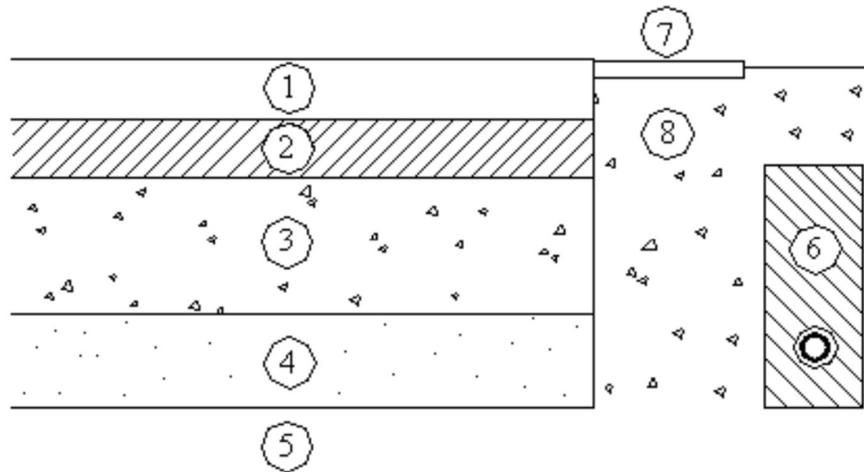
2.1.2 Pavimentos flexibles

Son aquellos que tienen un revestimiento asfáltico sobre una capa base granular. La distribución de tensiones y deformaciones generadas en la estructura por las cargas de rueda del tráfico, se da de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión del suelo de fundación por medio de la absorción de tensiones cizallantes. En este proceso ocurren tensiones de deformación y tracción en la fibra inferior del revestimiento asfáltico, que provocará su fisuración por fatiga por la repetición de las cargas de tráfico. Al mismo tiempo la repetición de las tensiones y deformaciones verticales de compresión que actúan en todas las capas del pavimento producirán la formación de hundimientos en la trilla de rueda, cuando el tráfico tiende a ser canalizado, y la ondulación longitudinal de la superficie cuando la heterogeneidad del pavimento fuera significativa.

2.1.3 Componentes de un pavimento asfáltico

En la Figura 1.1 se muestra esquemáticamente, los componentes principales de un pavimento asfáltico. Se puede considerar que la estructura de un pavimento está formada por una superestructura encima de una fundación, esta última debe ser el resultado de un estudio geotécnico adecuado. En los pavimentos camineros, la superestructura está constituida por la capa de revestimiento y la capa base; la fundación está formada por las capas de sub-base y suelo compactado.

Figura 2.1: Componentes principales de pavimento asfáltico.



Fuente: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Ingeniería de Pavimentos, Brasil, 2000.

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| 1. Capa de Rodadura | 5. Subrasante |
| 2. Capa Base | 6. Sub-drenaje longitudinal |
| 3. Capa Sub-base | 7. Revestimiento de Hombreras |
| 4. Suelo Compactado | 8. Sub-base de Hombreras |

2.1.4 Capa de rodadura

Una mezcla en caliente de pavimento asfáltico consiste en una mezcla uniforme de asfalto y agregado caliente. Casi todo el asfalto utilizado hoy en día proviene de la refinación de crudos de petróleo. El cemento asfáltico (asfalto de pavimentación) está clasificado de acuerdo a sus viscosidad o penetración. Una de las propiedades físicas más importantes de lasfalto en la pavimentación son: durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, y resistencia al envejecimiento y al endurecimiento. Los ensayos típicos de asfalto constan de pruebas que tienen como propósito determinar la viscosidad de cemento asfáltico, su penetración, su punto de inflamación, sus características de envejecimiento y endurecimiento, su ductilidad, su solubilidad y su peso específico.

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. Existen dos métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla. Ellos son el método Marshall y el Método Hveem. En el presente estudio sólo trataremos el método Marshall. Ambos métodos de diseño son ampliamente usados en el diseño de mezclas asfálticas de pavimentación. La selección y uso de cualquiera de estos métodos de diseño de mezclas es, principalmente, asuntos de gustos en ingeniería, debido a que cada método contiene características y ventajas singulares. Cualquier método puede ser usado con resultados satisfactorios.

Las mezclas asfálticas en caliente pueden ser producidas para un amplio rango de combinaciones de agregados, cada uno con sus características particulares adecuadas al diseño específico y a sus usos en la construcción. Paralelamente a la cantidad y tipo de asfalto usado, se determinan las características principales de la mezcla por las cantidades relativas de:

- 1 Agregado grueso, retenido en tamiz de 2,36 mm (N° 8)
- 2 Agregado fino, que pasa el tamiz de 2,36 mm (N° 8)
- 3 Polvo mineral, que pasa el tamiz de 75 μ m (N°200)

2.1.5 Componentes de una mezcla asfáltica

2.1.5.1 Agregados

En la mezcla agregado-asfalto comúnmente usadas en pavimentos asfálticos, el agregado constituye normalmente del 90 al 95 % en peso de la mezcla total y el asfalto del 5 al 10 %. Obviamente, la naturaleza y calidad del agregado son importantes. En la capa superior de un pavimento asfáltico, donde las cargas de las ruedas son concentradas y las tensiones elevadas se requiere agregados de alta calidad para lograr una mezcla fuerte y de buen comportamiento.

2.1.5.2 Asfalto

El asfalto para pavimentación a temperatura atmosférica normal (ambiente) es un material negro, pegajoso, semisólido y altamente viscoso. Está compuesto primordialmente de moléculas complejas de hidrocarburos, pero también contiene otros átomos, como ser oxígeno, nitrógeno y sulfuro. Debido a que el asfalto de pavimentación es pegajoso, se adhiere a las partículas del agregado y puede ser usado para cementarlas o ligarlas dentro del concreto asfáltico. El asfalto para pavimentación es impermeable y no lo afecta la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. Es llamado un material termoplástico porque se ablanda cuando es calentado y se endurece cuando se enfría.

Esta combinación única de características y propiedades es una razón fundamental para que el asfalto sea un material de pavimentación importante.

2.1.6 Características de la mezcla

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

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

2.1.6.1 Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La

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

2.1.6.2 Vacíos de aire (o simplemente vacíos)

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico. La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie. La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente menos del 8 por ciento.

2.1.6.3 Vacíos en el agregado mineral

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

espacios que están llenos de asfalto. El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar el contenido de asfalto.

2.1.6.4 Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios (discutidos más adelante) dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (N.º 200)). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte el contenido de

asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido o relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

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

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregados, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas.

2.1.7 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

2.1.7.1 Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla.

Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en la frecuencia de carga (tráfico). La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta,

o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. **Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.** Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento.

Tabla 2.1: Causas y efecto de la inestabilidad en el pavimento.

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla.	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla.	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas.	Ahuellamiento y canalización.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.7.2 Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de

vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos. Una graduación densa de agregado firme, duro, a la separación, contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada.

La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darla al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

Tabla 2.2: Causas y efecto de un poco durabilidad.

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

Fuente: Elaboración propia.

2.1.7.3 Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido

de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Tabla 2.3: Causas y efecto de la permeabilidad.

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño.	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.7.4 Trabajabilidad

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

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano., partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

Tabla 2.4: Causas y efecto de problemas en la estabilidad.

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

Fuente: Elaboración propia.

2.1.7.5 Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada y bajo contenido de asfalto. Algunas

veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

2.1.7.6 Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Tabla 2.5: Causas y efecto de una mala resistencia a la fatiga.

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga.
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.7.7 Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento

(hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

Tabla 2.6: Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento.

Causas	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento.
Agregado mal graduado o con mala textura.	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo.
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento.

Fuente: Elaboración propia.

El diseño de mezclas asfálticas para pavimentación, como cualquier diseño de materiales, es cuestión de selección y proporciones de materiales para obtener las cualidades y propiedades deseadas una vez finalizada la construcción. El objetivo general es una mezcla y graduación de agregados económicos (dentro de las exigencias de las especificaciones) y un contenido de asfalto adecuado que produzca una mezcla que posea:

1. Asfalto suficiente para asegurar un pavimento durable a través del total recubrimiento de las partículas del agregado e impermeabilización y trabazón de las mismas bajo una adecuada compactación.

2. Estabilidad suficiente de la mezcla para satisfacer los requerimientos de servicio y las demandas del tráfico sin deformación o desplazamiento.
3. Cantidad de vacíos en la mezcla total compactada suficiente para evitar el afloramiento, la exudación y la pérdida de estabilidad.
4. Adecuada trabajabilidad para permitir una operación de construcción eficiente en la colocación de la mezcla para pavimentación.

2.1.8 Uso de aditivos en el asfalto

Los aditivos son compuestos que, junto con los normales, como asfalto, agregado y relleno mineral, componen la mezcla asfáltica para pavimentaciones, A veces se usan cuando se encuentran agregados o condiciones problemáticas. El uso de aditivos, sin embargo, no se debe considerar como un curatodo y no se lo debe emplear como un sustituto de una buena práctica de la construcción.

2.1.8.1 Caucho en asfalto

Se ha usado caucho natural, sintético o recuperado, en forma de polvo, de migas, de grano o látex, para cambiar ciertas propiedades del asfalto. Se ha demostrado que, si se agrega caucho en cantidades tan pequeñas como 0,1 por ciento, aunque generalmente oscila entre 1 y 5 por ciento, las propiedades del asfalto cambian sustancialmente. Se incrementa la viscosidad y disminuye la susceptibilidad térmica y la tendencia a fluir.

2.1.8.2 Siliconas

A los asfaltos se les agregan siliconas bajo ciertas condiciones para reducir o anular los efectos de la humedad u otros propósitos. Por ejemplo, se pueden agregar siliconas al asfalto caliente para evitar que se forme espuma durante el almacenamiento. En las mezclas asfálticas, se usan para evitar el endurecimiento del concreto asfáltico en almacenaje, para impedir el asentamiento y la segregación de la mezcla durante el transporte y la separación de la mezcla durante su colocación.

2.1.8.3 Cal hidratada

La cal hidratada se adiciona a agregados de baja calidad para poder usarlos en mezclas asfálticas para caminos. Generalmente adicionando cerca de 1 por ciento de cal hidratada a estos agregados resultan mezclas para pavimentos asfálticos que pasan las exigencias límites para caminos.

La cal hidratada se adiciona al agregado en la mezcladora. Puede servir como filler en el material granular. Si se adiciona cal hidratada a la mezcla, se puede usar hasta un 1 por ciento de asfalto adicional sobre el contenido normal del mismo sin desintegración o exudación en el pavimento terminado. Esto produce un pavimento más denso, firme, con una superficie más durable.

2.1.8.4 Talco industrial

El talco industrial se utiliza comúnmente como material de relleno en diversas aplicaciones industriales. En este contexto, "filler" se refiere a un material que se agrega a otras sustancias con el propósito de aumentar el volumen, mejorar las propiedades físicas o reducir los costos. El talco, que es un mineral natural compuesto principalmente por silicatos de magnesio, se pulveriza en partículas finas y se incorpora en diferentes productos para cumplir con estos objetivos.

En muchas industrias, el talco industrial se utiliza como filler debido a sus características beneficiosas. Algunas de las aplicaciones comunes incluyen:

Plásticos y polímeros, pinturas y revestimientos, papel y cartón, cerámica, cosméticos

También hay un trabajo experimental, y además de una ponencia que se dio en un congreso internacional de ingeniería:

Como primer punto tenemos a un trabajo experimental previo a la obtención del título de ingeniero civil titulado: “Análisis de la resistencia a compresión del concreto expuesto a fuego, elaborado a base de talco industrial como remplazo parcial del agregado fino” en la Universidad Técnica de Ambato.

El trabajo fue expuesto por: Daniel Eliecer Moreno de la Cruz. Donde citaremos las conclusiones sobre este trabajo:

- La resistencia a compresión residual del concreto expuesto a fuego, elaborado a base de talco industrial como remplazo parcial del agregado fino en 10%- 20%- 30%, muestran incrementos del 20% en relación al hormigón sin remplazo del agregado fino, en las temperaturas de 500°C-700°C-900°C.
- Se observa que la resistencia a compresión en testigos con 10% talco industrial utilizado como remplazo parcial del agregado fino, mejora en un 6%.
- Se observa que la resistencia a compresión en testigos con 20% talco industrial utilizado como remplazo parcial del agregado fino, mejora en un 12.54%.
- Se observa que la resistencia a compresión en testigos con 30% talco industrial utilizado como remplazo parcial del agregado fino, mejora en un 20.78%.
- En las mezclas con sustitución de agregado fino por talco industrial en 10%- 20%-30% y la mezcla sin sustitución, la resistencia a compresión baja con una temperatura de 1100°C.
- Al comparar la facilidad de maleabilidad de las mezclas se ha observado que la plasticidad del hormigón tradicional es menor a la del hormigón con talco industrial como remplazo parcial del agregado fino, lo cual puede ser atribuido a su módulo de finura.
- De las lecturas de asentamientos de los hormigones con adición de talco industrial y hormigón sin adición, se verifica que todas tienen una consistencia blanda.
- Durante el fraguado inicial la perdida de agua por exudación en todas las mezclas con talco fue menor a la del hormigón sin talco industrial, lo cual se podría atribuir a la eliminación de la capilaridad por la presencia de partículas de talco presente en estos espacios.

En un segundo punto se tiene un resumen ponencial titulado “Implementación de talco industrial en la construcción de vías”, de la autora: Sandra Patricia Reyes Ortiz de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Villavicencio donde citaremos el resumen de la misma:

En Colombia, para la mayoría de los proyectos de ingeniería es prioritario el factor financiero, relacionado en algunas ocasiones con la disponibilidad de los materiales necesarios para la ejecución de los proyectos. En la construcción de vías; tema de esta investigación, es necesario contar con una fuente de material de préstamo que cumplan las exigencias requeridas por la norma para la construcción de bases y sub-bases granulares, material que en ocasiones no se encuentra en el lugar de la obra o su adquisición es dificultosa. Se propone en este trabajo la implementación de talco como aditivo para mejorar las propiedades físico-químicas de los materiales granulares que se encuentren fácilmente en el sitio de la obra. Para la construcción de capas granulares que son el soporte estructural de los pavimentos, los materiales tales como agregados pétreos clasificados y no cumplidores de las normas INVIAS que rigen la construcción de vías en Colombia, se propone la posibilidad de mejoramiento de las propiedades de dicho material mediante la adición de talco industrial.

En este trabajo se caracterizara un material granular y una arena que por sí solo no cumplen con las exigencias como base granular, en ese sentido se desarrollaron una serie de ensayos de laboratorio, los cuales evaluaron algunas propiedades físicas y mecánicas, como son entre otras la distribución de tamaños de partículas, el contenido de material arcilloso, la condición natural de los agregados sometidos a la acción de agentes atmosféricos, el desgaste que podría presentar el material en condiciones extremas. A partir de estas características, se adicionó talco industrial, como un componente del material en diferentes porcentajes, tales como:

- Material granular 2%, 4%, 6%, 8%.
- Arenas 3%, 6% y 9%.

Con estas adiciones de talco industrial se realizaron nuevamente ensayos de laboratorio para verificar el comportamiento de los materiales adicionados y la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas. Encontrándose como conclusión que el material inicial

que no cumplía la norma legal para la construcción de vías, tras la adición del talco mejora sus propiedades de tal forma que cumple la ley.

Otros aspectos que se discuten son:

- La facilidad o la dificultad en el proceso constructivo.
- La oferta del talco industrial en el mercado.
- El incremento del costo final en el proceso constructivo

2.1.9 Método Marshall de diseño de mezclas - descripción

A continuación, se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el Diseño Marshall de Mezclas. El procedimiento completo y detallado que se debe ser seguido se encuentra en la norma AASHTO T 245 (o ASTM D1559).

2.1.9.1 Preparación para efectuar los procedimientos Marshall

El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

2.1.9.2 Selección de las muestras de material

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que va a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinar la fórmula o “receta” para la mezcla de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones ocurridas entre los materiales ensayados en el laboratorio y los materiales usados en la realidad.

2.1.9.3 Preparación del agregado

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

2.1.9.4 Secado del Agregado

El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos.

Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a una temperatura de 110° C (230°F).

Después de cierto tiempo, la muestra caliente se pesa y, se registra su valor.

La muestra se calienta completamente una segunda vez, y se vuelve a pesar y a registrar su valor. Este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca constante después de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad se ha evaporado de la muestra.

2.1.9.5 Análisis granulométrico por vía húmeda

El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las

proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.

El análisis granulométrico por vía húmeda consta de los siguientes pasos:

1. Cada muestra de agregado es secada y pesada
2. Luego de cada muestra es lavada a través de un tamiz de 0.075 mm (Nº 200), para remover cualquier polvo mineral que este cubriendo el agregado.
3. Las muestras lavadas son secadas siguiente el procedimiento de calentado y pesado descrito anteriormente.
4. El peso seco de cada muestra es registrado. La cantidad de polvo mineral puede ser determinada si se comparan los pesos registrados de las muestras antes y después del lavado.

2.1.9.6 Determinación del peso específico

El peso específico de una sustancia es la proporción peso - volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso - volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos del peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1). Por ejemplo, una muestra de agregado que pese dos y media veces más que un volumen igual de agua tiene un peso específico de 2.5.

El cálculo del peso específico de la muestra seca del agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones de agregado, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

2.1.9.7 Preparación de las muestras (probetas) de ensayo

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en

experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas esta formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

1. El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
2. Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
3. Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

2.1.10 Procedimiento de ensayo Marshall

Existen tres procedimientos de ensayo en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

2.1.10.1 Determinación del peso específico total

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 166.

2.1.10.2 Ensayo de estabilidad y fluencia

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

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

1. Las probetas son calentadas en el baño de agua a 60° C (140° F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
2. La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste de un dispositivo que aplica a una carga sobre la probeta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
3. La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
4. La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

2.1.10.3 Valor de estabilidad Marshall

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a pensar que, si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

2.1.10.4 Valor de fluencia Marshall

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

2.1.10.5 Análisis de densidad y vacíos

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de Probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

2.1.10.6 Análisis de vacíos

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 209) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua.

2.1.10.7 Análisis de peso unitario

El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 Kg/m^3 (62.4 lb/ft^3).

2.1.10.8 Análisis de V.A.M.

Los vacíos en el agregado mineral, VAM, está definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VAM es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VAM puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.

2.1.10.9 Análisis de R.B.V.

Los vacíos llenos de asfalto, RBV, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (RBV) que se encuentran llenos de asfalto. El VAM abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el RBV se calcula al restar los vacíos de aire de VAM, y luego dividiendo por el VAM, y expresando el valor final como un porcentaje.

2.2 Marco Normativo

En Bolivia todo lo que concierne al mantenimiento, modificaciones, características y conservación de la infraestructura vial esta normalizada por al ASTM

El presente proyecto se realizó bajo las especificaciones establecidas por la normativa ASTM y AASHTO.

2.2.1 Normativa sobre mezclas asfálticas vigente (ABC)

La ABC (Administradora Boliviana de Carreteras) en el año 2008 publica cinco manuales para diseño y construcción de pavimentos en Bolivia, en los cuales indica los ensayos para el control de pavimentos asfálticos, basados en dos normas de aplicación mundial las cuales son las normas ASTM y AASHTO.

2.2.2. Norma ASTM

Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés **American Society for Testing and Materials o ASTM International**.

La ASTM está entre los mayores contribuyentes técnicos del ISO (Organización Internacional de Normalización), y mantiene un sólido liderazgo en la definición de los materiales y métodos de prueba en casi todas las industrias, con un casi monopolio en las industrias petrolera y petroquímica.

Tal es que durante en desarrollo del presente trabajo se enunciaran los ensayos realizados a los agregados pétreos, cemento asfáltico y elaboración de mezcla asfáltica, seguido del código AASHTO, ASTM.

Tabla 2.7: Normas aplicadas para la caracterización del agregado pétreo.

Nº	Ensayo	ASTM	AASHTO
1	Método para tamizar y determinar la granulometría (grueso y fino).	C-136	T-27
2	Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.	C-127	T-85
3	Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos.	C-128	T-84
4	Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los Ángeles.	C 131	T-96
5	Porcentaje de caras fracturadas.	D-5821	
6	Peso específico del filler	T 100	D 854
7	Equivalente de arena.	D-2419	T-176

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.8: Normas aplicadas para la caracterización del cemento asfáltico.

Nº	Ensayo	ASTM	AASHTO
1	Penetración.	D-5	T 49-97
2	Punto de inflamación.	D 1310-01	T 79-96

3	Ductilidad.	D-113	T 51-00
4	Punto de ablandamiento.	D-36	T 53-96
5	Densidad específica.	D-71	T 229-97
6	Viscosidad.	D-244	-

Fuente: Elaboración propia.

La tabla a continuación presenta los valores de diseño para tráfico pesado, definido como la circulación de más de 300 vehículos comerciales, incluyendo camiones y autobuses, en una carretera específica. En este contexto, se establece que los Ejes de Carga Equivalentes (ESAL) deben superar 10^6 (un millón de ejes de carga equivalentes), lo que implica que el pavimento está diseñado para resistir el impacto y el daño asociado con la circulación de un millón de ejes de carga a lo largo de su vida útil.

Tabla 2.9: Criterio de diseño de mezclas Marshall.

Método Marshall	Tráfico pesado	
	Mínimo	Máximo
Criterio de mezcla		
Compactación, Numero de golpes/cara	75	
Estabilidad [N]	8000	-
[lb]	1800	-
Flujo [0.25 mm] [0.01 pulg]	8	16
Porcentaje de vacíos de aire [%]	3	5
Vacíos Agregado Mineral [%]	13	-

Fuente: Manual de carreteras (ABC) volumen VII.

2.3 Marco referencial

En general, materiales denominados rellenos minerales pueden ser definidos como aquellos que presentan partículas finamente divididas, provenientes de la trituración de rocas minerales, molienda de los agregados pequeños a través de procesos

industrializados, dando como resultado el desarrollo de productos sintéticos, que se incorporan a los morteros y a las mezclas asfálticas a fin de mejorar su desempeño reológico, mecánico, térmico y de sensibilidad al agua. Su uso debe obedecer a los límites contenidos en especificaciones propias destinadas a la optimización del desempeño de sus funciones (Santana, 1995).

Los rellenos minerales se incluyen en las mezclas asfálticas, principalmente con la finalidad de generar mayor estabilidad y resistencia después de la compactación. Las teorías más extendidas con respecto a las causas que generan los efectos mencionados, citan la granulometría de las partículas como el factor principal (Al-Suhaibani et al, 1992).

Se atribuye a las pequeñas dimensiones de los granos, inferiores a 75 μm y superiores a 40 μm , la función de llenado de los vacíos formados por los granos mayores dentro del esqueleto mineral. Se le acredita a este factor el aumento de la densidad y la resistencia de la mezcla luego de la compactación (AASHTO, 2000).

A pesar de un amplio aporte de los enfoques científicos sobre sus características, los rellenos todavía provocan polémica y puntos de discusión divergentes entre investigadores en el ámbito mundial, sobre cuáles son las causas que, de hecho, influyen en los efectos físicos y químicos que constituyen el componente activo de estos materiales cuando son utilizados en las mezclas asfálticas, específicamente en la composición de los morteros (Sebaaly et al, 2003; Santana, 1995; Anderson et al, 1992b).

El presente trabajo de investigación está muy influenciado en los siguientes trabajos de investigación y además de una ponencia que se dio en un congreso internacional de ingeniería:

Como primer trabajo “Efecto del tipo de relleno mineral y del tamaño de las partículas en las propiedades de ingeniería de los pavimentos asfálticos de masilla de piedra” cuyo trabajo fue parte de un proyecto de investigación de doctorado en la Universidad Putra Malasia dicho trabajo fue aceptado el 29 de septiembre de 2012.

Como segundo trabajo “Evaluación de la influencia del polvo de ladrillo como reemplazo de filler en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas” previo a la obtención del título de ingeniero civil en Universidad Autónoma Juan Misael Saracho publicado en el año 2019, realizado por Inés Cuevas Soruco.

Como tercer trabajo “Análisis de la resistencia a compresión del concreto expuesto a fuego, elaborado a base de talco industrial como reemplazo parcial del agregado fino” trabajo experimental previo a la obtención del título de ingeniero civil en la Universidad Técnica de Ambato del país de Ecuador en el año 2017, fue expuesto por: Daniel Eliecer Moreno de la Cruz.

Se tiene también un resumen ponencial titulado “Implementación de talco industrial en la construcción de vías”, de la autora: Sandra Patricia Reyes Ortiz de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Villavicencio del país de Colombia.

2.4 Análisis del aporte teórico

El investigador considera teorías y metodologías relacionadas con la elaboración de briquetas y el ensayo Marshall, estas fuentes son fundamentales para entender procedimientos estandarizados utilizados en la evaluación de la resistencia de las mezclas asfálticas, también considera investigaciones previas que abordan el uso de fillers como una alternativa para mejorar propiedades en la mezcla asfáltica en las cuales se obtuvieron resultados positivos los cuales despertó el interés de la presente investigación.

La normativa empleada en esta investigación para la realización de ensayos de agregado pétreo, cemento asfáltico y la elaboración de briquetas de ensayo se fundamenta en las normas AASHTO y ASTM. Estas normativas son reconocidas a nivel nacional e internacional y se utilizan ampliamente en el contexto local. Además, se incluye la normativa de la ABC, que establece criterios específicos para las propiedades que deben cumplir las mezclas asfálticas. Esta combinación de normativas garantiza que los procedimientos y resultados obtenidos en esta investigación sean consistentes y alineados con los estándares de calidad requeridos en la industria.

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Criterios del diseño metodológico

3.1.1 Unidad de muestra

Ensayos de laboratorio.

3.1.2 Población

Todos los ensayos de laboratorio de asfaltos.

3.1.3 Muestra

Ensayos que ayuden a determinar la resistencia de la mezcla asfáltica con la adición de talco industrial como filler.

3.1.4 Tamaño de la muestra

Para población finita (muestra estratificada)

Se realiza de acuerdo a lo seleccionado en la unidad de muestra, asignada de manera directa el nivel de confianza de 95% considerando una población finita, sin embargo, mediante la metodología estratificada se puede asignar números lógicos para hacer el correspondiente ajuste.

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

Se adoptará una varianza de ($\sigma^2 = 0.10$) debido a que el tiempo asignado para la realización del trabajo está entre 4 a 5 meses.

El error correspondiente está en: 0.05%

El nivel de confianza es: NC=95%

Valor del nivel de confianza es: Z=1.96

Reemplazando la planilla de ajuste de numero de ensayos se tiene:

Tabla 3.1: Cálculo de muestra estratificada.

Ensayos	Ni	σ^2	Ni * σ^2	fi	ni	ni
Caracterización del cemento asfáltico						
Penetración	3	0.1	0.3	0.0254	2.5424	3
Ductilidad	3	0.1	0.3	0.0254	2.5424	3
Viscosidad	2	0.1	0.2	0.0169	1.6949	2
Punto de ablandamiento	2	0.1	0.2	0.0169	1.6949	2
Punto de inflamación	3	0.1	0.3	0.0254	2.5424	3
Peso específico	3	0.1	0.3	0.0254	2.5424	3
Caracterización de los agregados						
Granulometría	9	0.1	0.9	0.0763	7.6271	8
Porcentaje de caras fracturadas	2	0.1	0.2	0.0169	1.6949	2
Equivalente de arena	3	0.1	0.3	0.0254	2.5424	3
Desgaste de las Ángeles	2	0.1	0.2	0.0169	1.6949	2
Peso específico	1	0.1	0.1	0.0085	0.8475	1
Peso específico del talco industrial	1	0.1	0.1	0.0085	0.8475	1
Pruebas preliminares (Marshall)						
Contenido óptimo de C.A.	18	0.1	1.8	0.1525	15.2542	16
Filler (talco industrial).	18	0.1	1.8	0.1525	15.2542	16
Filler (convencional).	18	0.1	1.8	0.1525	15.2542	16
Pruebas finales (Marshall)						
Estabilidad	30	0.1	3	0.2542	25.4237	26
Total	118		11.8			107

Fuente: Elaboración propia.

$$n = \frac{11.8}{118 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{11,8}{118}}$$

n= 67 ensayos

El total de ensayos cubierto por la investigación en el periodo entre 4 a 5 meses corresponde a 67 ensayos bien definido en cada categoría.

3.1.5 Control y validación interna

Los elementos que se verificaron para el control en la variable extraña fueron de:

- Extraer el cemento asfáltico y los agregados pétreos personalmente de la planta la pintada
- Se hizo un cálculo aproximado de material a usar en los ensayos de laboratorio, de esta manera el cemento asfáltico y agregados sean lo suficiente para realizar todos los ensayos y lograr usar de una sola fuente el material.

Las principales acciones para neutralizar las variables extrañas son:

- Se realizó los ensayos en un ambiente cerrado para evitar que la temperatura y humedad interfieran en los resultados.
- Se utilizó el mismo equipo y metodología para la elaboración de briquetas.
- Capacitarse en el adecuado manejo de instrumentos y equipos de laboratorio y técnicas de medición.
- Asegurarse de que todos los equipos estén calibrados y en buen estado de funcionamiento.

3.1.6 Caracterización de los materiales

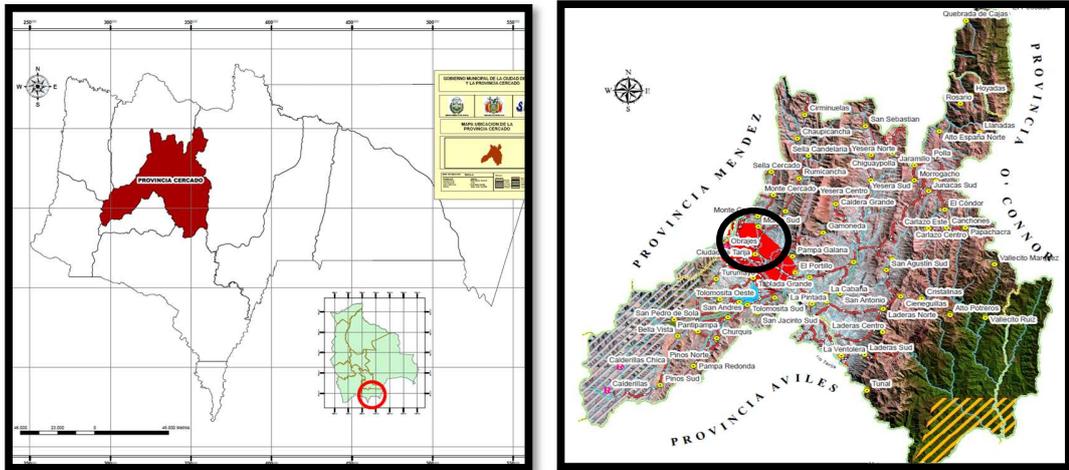
3.1.6.1 Criterios de extracción

Áridos

Para la presente investigación se usará los áridos donados de la alcaldía cuya procedencia es de la Chancadora Garzón que extrae el material de la localidad de San Mateo la cual tiene una gran cantidad de áridos que cumplen con las especificaciones solicitadas para esta investigación.

la comunidad de San Mateo se encuentra a 5 kilómetros de la ciudad de Tarija, esta comunidad se dedica mayormente a la agricultura.

Figura 3.1: Ubicación de la comunidad San Mateo.



Fuente: Dirección general de ordenamiento territorial.

la Chancadora Garzón se encuentra a la orilla del río Sella en las coordenadas:

Zona: 20 K

Este: 318574.64 m E

Norte: 7624711.38 m S

Figura 3.2: Ubicación de la Chancadora Garzon.



Fuente: <https://www.GoogleEarth.jpg>.

Se decidió usar este material ya que según los estudios previos se ha demostrado tener buenas características y condiciones para el diseño de mezclas asfálticas. La técnica de muestreo para seleccionar el agregado grueso y fino fue el de muestreo aleatorio simple.

Filler

El talco industrial se lo obtuvo de FIBRA CENTER MORENO el cual es una distribuidora de este material que procede de la ciudad de La Paz. La distribuidora se encuentra en la ciudad de Santa Cruz Sobre Av. Roca Aguilera (3er anillo interno), entre calle Pico del Monte y Minero.

Coordenadas

Zona: 20 K

Este: 478331.17 m E

Norte: 8032706.74 m S

Figura 3.3: Ubicación de Fibra Center Moreno.



Fuente: <https://www.GoogleEarth.jpg>.

Cemento asfáltico

El cemento asfáltico se lo obtuvo de la alcaldía: Cemento asfáltico 85-100 de la marca Multinsa que es de procedencia colombiana.

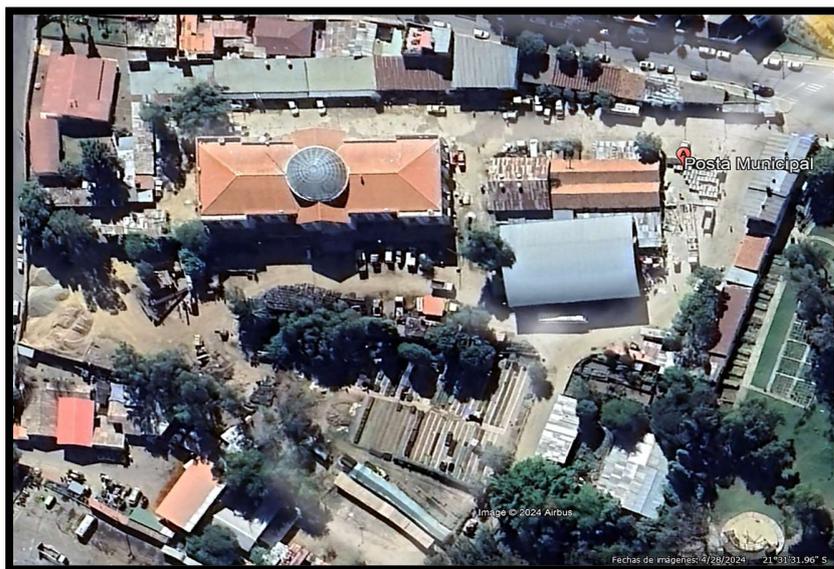
Coordenadas

Zona: 20 K

Este: 319766.22 m E

Norte: 7618546.07 m S

Figura 3.4: Ubicación de la posta municipal.



Fuente: Elaboración propia.

Las técnicas de muestreo que se realizó en este trabajo de investigación se dan de carácter no probabilístico, ya que el cemento seleccionado es intencionalmente de la alcaldía. Tanto los agregados como el cemento asfáltico fueron llevados al laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, para su conservación y guardarlo para cuando se realicen los ensayos de caracterización.

3.2 Características de los materiales de investigación

3.2.1 Ficha técnica del talco industrial

Figura 3.5: Ficha técnica del talco industrial.



VERSIÓN: 01

FECHA: 06/04/2015

FICHA TÉCNICA TALCO INDUSTRIAL

1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Nombre químico: Talco industrial.

Fórmula Química o Componentes: $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

CAS: 14807-96-6

UN: N.A.

Calidad: Técnica

Descripción: Mineral compuesto principalmente de silicato de magnesio hidratado, de suave textura, jabonoso. Mineral no metálico, químicamente inerte, es el mineral más blando de la naturaleza, ocupa el primer lugar en la escala de Mohs. Polvo blanco químicamente inerte, presenta partículas en forma laminar.

Vencimiento: 10 años.

2. APLICACIONES GENERALES

Utilizado en pinturas como carga por su absorción. Industria cerámica, pigmentos, papel, vidrio, construcción, agricultura.

3. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Sustancias incompatibles: No hay datos disponibles.

Información adicional: Evitar calor en exceso, humedad, formación de polvo.

SiO_2 % 48,00 – 57,00

Al_2O_3 % 3,97 Máx.

Fe_2O_3 % 6,52 Máx.

TiO_2 % 1,20 Máx.

CaO % 2,27 Máx.

MgO % 26,44 Máx.

Na_2O % 1,00 Máx.

K_2O % 0,40 Máx.

4. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y PRECAUCIONES

Condiciones de almacenamiento: Mantener en un lugar fresco, seco, bien ventilado. Los recipientes deben permanecer bien cerrados.

Precauciones: El producto no está clasificado como peligroso para la salud.

Nota: El uso final del producto está fuera del control de nuestra empresa y por lo tanto es responsabilidad directa del usuario su uso, aplicación y los resultados derivados de su uso. La información consignada en este documento es sólo de carácter ilustrativo y fue recopilada de distintas fuentes bibliográficas por nuestro departamento técnico. Los datos suministrados no representan responsabilidad legal alguna y no eximen al usuario de hacer sus propios análisis e investigaciones antes de su uso y aplicación.

Fuente: Fibra Center Moreno.

3.2.2 Ficha técnica del cemento asfáltico Multinsa 85-100

Figura 3.6: Ficha técnica del cemento asfáltico Multinsa 85-100.



MULTINSA
 Carrera 19 A No. 73-65 La Libertad
 Tel: 6916081 - +57 318 7167942
 Barrancabermeja, Santander. Colombian Industry
 laboratorio@multinsa.com - www.multinsa.com

CERTIFICADO DE CALIDAD

Del producto con las siguientes propiedades:

ASFALTO 85-100

N° 7509 - 1

Facturas # 70618-70619 Fecha de lote: 27-10-2022
 Fecha de despacho: 07-11-2022 Lote No.: 035028
 Cliente: SEMAED CONSTRUCCIONES E Despacho: 50 tn.
 INSTALACIONES SRL Placa: N/A

Propiedad	Normativa		Especificación		Resultado
	AASHTO	ASTM	MÍN	MÁX	
Gravedad Específica a 25°C	T-229	D-70	1.00	1.05	1.015
Penetración Muestra Original a 25°C, mm/10	T-49	D-5	85	100	89
Punto de Ablandamiento, Anillo-Bola, °C	T-53	D-36	43	53	47
Punto de inflamación, vaso abierto Cleveland, °C	T-48	D-92	232	-	275
Solubilidad en Tricloroetileno, %	T-44	D-2042	99	-	99.98
Ductilidad a 25°C, cm	T-51	D-113	100	-	> 140
Viscosidad Absoluta a 60°C, P	T-316	D-4402	800	-	1210
Viscosidad Saybolt Furor a 135°C, seg.	T-72	D-88	85	-	121
Ensayo de la Mancha Heptano-Xilol (20% máximo de Xilol)	T-102	-	negativo	-	negativo
ENSAYO EN HORNO PELÍCULA DELGADA (AASHTO T-179/ ASTM D-1754)					
Cambio de masa, Pérdida por calentamiento, %	T-240	D-1754	-	< 1,0	-0,34
Penetración del residuo, porcentaje de la penetración original, %	T-49	D-5	50	-	51
Ductilidad del residuo a 25°C, cm	T-51	D-113	100	-	>140
Contenido de agua, %	T-55	D-95	-	< 0.2	0.0

Tec. Químico DIVA CRISTINA TORRES
 C.C. 30.389.779 TQ-1066
 FIRMA DE LABORATORIO



Fuente: Alcaldía Municipal de Tarija.

3.3 Caracterización de los materiales

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

Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

El propósito de este proceso es identificar los tamaños de partículas de los agregados gruesos y finos en una muestra de material seco, utilizando una serie de tamices dispuestos en orden decreciente de abertura.

Se realizará los ensayos para los siguientes agregados pétreos:

- Grava 3/4"
- Gravilla 3/8"
- Arena triturada

Tabla 3.2: Datos de los ensayos realizados de la grava 3/4".

Tamices	Grava 3/4"		
	Ensayo 1 [g]	Ensayo 2 [g]	Ensayo 3 [g]
1"	0.00	0.00	0.00
3/4"	763.90	911.90	867.95
1/2"	3336.80	3372.90	3354.84
3/8"	2016.30	1836.40	1896.38
N°4	1719.36	1728.51	1734.77
N°8	0.00	0.00	0.00
N°16	0.00	0.00	0.00
N°30	0.00	0.00	0.00
N°50	0.00	0.00	0.00
N°100	0.00	0.00	0.00
N°200	0.00	0.00	0.00
Peso total [g]	7836.36	7849.71	7853.94

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3: Datos de los ensayos realizados de la gravilla 3/8".

Tamices	Gravilla 3/8"		
	Ensayo 1 [g]	Ensayo 2 [g]	Ensayo 3 [g]
1"	0.00	0.00	0.00
3/4"	0.00	0.00	0.00
1/2"	0.00	0.00	0.00
3/8"	42.40	30.40	38.40
N°4	6452.40	6483.40	6464.90
N°8	1108.51	1083.70	1096.90
N°16	0.00	0.00	0.00
N°30	0.00	0.00	0.00
N°50	0.00	0.00	0.00
N°100	0.00	0.00	0.00
N°200	0.00	0.00	0.00
Peso total [g]	7603.31	7597.50	7600.20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4: Datos de los ensayos realizados de la arena.

Tamices	Arena		
	Ensayo 1 [g]	Ensayo 2 [g]	Ensayo 3 [g]
1"	0.00	0.00	0.00
3/4"	0.00	0.00	0.00
1/2"	0.00	0.00	0.00
3/8"	0.00	0.00	0.00
N°4	0.00	0.00	0.00
N°8	91.70	92.50	88.60
N°16	90.90	90.10	88.10
N°30	188.10	189.60	190.60
N°50	327.70	321.10	336.50
N°100	182.00	184.80	179.30
N°200	78.10	8010	76.50
Peso total [g]	997.30	998.50	996.10

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de porcentaje que pasan los tamices

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

$$\% \text{ Que Pasa} = 100 - \left(\frac{88,60}{996,10} * 100 \right) = 91,11 \%$$

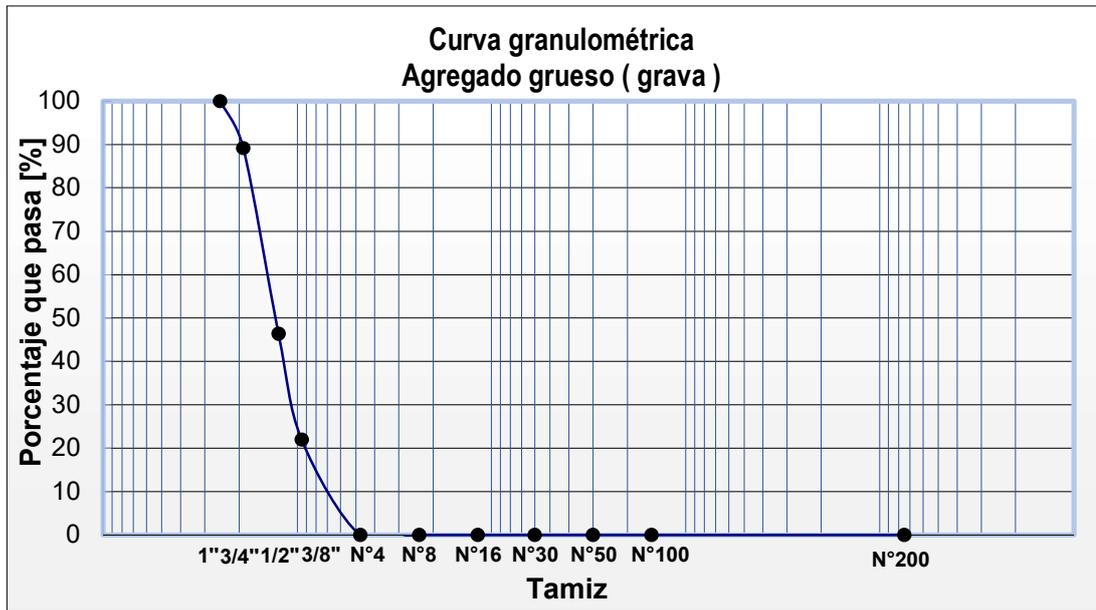
Planilla de resultados de las granulometrías promedio.

Tabla 3.5: Granulometría – agregado grueso (grava 3/4").

Tamices	Tamaño [mm]	Peso retenido [g]	Retenido acumulado		% que pasa de total
			[g]	[%]	
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	847.92	847.92	10.81	89.19
1/2"	12.50	3354.85	4202.76	53.56	46.44
3/8"	9.50	1916.36	6119.12	77.98	22.02
N°4	4.75	1727.55	7846.67	100.00	0.00
N°8	2.36	0.00	7846.67	100.00	0.00
N°16	1.18	0.00	7846.67	100.00	0.00
N°30	0.60	0.00	7846.67	100.00	0.00
N°50	0.30	0.00	7846.67	100.00	0.00
N°100	0.15	0.00	7846.67	100.00	0.00
N°200	0.01	0.00	7846.67	100.00	0.00
BASE		0.00	7846.67	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.1: Curva granulométrica – grava.



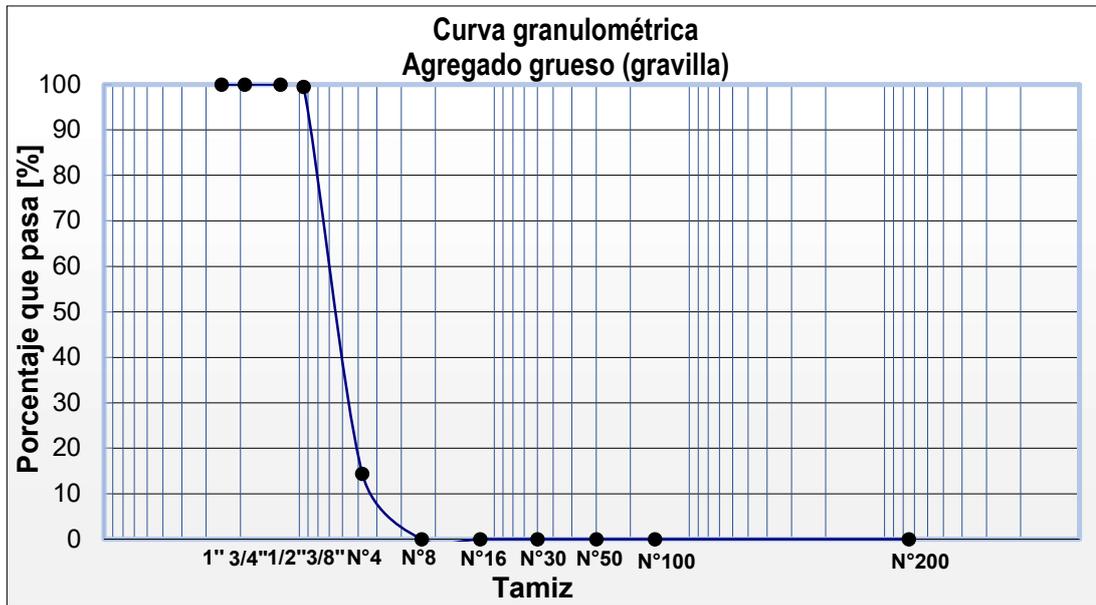
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6 Granulometría – agregado grueso (gravilla 3/8").

Tamices	Tamaño [mm]	Peso retenido [g]	Retenido acumulado		% que pasa de total
			[g]	[%]	
1''	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4''	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2''	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8''	9.50	37.07	37.07	0.49	99.51
N°4	4.75	6466.90	6503.97	85.57	14.43
N°8	2.36	1096.37	7600.34	100.00	0.00
N°16	1.18	0.00	7600.34	100.00	0.00
N°30	0.60	0.00	7600.34	100.00	0.00
N°50	0.30	0.00	7600.34	100.00	0.00
N°100	0.15	0.00	7600.34	100.00	0.00
N°200	0.01	0.00	7600.34	100.00	0.00
BASE		0.00	7600.34	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.2: Curva granulométrica – gravilla.



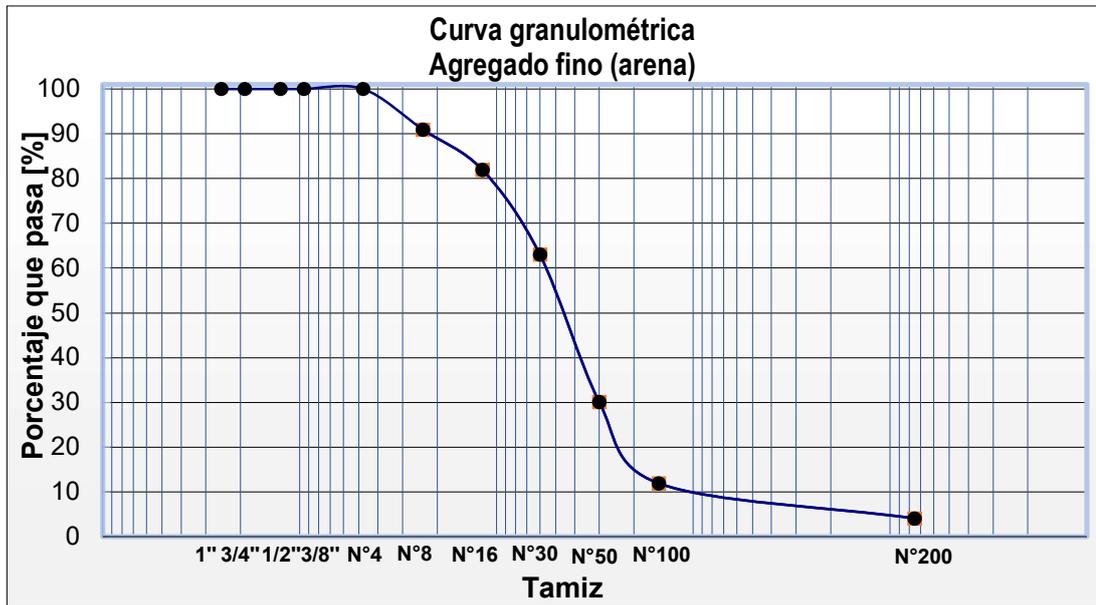
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7: Granulometría – agregado fino (arena).

Tamices	Tamaño [mm]	Peso retenido [g]	Retenido acumulado		% Que pasa de total
			[g]	[%]	
1''	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4''	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2''	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8''	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
N°8	2.36	90.93	90.93	9.09	90.91
N°16	1.18	89.70	180.63	18.06	81.94
N°30	0.60	189.43	370.07	37.01	62.99
N°50	0.30	328.43	698.50	69.85	30.15
N°100	0.15	182.03	880.53	88.05	11.95
N°200	0.01	78.23	958.77	95.88	4.12
BASE		38.53	997.30	99.73	0.27

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.3: Curva granulométrica – arena.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (ASTM C 127 AASHTO T85).

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos grueso (grava, gravilla).

Tabla 3.8: Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso grava 3/4".

Muestra N°	Peso muestra secada [g]	Peso muestra saturada con sup. seca [g]	Peso muestra Saturada dentro del agua [g]
1	4928.30	5000.00	3085.00
2	4929.70	5000.00	3087.00
3	4929.30	5000.00	3084.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9: Resultados del ensayo de peso específico para grava 3/4".

Muestra N°	Peso específico a granel [g/cm ³]	Peso específico S.S.S [g/cm ³]	Peso específico aparente [cm ³]	% de absorción
1	2.57	2.61	2.67	1.45
2	2.58	2.61	2.68	1.43
3	2.57	2.61	2.67	1.43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.10: Datos del ensayo de peso específico de agregado grueso gravilla 3/8"

Muestra N.º	Peso muestra secada [g]	Peso muestra saturada con sup. seca [g]	Peso muestra Saturada dentro del agua [g]
1	4901.20	5000.00	3090.00
2	4900.80	5000.00	3089.00
3	4897.20	5000.00	3088.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.11: Resultados del ensayo peso específico de agregado grueso gravilla 3/8".

Muestra N°	Peso específico a granel [g/ cm ³]	Peso específico S.S.S [g/ cm ³]	Peso específico aparente [g/ cm ³]	% de absorción α [%]
1	2.57	2.62	2.71	2.02
2	2.56	2.62	2.70	2.02
3	2.56	2.62	2.71	2.10

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados finos (ASTM C 128 AASHTO T84).

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

Tabla 3.12: Datos obtenidos del ensayo peso específico para agregado fino.

Muestra N.º	Peso muestra superf. seca [g]	Peso matraz + agua [g]	Peso matraz + agua + muestra [g]	Peso muestra seca [g]
1	500.00	729.20	1035.70	493.90
2	500.00	689.40	993.00	493.80
3	500.00	686.90	991.40	494.20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.13: Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino.

Muestra N.º	P.E. granel [g/ cm ³]	P.E. SSS [g/ cm ³]	P.E. aparente [g/ cm ³]	% de absorción α [%]
1	2.55	2.58	2.64	1.24
2	2.51	2.55	2.60	1.26
3	2.53	2.56	2.61	1.17

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Ensayo para determinar el desgaste mediante la máquina de los Ángeles (ASTM C 131 AASHTO T96).

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,5 mm, mediante la máquina de los ángeles.

Tabla 3.14: Tabla ASTM C-131 según el tamaño de material que se tenga.

Método		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear [g]			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		

3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Número de esferas		12	11	8	6
N°de revoluciones		500	500	500	500
tiempo de rotación		30	15	15	15

Fuente: Elaboración propia.

En este caso la granulometría del material a ensayar (grava) se adecua a la gradación o método B para el cual usare 2500 gramos de material retenido en el tamiz 1/2" y 2500 gramos de material retenido en el tamiz 3/8". En este caso para la gradación B se usan 11 esferas las cuales giraran por 15 minutos en la máquina de los ángeles aproximadamente entre 31-33 rpm.

Proceso de cálculo para la grava 3/4":

Tabla 3.15: Datos del ensayo de desgaste para la grava 3/4".

Datos de laboratorio		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido [g]
3/4"	1/2"	2500
1/2"	3/8"	2500
Muestra total (m inicial)		5000
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7mm)		3851.30
Pasa tamiz N°12 y retenido en base		1148.70
Numero de ensayos		1
Tipo de gradación		B
Carga abrasiva		11 esferas a 32,5 rpm
Tiempo de rotación		15 minutos
N° de revoluciones		500

Fuente: Elaboración propia.

Pérdida de masa de la muestra

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{(5000 - 3851,30)}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 22,97 \%$$

Proceso de cálculo para la gravilla 3/8”:

Tabla 3.16: Datos del ensayo de desgaste para la gravilla 3/8”.

Datos de laboratorio		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido [g]
3/8”	1/4”	2500
1/4”	N°4	2500
Muestra total (m inicial)		5000
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7mm) (m final)		3778.90
Pasa tamiz N°12 y retenido en base		1221.10
Numero de ensayos		1
Tipo de gradación		C
Carga abrasiva		8 esferas a 32,5 rpm
Tiempo de rotación		15 minutos
N° de revoluciones		500

Fuente: Elaboración propia.

Pérdida de masa de la muestra

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{(5000 - 3778,90)}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 24,42 \%$$

3.3.5 Ensayo de porcentaje de caras fracturadas (ASTM D-5821).

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso, del material que presenta una o más caras fracturadas de las muestras de agregado grueso, grava y gravilla.

Tabla 3.17: Datos del ensayo de caras fracturadas.

Descripción		Peso [g]
Grava 3/4"	Peso total de muestra.	1500
	Peso de caras fracturadas retenidas.	1345
Gravilla 3/8"	Peso total de muestra.	1000
	Peso de caras fracturadas retenidas.	899

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.18: Resultados del ensayo de caras fracturadas.

Descripción		Peso [g]
Grava 3/4"	Porcentaje de caras fracturadas.	89.67
	Peso de caras no fracturadas.	155
Gravilla 3/8"	Porcentaje de caras fracturadas.	89.90
	Peso de caras no fracturadas.	899

Fuente: Elaboración propia.

3.3.6 Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D-854 AASHTO T-100).

Este método establece el procedimiento para determinar, mediante un picnómetro, la densidad de partículas sólidas de suelos compuestos por partículas menores que 5 mm.

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

Proceso de cálculo:

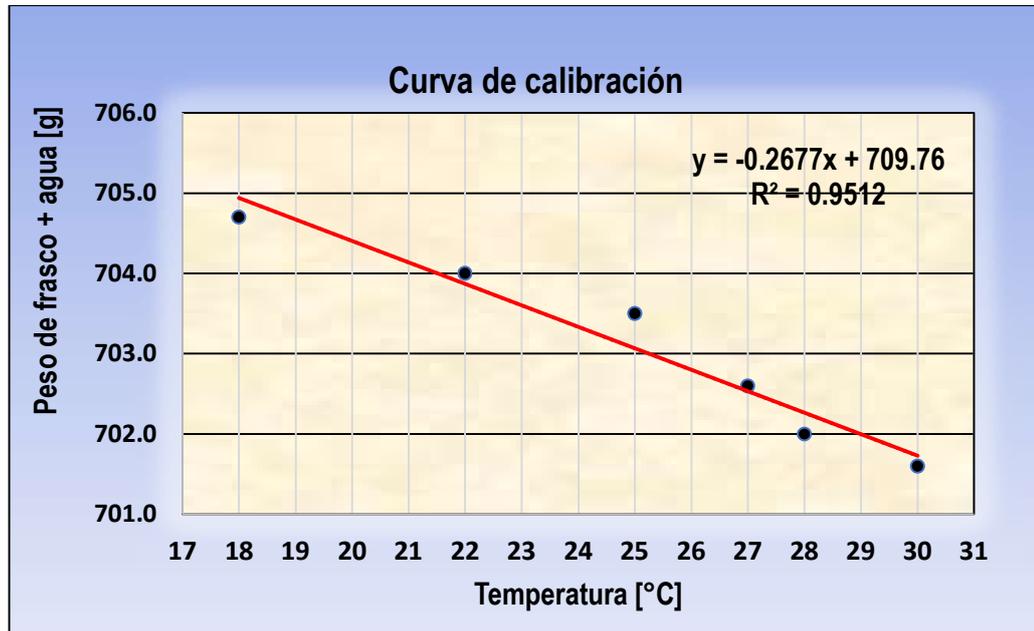
Calibración del frasco volumétrico:

Tabla 3.19: Datos de la calibración de frasco volumétrico.

N° de ensayo	Wfw [g]	T [°C]
1	701.60	30
2	702.00	28
3	702.60	27
4	703.50	25
5	704.00	22
6	704.70	18

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.4: Curva de calibración del frasco volumétrico.



Fuente: Elaboración propia.

Para filler convencional:

Tabla 3.20: Datos y resultados del ensayo de peso específico de filler convencional.

Datos del ensayo	Unidad	Ensayo				
		1	2	3	4	5
Temperatura de ensayo °C	°C	29	27	25	23	20
Peso del suelo seco W _s	g	80	80	80	80	80
Peso del frasco + agua W _{fw}	g	702.00	702.53	703.07	703.60	704.41
Peso del frasco + agua + suelo W _{fws}	g	753.40	753.70	754.10	754.50	754.80
Peso específico	g/cm ³	2.798	2.775	2.762	2.749	2.702
Factor de corrección K		0.998	0.998	0.999	0.999	1.000
Peso específico corregido	g/cm ³	2.791	2.770	2.759	2.747	2.702
Promedio	g/cm ³	2.754				

Fuente: Elaboración propia.

Para filler talco industrial:

Tabla 3.21: Datos y resultados del ensayo de peso específico de filler talco industrial.

Datos del ensayo	Unidad	Ensayo				
		1	2	3	4	5
Temperatura de ensayo °C	°C	28	25	23	21	18
Peso del suelo seco W _s	g	80	80	80	80	80
Peso del frasco + agua W _{fw}	g	702.26	703.07	703.60	704.14	704.94
Peso del frasco + agua + suelo W _{fws}	g	754.10	754.30	754.50	754.60	754.70
Peso específico	g/cm ³	2.840	2.781	2.749	2.708	2.645
Factor de corrección K		0.998	0.999	0.999	1.000	1.000
Peso específico corregido	g/cm ³	2.835	2.778	2.747	2.708	2.646
Promedio	g/cm ³	2.743				

Fuente: Elaboración propia.

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

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz N°4 (4,75 mm).

Este ensayo indica la proporción relativa de polvo fino o materiales arcillosos perjudiciales contenidos en los áridos empleados en las mezclas asfálticas para pavimentación.

Tabla 3.22: Datos del ensayo equivalente de arena.

Descripción	Unidad	Ensayo		
		1	2	3
Lectura nivel inferior.	cm	9.6	9.5	9.5
Lectura nivel superior.	cm	10.2	10.3	10

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

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

$$\text{Porcentaje de arena} = \frac{9,6}{10,2} * 100\%$$

$$\text{Porcentaje de arena} = 94,12 \%$$

Tabla 3.23: Resultados del ensayo equivalente de arena.

Descripción	Unidad	Ensayo		
		1	2	3
Porcentaje de arena.	%	94.12	92.23	95.00
Promedio.	%	93.78		

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8 Método de ensayo de penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97).

El ensayo de Penetración permite determinar la dureza o consistencia relativa de los cementos asfálticos, midiendo la distancia en décimas de milímetros que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto, en unas condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo.

El ensayo ha sido normalizado por la Asociación Americana de Ensayos y Materiales (ASTM), bajo el código D5, y consiste en colocar una muestra del ligante en un recipiente de volumen normalizado hasta lograr la temperatura de referencia (25 C -77 F), apoyar sobre la muestra la aguja y dejarla penetrar durante un tiempo determinado.

Tabla 3.24: Datos del ensayo de penetración del cemento asfáltico 85-100.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	
Penetración a 25 °C, 100 gr. 5 segundos [0,1 mm]	Lectura N°1	mm	95	90	88
	Lectura N°2	mm	96	91	86
	Lectura N°3	mm	93	89	85

Fuente: Elaboración propia.

Especificación técnica: Penetración a 25°C, mm/10 entre 85 – 100

Se tiene como resultado una penetración promedio de 90.33 mm a 25°C, mm/10, se encuentra en el rango establecido según ficha técnica.

3.3.9 Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO T79-96).

El objetivo define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para productos del petróleo y otros líquidos, excepto aceites combustibles y materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de 79 °C determinado por medio de este método de ensaye.

Tabla 3.25: Datos del ensayo punto de inflamación.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de inflamación	°C	262	258	263
Promedio	°C	261		

Fuente: Elaboración propia.

Especificación técnica: Punto de inflamación, vaso abierto de Cleveland mínimo 232°C

De los tres ensayos realizados se obtiene el promedio el cual será el valor más representativo del ensayo el cual es 261°C el cual se encuentra en el rango según ficha técnica.

3.3.10 Método de ensayo para determinar la viscosidad Saybolt-Furol (ASTM E 102 AASHTO T 72).

La viscosidad se define como la resistencia al flujo de un líquido. Se utiliza este ensayo como una medida de consistencia y los resultados son reportados en segundos Saybolt-Furol. La viscosidad “Furol” está considerada como un décimo de la viscosidad “universal”, cuanto más alta es la viscosidad de un líquido, este se aproxima en sus propiedades de consistencia, a un semisólido y la designación “Furol” resulta de una contracción del fuel oíl (aceite de combustión) y road oíl (Cutbacks de productos que requieren temperaturas superiores a 100°C (212°F)).

El objetivo de este ensayo es determinar empíricamente la resistencia al escurrimiento de asfaltos líquidos y otros productos derivados del petróleo, mediante un aparato que recibe el nombre de viscosímetro Saybolt.

Tabla 3.26: Datos del ensayo viscosidad Saybolt-furol.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Viscosidad del cemento asfáltico a 135 °C	segundos	128.75	139.09
Promedio	segundos	133.92	

Fuente: Elaboración propia.

Especificación técnica: Viscosidad Saybolt Furol a 135°C, mínimo 85 segundos.

El promedio de los ensayos realizados da un valor de 133.92 segundos, el cual está dentro del rango de la ficha técnica.

3.3.11 Método para determinar la densidad (ASTM D71 AASHTO T229-97).

Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos, mediante el uso de un vaso de precipitado a la temperatura requerida.

Tabla 3.27: Datos del ensayo peso específico.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso del matraz (A)	g	35.9	34.4	34
Peso del matraz + agua destilada (25°C) (B)	g	91.0	89.5	85.8
Peso del matraz + muestra (C)	g	69.8	70	68.8
Peso del matraz + agua+ muestra (D)	g	91.1	90.8	85.9

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

Peso específico del cemento asfáltico:

$$\rho_w = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} * \rho_b$$

Donde:

ρ_w = Densidad del asfalto a la temperatura de ensaye [g/cm³].

ρ_b = Densidad del agua a la temperatura de ensaye [g/cm³].

$$\rho_b = 0,997 \text{ [g/cm}^3\text{] a } 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho_w = \frac{69,8 - 35,9}{(91 - 35,9) - (91,1 - 69,8)} * 0,997$$

$$\rho_w = 1,000 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

Tabla 3.28: Resultados del ensayo peso específico.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso específico del cemento asfáltico a 25 °C	g/cm ³	1.000	1.035	1.000
Promedio	g/cm ³	1.012		

Fuente: Elaboración propia.

Especificación técnica: Peso específico a 25 °C, entre 1.00-1.05 g/cm³.

De los tres ensayos se obtiene el promedio de peso específico de 1.012 g/cm³, el cual se encuentra dentro del rango según fecha técnica.

3.3.12 Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96).

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentre en el rango de 30 a 200 °C por medio del aparato de anillo y bola.

Tabla 3.29: Datos del ensayo punto de ablandamiento.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Punto de Ablandamiento, Anillo-Bola	°C	47	46.5
Promedio	°C	46.75	

Fuente: Elaboración propia.

Especificación técnica: Punto de Ablandamiento, Anillo-Bola, entre 43 – 53 °C.

El promedio del ensayo de Punto de ablandamiento fue de 46.75 °C el cual se encuentra dentro del rango establecido según fecha técnica.

3.3.13 Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00).

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud medida en cm a la cual se alarga antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra se traccionan a la velocidad de 5 cm/min \pm 5 % y temperatura 25 \pm 0,5 °C.

Tabla 3.30: Datos del ensayo de ductilidad.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Lectura Inicial	cm	0	0	0
Lectura Final	cm	103	109.5	87
Promedio de ductilidad a 25 °C	cm	106.25		

Fuente: Elaboración propia.

Especificación técnica: Ductilidad a 25 °C mínimo 100 cm.

El promedio del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico es de 106.25 cm el cual se encuentra por encima del valor mínimo según ficha técnica.

3.4 Diseño de mezclas asfálticas

3.4.1 Resultados del levantamiento de información

3.4.1.1 Agregados Pétreos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados en laboratorio mismos que son comparados con las especificaciones propuestas por la norma ASTM.

Tabla 3.31: Resultados de la caracterización de los agregados pétreos.

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultado	Norma ASTM
		Mínimo	Máximo		
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos.	Grava 3/4"	-	-	2.67 g/cm ³	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	2.71 g/cm ³	

Peso específico y absorción de agua en agregados finos.	Arena	-	-	2.61 g/cm ³	C-128
Peso específico del filler.	Convencional	-	-	2.75 g/cm ³	D-854
	Talco industrial	-	-	2.74 g/cm ³	
Porcentaje de caras fracturadas.	Grava 3/4"	75%	-	89.67%	D-5821
	Gravilla 3/8"	75%	-	89.90%	
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles.	Grava 3/4"	-	40%	22.97%	C-131
	Gravilla 3/8"	-	40%	24.42%	
Equivalente de arena	Arena	45%	-		D-2419

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2 Cemento asfáltico

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados en laboratorio mismos que son comparados con las especificaciones propuestas por la norma ASTM.

Tabla 3.32: Resultados de la caracterización del cemento asfáltico.

Ensayo	Especificación		Resultado	Norma ASTM
	Mínimo	Máximo		
Penetración	85	100	90.33 mm	D-5
Punto de inflamación	232	-	239 °C	D-92
Ductilidad	100	-	106.25 cm	D-113
Punto de ablandamiento	43	53	47.75 °C	D-36
Densidad específica	1.00	1.05	1.012 g/cm ³	D-70
Viscosidad	85	-	133.92 seg.	D-88

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Combinación de agregados

Tabla 3.33: Promedio de granulometría de agregados pétreos.

Tamices N°	Tamaño [mm]	Grava Peso retenido a 2000 [g]	Gravilla Peso retenido a 2000 [g]	Arena Peso retenido a 2000 [g]	Filler Peso retenido a 2000 [g]
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.0	216.12	0.00	0.00	0.00
1/2"	12.5	855.10	0.00	0.00	0.00
3/8"	9.50	488.45	9.45	0.00	0.00
N°4	4.75	440.33	1658.31	0.00	0.00
N°8	2.36	0.00	332.24	181.88	0.00
N°16	1.18	0.00	0.00	179.40	0.00
N°30	0.60	0.00	0.00	378.86	0.00
N°50	0.30	0.00	0.00	661.88	0.00
N°100	0.15	0.00	0.00	364.06	0.00
N°200	0.075	0.00	0.00	156.46	255.00
BASE	-	0.00	0.00	77.46	1745.00
Peso total		2000.00	2000.00	2000.00	2000.00

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Dosificación para tres agregados: método analítico

La fórmula general básica para la combinación de agregados, sin importar el número de agregados o el método utilizado para establecer las proporciones, es la siguiente:

$$P = G * a + F * b + M * c \dots etc$$

Donde:

G= Agregado grueso que pasa el tamiz designado, en %.

F= Agregado fino que pasa el tamiz designado, en %.

M= Agregado filler que pasa el tamiz designado, en %.

a= Cantidad de Material G requerido en la mezcla, en %.

b= Cantidad de material F requerido en la mezcla, en %.

c= Cantidad de material M requerido en la mezcla, en %.

P= Valor deseado que pase el tamiz designado, (media de la especificación), en %.

Proceso de cálculo:

Lo primero que se debe hacer es una combinación de agregados grueso (grava, gravilla) para obtener el % que pasa del total y del agregado fino (arena). La combinación que se hace es sumar 2000 gr de grava y 2000 gramos de gravilla según tamices retenidos.

Tabla 3.34: Combinación granulométrica del agregado grueso.

Peso total [g]			4000	A.S.T.M.	
Tamices N°	Tamaño [mm]	Peso retenido	Retenido acumulado		% Que pasa de total
		[g]	[g]	[%]	
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100
3/4"	19.00	216.12	216.12	5.40	94.60
1/2"	12.50	855.10	1071.22	26.78	73.22
3/8"	9.50	498.21	1569.43	39.24	60.76
N°4	4.75	2142.07	3711.49	92.79	7.21
N°8	2.36	288.51	4000.00	100.00	0.00
N°16	1.18	0.00	4000.00	100.00	0.00
N°30	0.60	0.00	4000.00	100.00	0.00
N°50	0.30	0.00	4000.00	100.00	0.00
N°100	0.15	0.00	4000.00	100.00	0.00
N°200	0.01	0.00	4000.00	100.00	0.00
BASE		0.00	4000.00	100.00	0.00
SUMA=		4000.00			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.35: Granulometría del agregado fino (arena).

Peso total [g]			2000	A.S.T.M.	
Tamices N°	Tamaño [mm]	Peso retenido [g]	Retenido acumulado		% Que pasa de total
			[g]	[%]	
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
N°8	2.36	181.88	90.93	9.09	90.91
N°16	1.18	179.4	180.63	18.06	81.94
N°30	0.60	378.86	370.07	37.01	62.99
N°50	0.30	661.88	698.50	69.85	30.15
N°100	0.15	364.06	880.53	88.05	11.95
N°200	0.01	156.46	958.77	95.88	4.12
BASE		77.46	997.30	99.73	0.27
SUMA=		2000.00			

Fuente: Elaboración propia.

Para este método se debe llevar los % que pasa tanto del material grueso, fino y filler en una planilla resumen.

Tabla 3.36 Resumen de % que pasa de material grueso, fino y filler.

Tamiz	Porcentaje que pasa [%]							
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	N°4	N°8	N°30	N°100	N°200
Especificación ASTM D3515	90-100	-	56-80	35-65	23-49	-	-	2-8
Media de especificación	95.00		68	50	36			5.00
Grueso G	100	94.60	60.76	7.21	0.00	0.00	0.00	0.00
Fino F	100.00	100.00	100.00	100.00	90.91	62.99	11.95	4.12
Filler M	100	100	100	100	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

La revisión de las gradaciones de cada uno de los materiales indica claramente una separación entre el agregado grueso y el fino a partir del tamiz N°8, siendo la mayor proporción de la fracción inferior a ese tamiz, aportada por el agregado fino.

Un primer ajuste de la mezcla se puede lograr estimando las proporciones de agregado grueso y fino requeridos para obtener 36 % de material inferior al tamiz N° 8 (% Pasa - media de la especificación).

El porcentaje (a) de agregado grueso (G) para producir la cantidad deseada que pase un tamiz específico (en este caso el tamiz N°8) puede calcularse:

En este caso usaremos la fórmula para la mezcla de dos materiales:

$$G * a + F * b = P \quad \text{Ecuación 1}$$

Debido a que:

$$a + b = 1 \quad \text{Ecuación 2}$$

Sustituyendo y despejando:

$$b = \frac{P - G}{F - G} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$a = \frac{P - F}{G - F} \quad \text{Ecuación 4}$$

Reemplazando en ecuación 4:

$$a = \frac{36 - 90,91}{0 - 90,91}$$

$$a = 0,604 = 0,60$$

La ecuación para tres agregados:

$$P = G * a + F * b + M * c \quad \text{Ecuación 5}$$

Debido a que:

$$a + b + c = 1 \quad \text{Ecuación 6}$$

Despejando:

$$b = 1 - a - c \quad \text{Ecuación 7}$$

$$b = 1 - 0,604 - c$$

$$b = 0,396 - c \quad \text{Ecuación 8}$$

Sustituyendo ecuación 8 en ecuación 5, analizando el tamiz N° 200:

$$P = G * 0,604 + F * b + M * c$$

$$5 = 0 * 0,604 + 4,12 * (0,396 - c) + 100 * c$$

$$c = 0,035 = 0,04$$

Sustituyendo “c” en ecuación 8:

$$b = 0,396 - c$$

$$b = 0,396 - 0,035$$

$$b = 0,361 = 0,36$$

Como resultado nos da un porcentaje granulométrico de:

$$a = 0,60 \quad ; \quad b = 0,3 \quad ; \quad c = 0,04$$

$$a + b + c = 1$$

La granulometría queda de la siguiente manera:

Agregado grueso = 60 %

Agregado fino = 36 %

Filler = 4 %

Con estos porcentajes se determina una faja granulométrica la cual debe estar dentro del rango de especificación según ASTM D3515.

Para el diseño de dicha franja granulométrica el agregado grueso según calculo nos dio un porcentaje de 60 % del cual 36% será de grava y 24% de gravilla, agregado fino del 26% y 5% de filler.

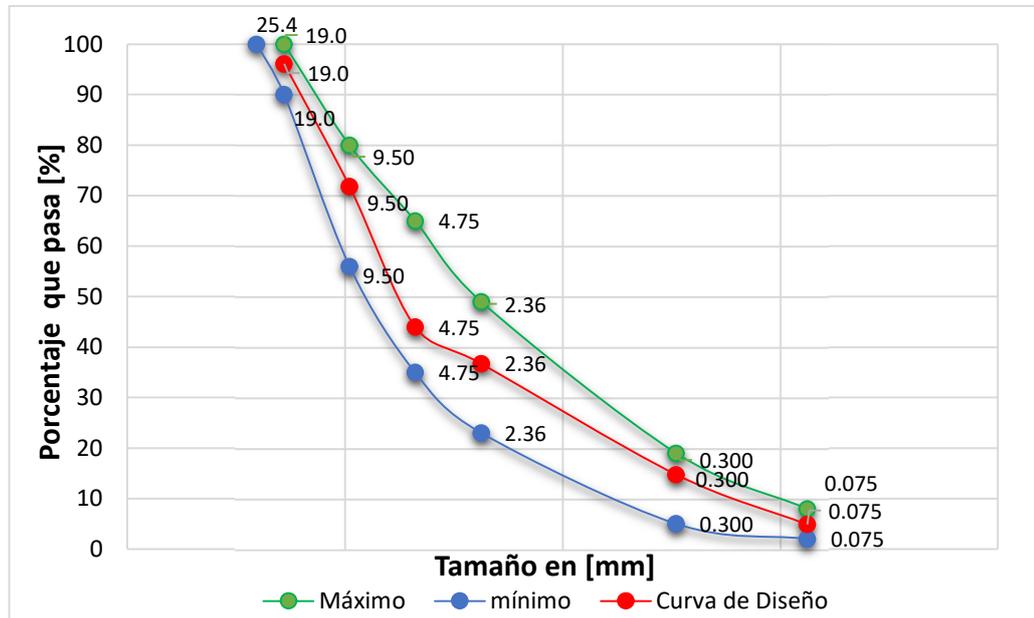
A continuación, se presenta una tabla con la dosificación de materiales pétreos con sus respectivos % de retenidos y % que pasa en cada tamiz.

Tabla 3.37: Dosificación de materiales pétreos.

Tamices N°	tamaño [mm]	Grava	Gravilla	Arena	Filler	% retenido	% que pasa del total	Especificaciones ASTM D3515	
		[%] 36.00	[%] 24.00	[%] 36.00	[%] 4.00			Mínimo	Máximo
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.0	77.80	0.00	0.00	0.00	3.89	96.11	90	100
1/2"	12.5	307.84	0.00	0.00	0.00	19.28	80.72	-	-
3/8"	9.50	175.84	2.27	0.00	0.00	28.19	71.81	56	80
N°4	4.75	158.52	397.99	0.00	0.00	56.01	43.99	35	65
N°8	2.36	0.00	79.74	65.48	0.00	63.27	36.73	23	49
N°16	1.18	0.00	0.00	64.58	0.00	66.50	33.50	-	-
N°30	0.60	0.00	0.00	136.39	0.00	73.32	26.68	-	-
N°50	0.30	0.00	0.00	238.28	0.00	85.24	14.76	5	19
N°100	0.15	0.00	0.00	131.06	0.00	91.79	8.21	-	-
N°200	0.075	0.00	0.00	56.33	10.20	95.12	4.88	2	8
BASE	-	0.00	0.00	27.89	69.80	100.00	0.00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.5: Curva granulométrica formada.



Fuente: Elaboración propia.

3.5 Contenido mínimo del cemento asfáltico

Para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico primero se debe calcular el contenido mínimo de cemento asfáltico, para obtener este contenido se utiliza el método de área superficial.

3.5.1 Método del área superficial

Se utilizan materiales que contienen cierta cantidad de finos. El método se basa en la estimación de la superficie de los agregados pétreos por cada kilogramo de material.

Primeramente, se determina la composición granulométrica del material pétreo, para realizar una estimación se hace uso de las siguientes constantes de áreas en m^2/kg del material pétreo.

Tabla 3.38: Constante de área.

Material				Porcentaje de partículas entre las mallas	Constante de área [m ² /kg]
Pasa la malla		Se retiene en malla			
Tamices	Tamaño en [mm]	Tamices	Tamaño en [mm]		
1 ^{1/2} "	37.5	3/4"	19	H	0.27
3/4"	19	N°4	4.75	G	0.41
N°4	4.75	N°40	0.425	g	2.05
N°40	0.425	N°200	0.075	A	15.38
N°200	0.075	Pasa-200		F	53.3

Fuente: Elaboración propia.

También se determina el índice asfáltico que varía entre 0.0055 y 0.0100, esto de acuerdo a la rugosidad y porosidad de los agregados de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3.39: Índice asfáltico.

Material pétreo	Índice asfáltico n		
	Absorción 0 a 2,5 %	Absorción 2,6 a 5 %	Absorción mayor de 5 %
Grava o arena de río material redondeado.	0,0055	0,0065	0,0075
Gravas angulosas o redondeadas.	0,0065	0,0075	0,0085
Rocas trituradas (angulosas).	0,0075	0,0085	0,0100

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

Para el cálculo se debe aplicar la siguiente formula:

$$P = 0,27 * n * H + 0,41 * n * G + 2,05 * n * g + 15,38 * n * A + 53,3 * F$$

Donde:

H, G, g, A, F = Porcentaje de partículas entre las mallas

n = Índice de asfálticos.

Tabla 3.40: Cálculo del contenido mínimo de cemento asfáltico.

Mallas	% que pasa dosificación 36% - 24% - 36% - 4%	% de partículas entre mallas	Constante de área k	Índice asfáltico	Contenido mínimo de C.A. [%]
1"	100.00				
3/4"	96.11	0.04	0.27	0.0075	0.01
1/2"	80.72				
3/8"	71.81				
Nº4	43.99	0.52	0.41	0.0075	0.16
Nº8	36.73				
Nº16	33.50				
Nº40	20.72	0.23	2.05	0.0075	0.36
Nº50	14.76				
Nº100	8.21				
Nº200	4.88	0.16	15.38	0.0075	1.83
BASE	0.00	0.05	53.3	0.0075	1.95
		1.00			4.31

Fuente: Elaboración propia.

Nos da como resultado un contenido mínimo del cemento asfáltico de 4.31 % con el cual partiremos para hallar el contenido óptimo.

3.6 Contenido óptimo de cemento asfáltico

El contenido óptimo de cemento asfáltico de una mezcla depende en gran parte de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción.

La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área específica total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas.

Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregado más grande) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área específica total.

3.6.1 Dosificación de la mezcla asfáltica

Con el contenido mínimo de cemento asfáltico variaremos su porcentaje de la siguiente manera para hallar el contenido óptimo:

Cantidad mínima de C.A. – 1 %

Cantidad mínima de C.A.

Cantidad mínima de C.A. + 0,5 %

Cantidad mínima de C.A. + 1 %

Cantidad mínima de C.A. – 1,5 %

Cantidad mínima de C.A. – 2 %

Para la elaboración de briquetas de ensayo, se realizará 3 briquetas con cada porcentaje de cemento asfáltico dando un total de 18 briquetas con la cual se determinará el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Tabla 3.41: Dosificación de la mezcla asfáltica.

Peso total de briqueleta [g]	1200
Ponderación de grava [%]	36
Ponderación de gravilla [%]	24
Ponderación de arena [%]	36
Ponderación de filler [%]	4

Porcentaje de briqueleta	100 %
Porcentaje de cemento asfáltico	X %
Porcentaje de agregado	Y=100-X

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Dosificación con variación del porcentaje de cemento asfáltico

Tabla 3.42: Dosificación de la mezcla asfáltica con variación de porcentajes de cemento asfáltico.

Porcentaje de Cemento asfáltico [%]	3.31	4.31	4.81	5.31	5.81	6.31
Porcentaje de agregado [%]	96.69	95.69	95.19	94.69	94.19	93.69
Peso del cemento asfáltico [g]	39.72	51.72	57.72	63.72	69.72	75.72
Peso de grava [g]	417.70	413.38	411.22	409.06	406.90	404.74
Peso de gravilla [g]	278.47	275.59	274.15	272.71	271.27	269.83
Peso de arena [g]	417.70	413.38	411.22	409.06	406.90	404.74
Peso de filler [g]	46.41	45.93	45.69	45.45	45.21	44.97
Peso total de la briqueta [g]	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3 Desarrollo de la elaboración de briquetas

Equipo:

Balanza ± 0.1 g.

Termómetro de 360 °C

Espátula

Moldes de compactación

Bandejas metálicas

Equipo de compactación

Equipo de desmolde

Taras

Preparación de la muestra de ensayo

Las muestras se preparan de la siguiente manera:

- El agregado grueso se debe lavar y secar en horno por 24 horas a una temperatura de 110 ± 5 °C, y pesar según su dosificación.
- El agregado fino se debe secar en horno por 24 horas a una temperatura de 110 ± 5 °C, y pesar según su dosificación.
- El cemento asfáltico debe calentarse y pesar en taras según su porcentaje ya calculado anteriormente.

Elaboración de briquetas

- El cemento asfáltico previamente pesado según su porcentaje a usar se debe calentar y mezclar con los agregados pétreos en una bandeja hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas, la temperatura debe rondar entre los 160 a 180 °C.
- La mezcla asfáltica caliente se coloca en el molde precalentado Marshall como preparación para su compactación, el cual es calentado para que no enfrié la superficie de la mezcla al golpearla. Se coloca la muestra al molde en tres capas, cada capa se la compacta con 25 golpes manuales.
- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall mecánico. El número de golpes del martillo depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada, en este caso 75 golpes por cara para un tránsito pesado.
- Después de compactar la briqueta se deja enfriar alrededor de 10 a 15 minutos para su posterior extracción del molde, y dejarlas a temperatura ambiente por un periodo de 24 horas para luego continuar con el ensayo de Marshall.

Figura 3.7: Mezclado del agregado con cemento asfáltico y lectura de la temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.8: Compactación de la briqueta con el martillo Marshall mecánico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9: Proceso de desmolde de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.10: Reposo de briquetas según su porcentaje de cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia.

3.7 Procedimiento de ensayo Marshall

Existen tres procedimientos de ensayo en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las briquetas.

3.7.1 Método de prueba estándar para espesor o altura de la briqueleta de ensayo (ASTM D-3549)

Antes de realizar el ensayo se debe determinar la altura de la briqueleta la cual nos servirá para cálculos de estabilidad Marshall.

Para determinar su altura se marca la briqueleta con una tiza en 4 partes iguales y con la ayuda de un vernier medimos la altura de la briqueleta en las marcas de esta manera obtendremos una altura representativa de la briqueleta.

Figura 3.11: Marcado y medición de altura de la briqueleta.



Fuente: Elaboración propia.

3.7.2 Método de prueba estándar del peso específico total (ASTM D-2726).

En este ensayo se determina su peso en seco, peso sumergido en agua y peso saturado superficialmente seco de la briqueta.

Para determinar el peso en seco se procede a pesar la briqueta en una balanza con precisión de 0,1 g.

Para el peso sumergido se deja la briqueta en baño maría a 25 °C por un tiempo de 10 minutos para que se sature, transcurrido los 10 minutos de baño maría, se procede a determinar su peso sumergido en agua sacamos mediante una balanza hidrostática.

Para el peso saturado superficialmente seco, sacamos la briqueta del canastillo de la balanza hidrostática la secamos con un trapo o paño y determinamos su peso saturado superficialmente seco.

Figura 3.12: Determinación del peso seco y sumergido en agua.



Fuente: Elaboración propia.

3.7.3 Método de prueba estándar para estabilidad Marshall y flujo de mezclas asfálticas. (ASTM D-6927).

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla.

La fluencia mide la deformación, bajo carga constante que ocurre en la mezcla.

- Para la ruptura de briquetas primero se la sumerge en baño maría a $60 \pm 0,5$ °C por un periodo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos, esta temperatura representa la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.

- Par la realización del ensayo se limpian las superficies interiores de las mordazas, mismas que debe tener una temperatura entre 21 °C y 38 °C, si es inferior se deberá calentar en baño maría hasta alcanzar la temperatura indicada.

- La briqueta es removida del baño maría, secada rápidamente se envuelve la briqueta con papel periódico para que no ensucie las mordazas y se la coloca en el equipo Marshall, el aparato consiste de un dispositivo que aplica una carga sobre la briqueta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).

- Se pone en cero el indicador del dial del anillo de carga y se procede a aplicar la carga a una velocidad de deformación constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que se produzca la ruptura o falla de la briqueta. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.

- La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

Figura 3.13 Colocación de briqueta al equipo Marshall y ruptura.



Fuente: Elaboración propia.

3.8 Proceso de cálculo de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional

Para ejemplo de cálculo solo se realizará el procedimiento de cálculo un porcentaje de cemento asfáltico de 3,31 %.

3.8.1 Identificación de briquetas.

Para la identificación de briquetas se las enumero para este caso de porcentaje de cemento asfáltico de 3,31 % como 1, 2 y 3.

3.8.2 Espesor o altura de las briquetas.

Se la determina midiendo con el vernier en cuatro lados de la briqueta previamente dividido en partes iguales para así obtener una altura representativa.

Tabla 3.43: Alturas o espesores de cada briqueta ensayada.

Identificación	Alturas [cm]	Promedio [cm]
1	67.46	6.77
	68.09	
	67.87	
	67.31	
2	65.66	6.60
	65.78	
	66.3	
	66.33	
3	66.93	6.68
	66.57	
	67.21	
	66.67	

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3 Base de mezcla y agregado.

Para la base de mezcla se toma el porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas, en este cálculo el porcentaje es de 3,31 %.

Para la base de agregados se la determina mediante el siguiente procedimiento de cálculo.

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

$$\text{Base d agregado} = \frac{3.31 * 100}{100 - 3.31}$$

$$\text{Base d agregado} = 3.42 \%$$

3.8.4 Peso de la briqueta

3.8.4.1 Peso de la briqueta en estado seco.

Consiste en pesar la briqueta en la balanza.

Tabla 3.44: Peso de briquetas en estado seco.

Identificación	Peso de briqueta [g]
1	1197.2
2	1200
3	1186.9

Fuente: Elaboración propia.

3.8.4.2 Peso de la briqueta en estado saturado superficialmente seco.

Consiste en pesar la briqueta una vez sacada del baño maría a 25 °C y ser secada con un paño o trapo.

Tabla 3.45: Peso de briqueta saturada superficialmente seca (S.S.S.).

Identificación	Peso de briqueta S.S.S [g]
1	1209.5
2	1208.3
3	1194.6

Fuente: Elaboración propia.

3.8.4.3 Peso de la briqueta sumergida en el agua.

Consiste en pesar la briqueta en una balanza hidrostática luego de estar en baño maría a 25 °C.

Tabla 3.46: Peso de briqueta sumergida en agua.

Identificación	Peso de briqueta sumergida en agua [g]
1	693
2	694
3	690

Fuente: Elaboración propia.

3.8.5 Volumen de la briqueta.

Para briqueta identificada como 1:

$$\text{Volumen de briqueta} = \text{Peso S. S. S.} - \text{Peso sumergida}$$

$$\text{Volumen de briqueta} = 1209.5 - 693.00$$

$$\text{Volumen de briqueta} = 516.50 \text{ [g]}$$

Debido a que el peso del agua y su peso específico es 1 gr/cm^3 se considera:

$$\text{Volumen de briqueta} = 516.50 \text{ [cm}^3\text{]}$$

3.8.6 Densidad de la briqueta.

Para briqueta identificada como 1:

3.8.6.1 Densidad real de la briqueta.

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso de la briqueta en seco}}{\text{Volumen de la briqueta}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1197.2}{516.5}$$

$$\text{Densidad real} = 2.32 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

3.8.6.2 Densidad máxima teórica de la briqueta.

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

$$\text{Densidad max.} = \frac{100}{\frac{3.31}{1.012} + \frac{100 - 3.31}{2.66}}$$

$$\text{Densidad max.} = 2.52 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

3.8.7 Porcentaje de vacíos.

Para briqueta identificada como 1:

3.8.7.1 Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv).

$$Vv = \frac{\text{Densidad max} - \text{Densidad real promedio}}{\text{Densidad max}} * 100\%$$

$$Vv = \frac{\text{Densidad max} - \text{Densidad real promedio}}{\text{Densidad max}} * 100\%$$

$$Vv = \frac{2.52 - 2.33}{2.522} * 100\%$$

$$Vv = 7.40 \%$$

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

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

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

$$V.A.M. = \frac{3.31 * 2.24}{1.012} + 7 \%$$

$$V.A.M = 14.95 \%$$

3.8.8 Estabilidad y fluencia.

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

Para determinar la estabilidad real la lectura del dial nos mide en mm, este valor se introduce a la ecuación calibrada la cual es:

$$\text{Estabilidad} = (0.012 * \text{Lectura del dial} - 0.0812) * 102 * 2.2$$

Para briqueta identificada como 1:

$$\text{Estabilidad} = (0.012 * 815 - 0.0812) * 102 * 2.2$$

$$\text{Estabilidad} = 2176.41 \text{ libras}$$

Después del cálculo de la estabilidad real se debe corregir por la altura de la briqueta con la siguiente formula:

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

El factor de corrección es de acuerdo a la altura de la briqueta según método Marshall cuando la altura es diferente de 63,5 mm.

Tabla 3.47: Alturas promedio y factor de corrección.

Identificación	Promedio de alturas [cm]	Factor de corrección	Estabilidad real promedio [libras]	Estabilidad corregida [libras]
1	6.77	0.91	2176.41	1969.65
2	6.60	0.94	2222.19	2095.97
3	6.68	0.93	2162.95	2006.13

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado se tiene lo siguiente:

Tabla 3.48: Resultados de estabilidad y fluencia.

Identificación	Estabilidad [libras]		Fluencia [0,01 pulgadas]	
	Corregida	Promedio	Lectura	Promedio
1	1969.65	2023.92	10	10.33
2	2095.97		10	
3	2006.13		11	

Fuente: Elaboración propia.

3.9 Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Después de realizar el proceso de cálculo en gabinete se tiene:

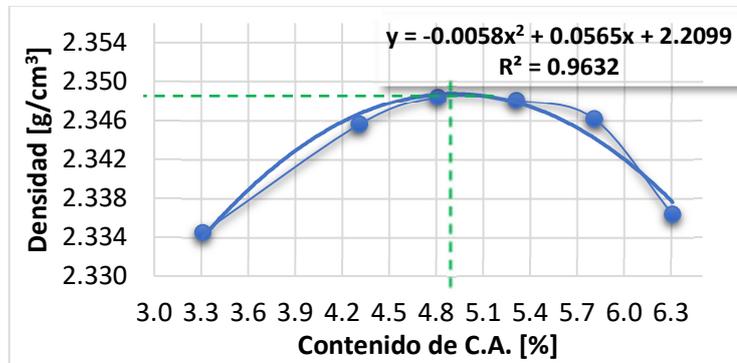
Tabla 3.49: Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional.

Porcentaje de cemento asfáltico [%]	Densidad promedio [g/cm ³]	Estabilidad corregida [libras]	Fluencia [pulg.]	% de vacíos de mezcla total [%]	R.B.V. (Relación Betún Vacíos) [%]	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) [%]
3.31	2.334	2023.92	10.33	7.40	50.48	14.95
4.31	2.346	2298.09	11.00	5.41	64.72	15.34
4.81	2.348	2383.42	12.33	4.51	71.14	15.62
5.31	2.348	2385.60	14.00	3.72	76.73	16.00
5.81	2.346	2272.98	15.67	3.00	81.76	16.43
6.31	2.336	2137.31	18.00	2.59	84.87	17.13

Fuente: Elaboración propia.

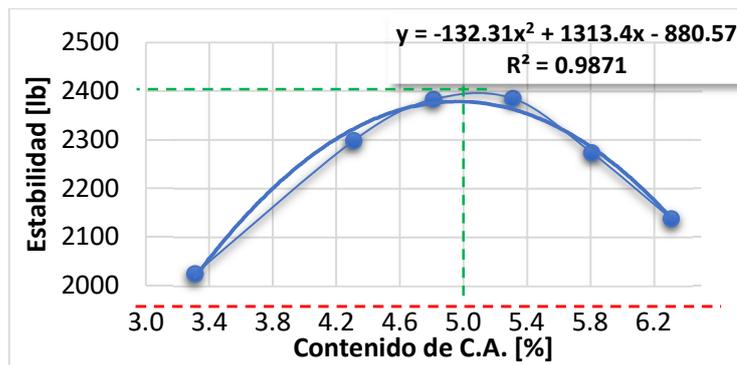
3.10 Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico.

Gráfico 3.6: Porcentaje de cemento asfáltico vs densidad.



Fuente: Elaboración propia.

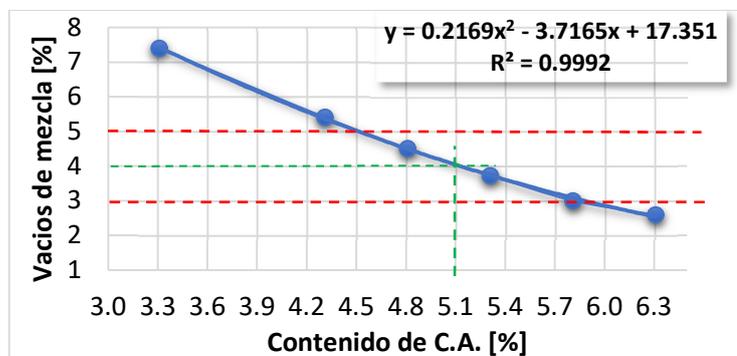
Gráfico 3.7: Porcentaje de cemento asfáltico vs estabilidad corregida.



Mínimo 1800

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.8: Porcentaje de cemento asfáltico vs % de vacíos respecto a la mezcla total.



Máximo 5

Mínimo 3

Fuente: Elaboración propia.

La obtención del contenido óptimo de cemento asfáltico se realiza en función a estas tres graficas mediante los siguientes criterios:

- La densidad máxima
- La estabilidad máxima
- Porcentaje de vacíos entre 3% - 5%, para esta investigación se trabaja con el 4%

Del cual cada propiedad tendrá su contenido de cemento asfáltico, donde se sacará el promedio y este será el contenido óptimo de cemento asfáltico.

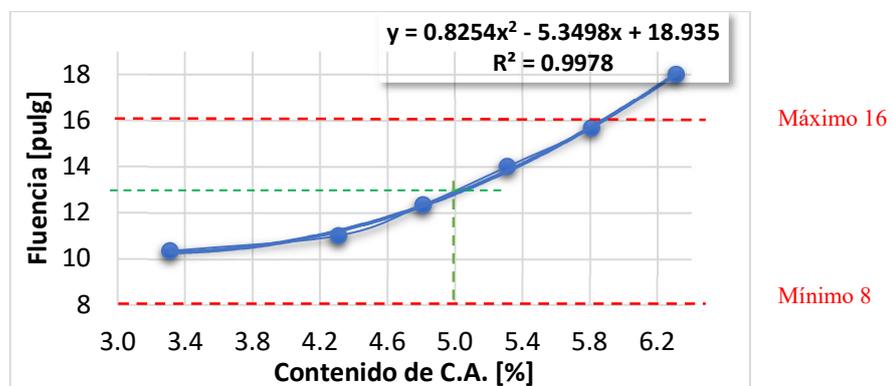
Tabla 3.50: Resultados de las gráficas del ensayo Marshall.

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall [lb]	2458.86	4.96
Densidad máxima [g/cm ³]	2.347	4.87
Vacíos de la mezcla [%]	4.00	5.13
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.00

Fuente: Elaboración propia.

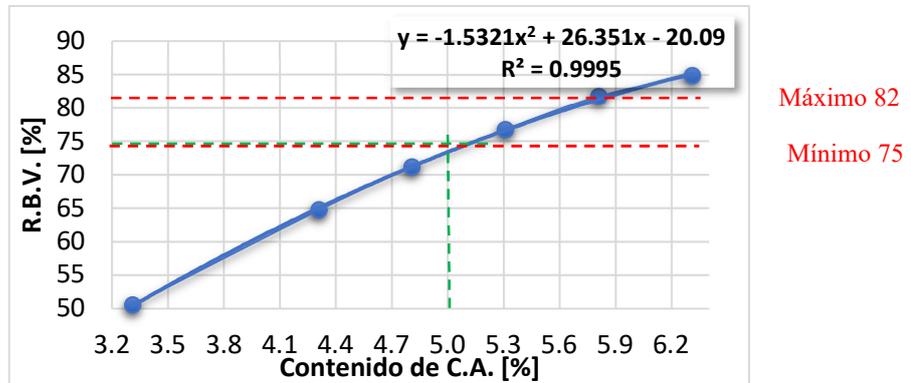
Con el contenido óptimo de cemento asfáltico de 5% se verifica en las demás propiedades si cumplen con la norma establecida.

Gráfico 3.9: Porcentaje de cemento asfáltico vs fluencia.



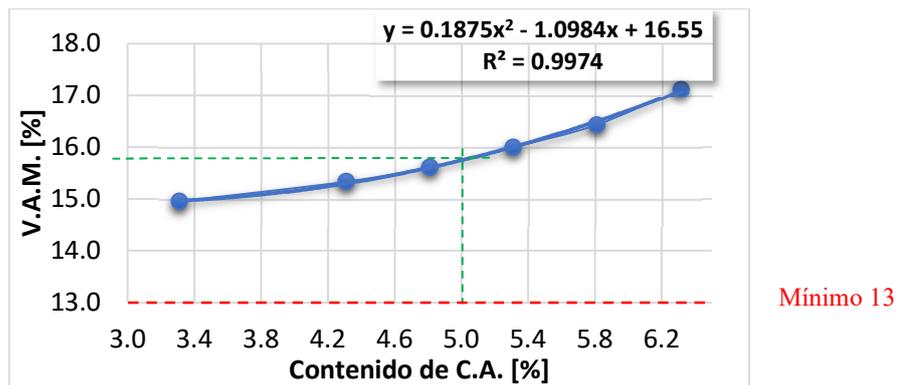
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.10: Porcentaje de cemento asfáltico vs relación betumen vacíos (R.B.V.).



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.11: Porcentaje de cemento asfáltico vs vacíos del agregado mineral (V.A.M.).



Fuente: Elaboración propia.

3.11 Elaboración de briquetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y reemplazando el filler convencional por talco industrial.

Para la elaboración de briquetas la dosificación de filler variará de 1% ,2% ,3% ,4% ,5% y 6%. En tal sentido la dosificación tendrá la siguiente distribución:

Tabla 3.51: Dosificación con el contenido óptimo de cemento asfáltico variando el porcentaje de talco industrial como filler.

Identificación	Dosificación				
	Filler [%]	C.A. [%]	Grava [%]	Gravilla [%]	Arena [%]
1	1	5	36	24	39
2	2	5	36	24	38
3	3	5	36	24	37
4	4	5	36	24	36
5	5	5	36	24	35
6	6	5	36	24	34

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.52: Peso del agregado y cemento asfáltico.

Identificación	Porcentaje de agregado [%]	Peso del agregado según dosificación					Peso total de briqueta [g]
		Filler [g]	C.A. [g]	Grava [g]	Gravilla [g]	Arena [g]	
1	95.00	11.40	60.00	410.40	273.60	444.60	1200
2	95.00	22.80	60.00	410.40	273.60	433.20	1200
3	95.00	34.20	60.00	410.40	273.60	421.80	1200
4	95.00	45.60	60.00	410.40	273.60	410.40	1200
5	95.00	57.00	60.00	410.40	273.60	399.00	1200
6	95.00	68.40	60.00	410.40	273.60	387.60	1200

Fuente: Elaboración propia.

Con la dosificación haciendo variar el porcentaje de filler talco industrial se realiza la elaboración de briquetas, tres briquetas para cada dosificación dando un total de 18 briquetas.

Figura 3.14: Pesaje del cemento asfáltico y del agregado para realizar briquetas.



Fuente: Elaboración propia.

El proceso de elaboración y cálculo es el mismo que se realizó para determinar el porcentaje de cemento asfáltico óptimo por lo que se tiene los siguientes resultados:

Tabla 3.53: Datos obtenidos del ensayo Marshall de mezclas asfálticas con adición de talco industrial en reemplazo del filler convencional.

Porcentaje de talco industrial [%]	Briqueta de ensayo	Altura promedio [cm]	Peso seco [g]	Peso saturado superficialmente seco [g]	Peso sumergido en agua [g]	Lectura del dial estabilidad [mm]	Lectura dial fluencia [0.01 pulg]
1	1	6.80	1186.23	1204.45	683	1361	11
	2	6.79	1197.24	1209.60	686	1322	15
	3	6.85	1195.56	1207.47	684	1211	10
2	4	6.89	1198.20	1209.50	697	1507	15
	5	6.75	1200.10	1208.23	695	1427	8
	6	6.77	1189.36	1203.23	686	2147	16
3	7	6.68	1187.80	1197.20	690	2006	15
	8	6.79	1188.90	1199.50	693	1945	14

	9	6.80	1193.80	1202.3	697	1997	15
4	10	6.54	1199.54	1204.45	699	1881	16
	11	6.73	1194.25	1199.56	694	1900	15
	12	6.64	1198.57	1205.63	698	1893	16
5	13	6.70	1187.60	1192.50	686	1876	18
	14	6.64	1194.60	1199.70	699	1603	16
	15	6.71	1196.90	1200.20	703	1400	15
6	16	6.76	1193.78	1195.87	684	1336	17
	17	6.77	1196.21	1198.56	702	1154	15
	18	6.74	1197.88	1199.12	704	1301	18

Fuente: Elaboración propia.

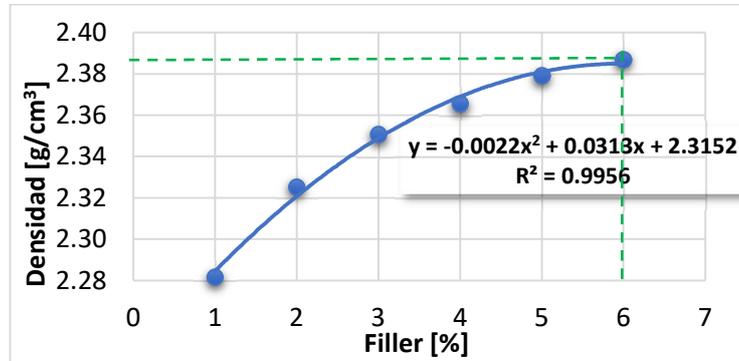
Tabla 3.54: Resultados de las mezclas asfálticas con porcentaje de talco industrial como filler en reemplazo del convencional.

Porcentaje de talco industrial [%]	Densidad promedio [g/cm³]	Estabilidad corregida [libras]	Fluencia [pulg.]	Porcentaje de vacíos de mezcla total [%]	R.B.V. (relación betún vacíos) [%]	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) [%]
1	2.282	3111.48	12.00	6.77	62.32	17.96
2	2.325	4082.04	13.00	5.04	69.41	16.47
3	2.351	4833.52	14.67	4.05	74.08	15.61
4	2.366	4744.74	15.67	3.49	76.96	15.13
5	2.379	4038.96	16.33	2.98	79.74	14.70
6	2.387	3074.74	16.67	2.71	81.27	14.47

Fuente: Elaboración propia.

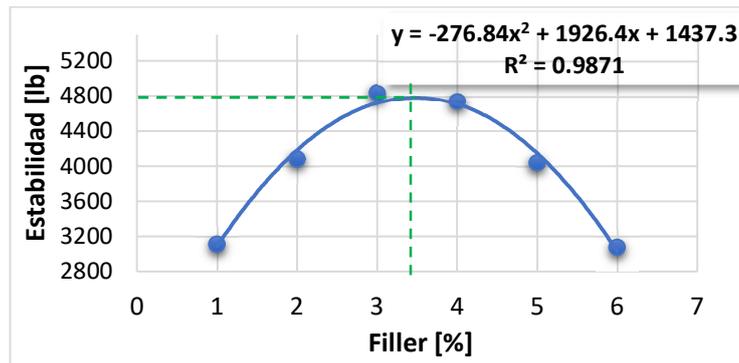
Obtenidos estos resultados se debe graficar las siguientes relaciones:

Gráfico 3.12: Densidad vs filler.



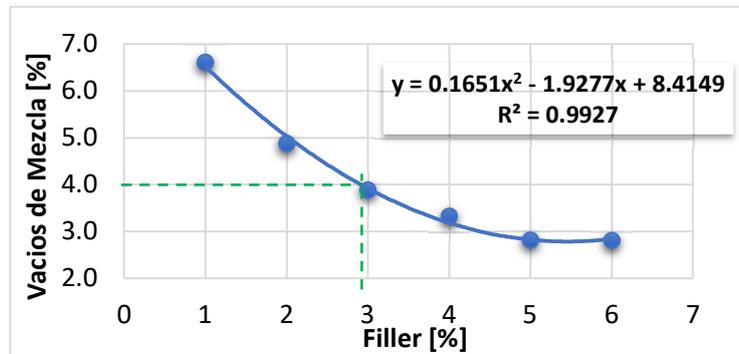
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.13: Estabilidad vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.14: Porcentaje de vacíos de mezcla vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

La obtención del contenido óptimo de talco industrial se realiza en función a estas tres graficas mediante los siguientes criterios:

- La densidad máxima
- La estabilidad máxima
- Porcentaje de vacíos entre 3% - 5%, para esta investigación se trabaja con el 4%

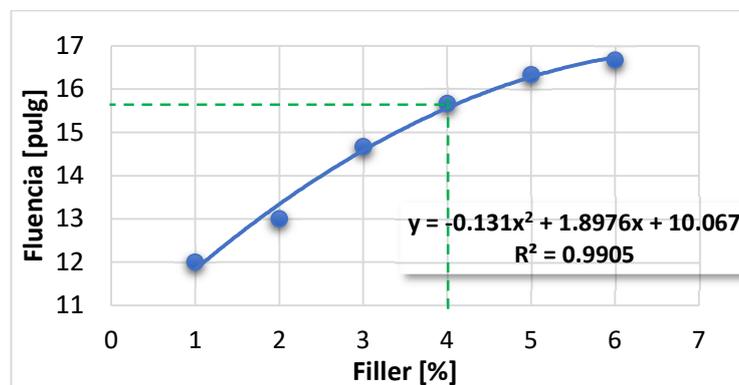
Tabla 3.55: Resultados de las gráficas del ensayo Marshall para el contenido óptimo de talco industrial.

Ensayo	Valor de Diseño	% de talco
Estabilidad Marshall [lb]	4788.53	3.48
Densidad máxima [g/cm ³]	2.387	6.00
Vacíos de la mezcla [%]	4.00	2.89
% Porcentaje óptimo de talco	Promedio (%) =	4.12

Fuente: Elaboración propia.

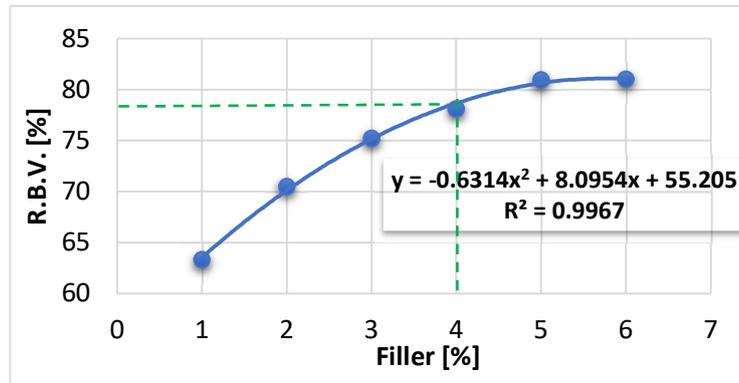
Con el contenido óptimo de filler talco industrial de 4.12 % se verifica en las demás propiedades si cumplen con la norma establecida.

Gráfico 3.15: Fluencia vs filler.



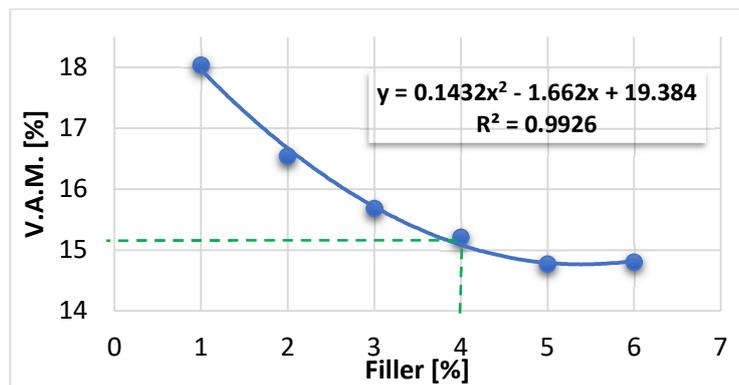
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.16: R.B.V. vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.17: V.A.M. vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

3.12 Elaboración de briquetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico añadiendo el filler convencional

Para este caso también se variará el porcentaje de filler convencional de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% y 6%.

La dosificación será la misma que se utilizó anteriormente para la elaboración de briquetas reemplazando filler convencional por talco industrial.

Figura 3.15: Ruptura de briquetas.



Fuente: Elaboración propia.

Con la dosificación haciendo variar el porcentaje de filler talco industrial se realiza la elaboración de briquetas, tres briquetas para cada dosificación dando un total de 18 briquetas.

Tabla 3.56: Datos obtenidos del ensayo Marshall de mezclas asfálticas con filler convencional.

Porcentaje de filler convencional [%]	Briqueta de ensayo	Altura promedio [cm]	Peso seco [g]	Peso saturado superficialmente seco [g]	Peso sumergido en agua [g]	Lectura del dial estabilidad [mm]	Lectura dial fluencia [0.01 pulg]
1	1	6.41	1179.50	1188.40	671.00	1244	10
	2	6.42	1176.40	1185.20	668.00	1238	10
	3	6.32	1174.40	1188.60	673.00	1221	9
2	4	6.48	1200.30	1206.20	684.00	1389	12
	5	6.41	1176.60	1180.80	671.00	1372	11
	6	6.38	1194.30	1196.90	683.00	1360	11

3	7	6.26	1173.80	1176.30	673.00	1458	13
	8	6.19	1170.00	1171.30	669.00	1432	13
	9	6.30	1175.40	1177.60	674.00	1441	12
4	10	6.36	1185.90	1190.40	689.00	1495	13
	11	6.54	1194.50	1199.40	682.00	1509	14
	12	6.31	1170.80	1174.10	683.00	1489	13
5	13	6.32	1187.80	1419.00	689.00	1419	14
	14	6.29	1176.00	1402.00	684.00	1402	14
	15	6.31	1180.20	1411.00	679.00	1411	14
6	16	6.34	1197.70	1198.50	699.00	1254	14
	17	6.27	1187.70	1189.10	685.00	1271	15
	18	6.30	1180.90	1182.20	681.00	1270	14

Fuente: Elaboración propia.

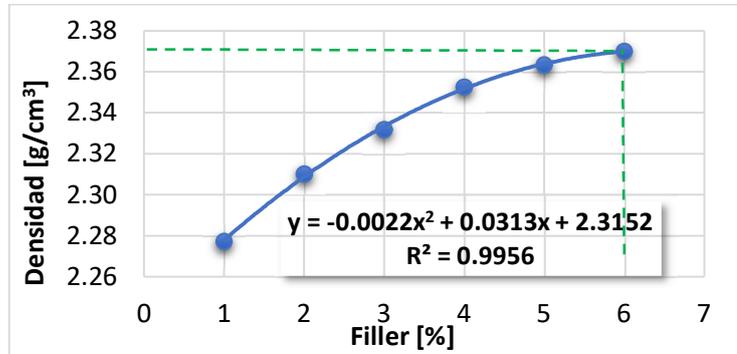
Tabla 3.57: Resultados del ensayo Marshall las mezclas asfálticas con porcentaje de filler convencional.

Porcentajes de filler convencional [%]	Densidad promedio [g/cm ³]	Estabilidad [libras]	Fluencia [pulg]	Porcentaje de vacíos de mezcla total [%]	R.B.V. (relación betún vacíos) [%]	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) [%]
1	2.277	3278.31	9.667	6.95	62.63	18.12
2	2.310	3612.97	11.333	5.66	67.71	17.01
3	2.332	3972.29	12.667	4.83	70.37	16.29
4	2.353	3964.50	13.333	4.03	74.19	15.60
5	2.363	3824.4	14.000	3.64	76.16	15.27
6	2.370	3430.10	14.333	3.42	77.34	15.09

Fuente: Elaboración propia.

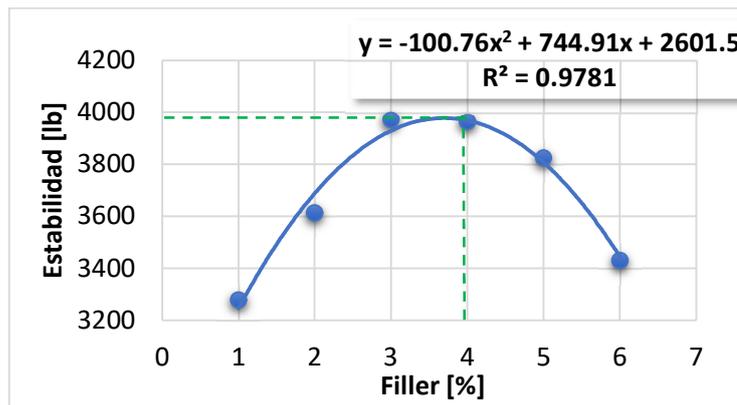
Obtenidos estos resultados se debe graficar las siguientes relaciones:

Gráfico 3.18: Densidad vs filler.



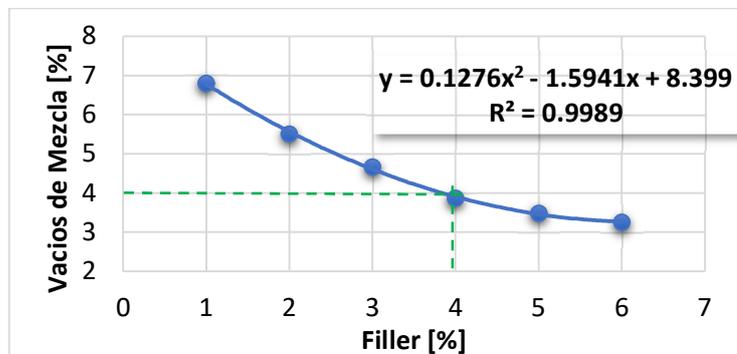
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.19: Estabilidad corregida vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.20: Porcentaje de vacíos de mezcla vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

La obtención del contenido óptimo de filler convencional se realiza en función a estas tres graficas mediante los siguientes criterios:

- La densidad máxima
- La estabilidad máxima
- Porcentaje de vacíos entre 3% - 5%, para esta investigación se trabaja con el 4%

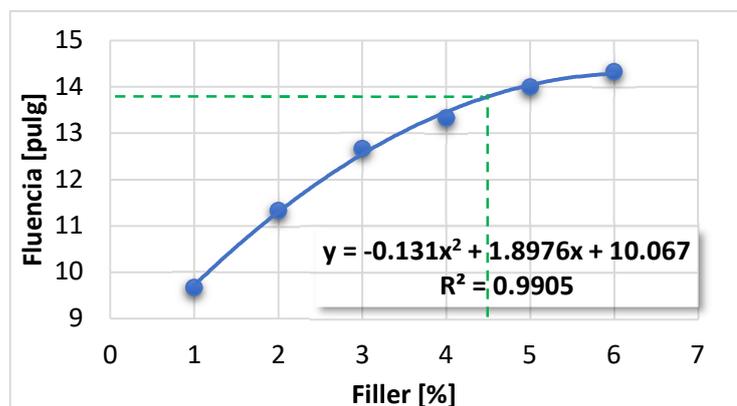
Tabla 3.58: Resultados de las gráficas del ensayo Marshall para el contenido óptimo de filler convencional.

Ensayo	Valor de Diseño	% de filler
Estabilidad Marshall [lb]	3978.26	3.70
Densidad máxima [g/cm ³]	2.370	6.00
Vacíos de la mezcla [%]	4.00	4.03
% Porcentaje óptimo de filler	Promedio (%) =	4.58

Fuente: Elaboración propia.

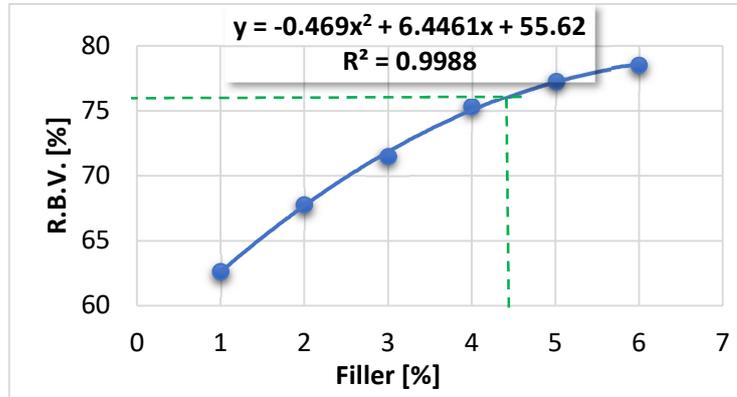
Con el contenido óptimo de filler convencional de 4.58 % se verifica en las demás propiedades si cumplen con la norma establecida.

Gráfico 3.21: Fluencia vs filler.



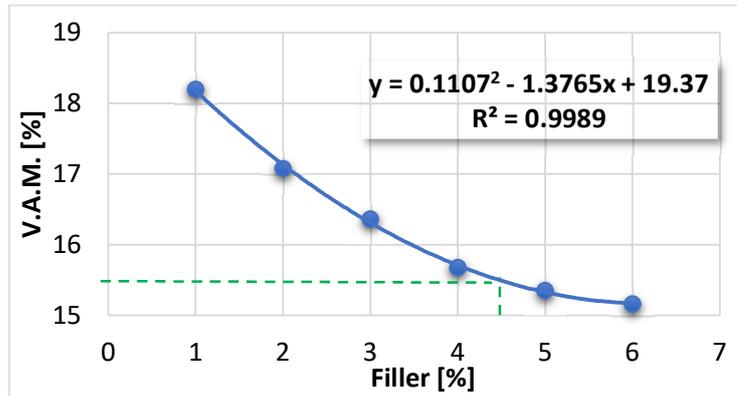
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.22: Relación betumen vacíos (R.B.V.) vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.23: Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE DATOS OBSERVADOS

CAPÍTULO IV

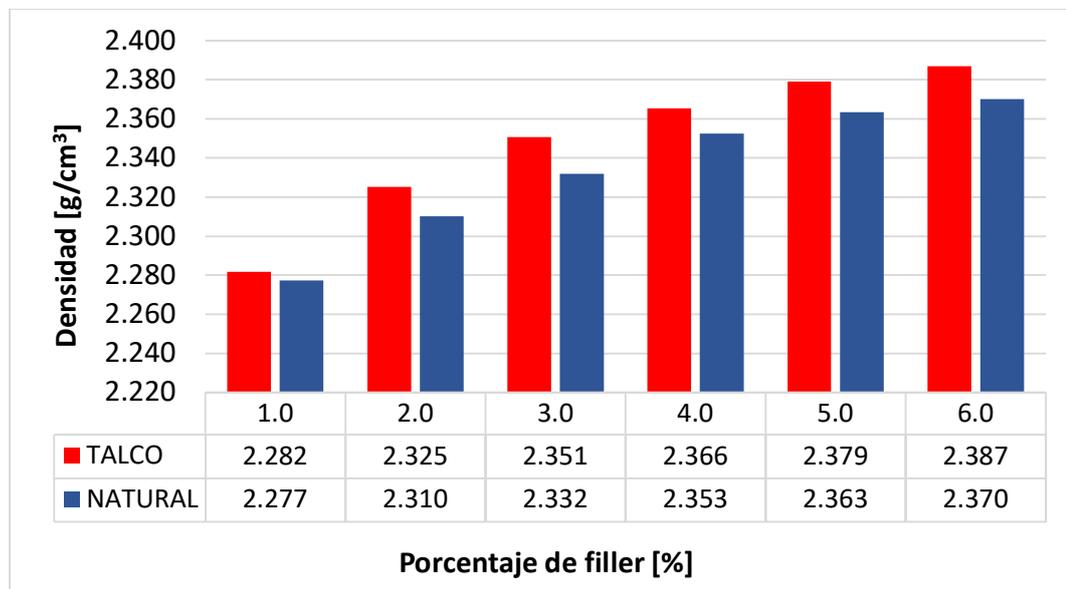
PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis y resultados de una mezcla asfáltica convencional y una modificada

Se analiza la influencia que tiene el talco industrial como filler en la elaboración de mezclas asfálticas en comparación con una mezcla asfáltica con filler convencional.

4.1.1 Densidad vs filler

Gráfico 4.1: Densidad vs filler.



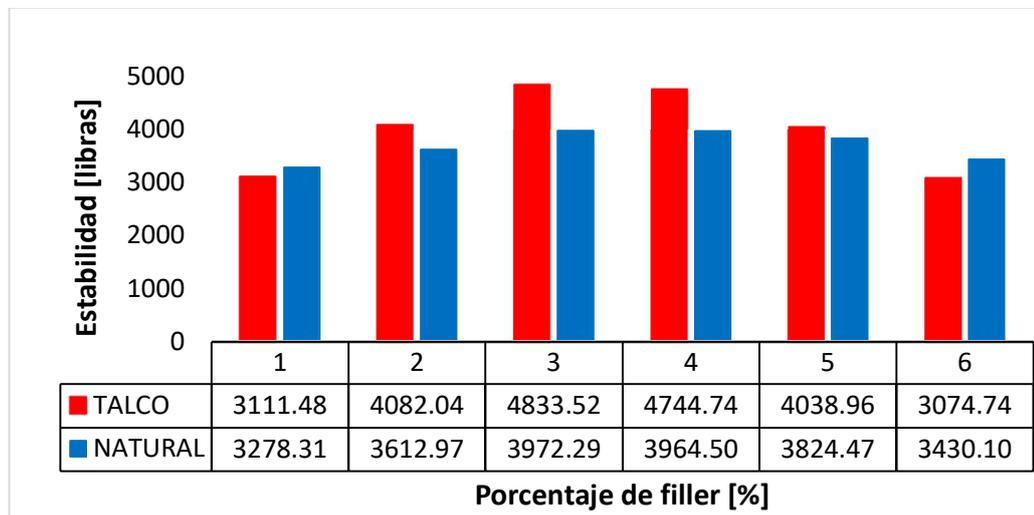
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la gráfica a medida que se aumenta el porcentaje de filler la mezcla se hace más densa esto se debe a que a mayor porcentaje de filler aumenta la cantidad de material sólido en la mezcla.

La variación de la densidad de la mezcla asfáltica con talco industrial aumenta un 0.22% en comparación de la mezcla asfáltica con filler convencional a un porcentaje de 1 % de filler, y aumenta un 2.19 % en comparación a una mezcla asfáltica con filler convencional al 0.71 % de filler,

4.1.2 Estabilidad vs filler

Gráfico 4.2: Estabilidad vs filler.



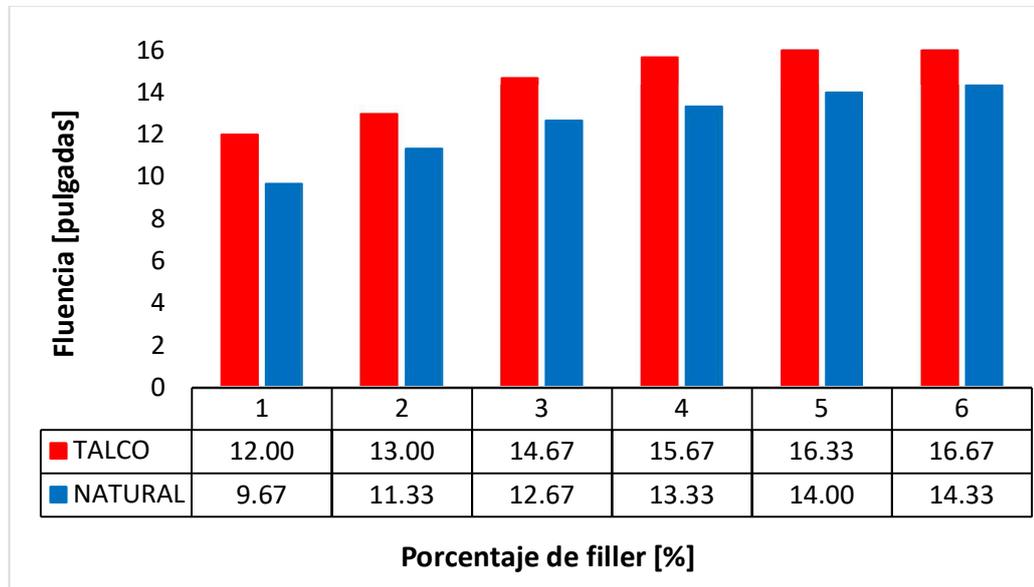
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la gráfica la estabilidad máxima que alcanza la mezcla asfáltica con talco industrial es de 4833.52 libras al 3% de talco industrial, en comparación a una mezcla asfáltica convencional la cual alcanza una estabilidad máxima de 3972.29 libras al 3 % de filler convencional, habiendo un aumento del 21.68 % de la mezcla con talco industrial en comparación a una mezcla asfáltica con filler convencional.

Para tráfico pesado la norma establece una estabilidad mínima de 1800 libras

4.1.3 Fluencia

Gráfico 4.3: Fluencia vs filler.



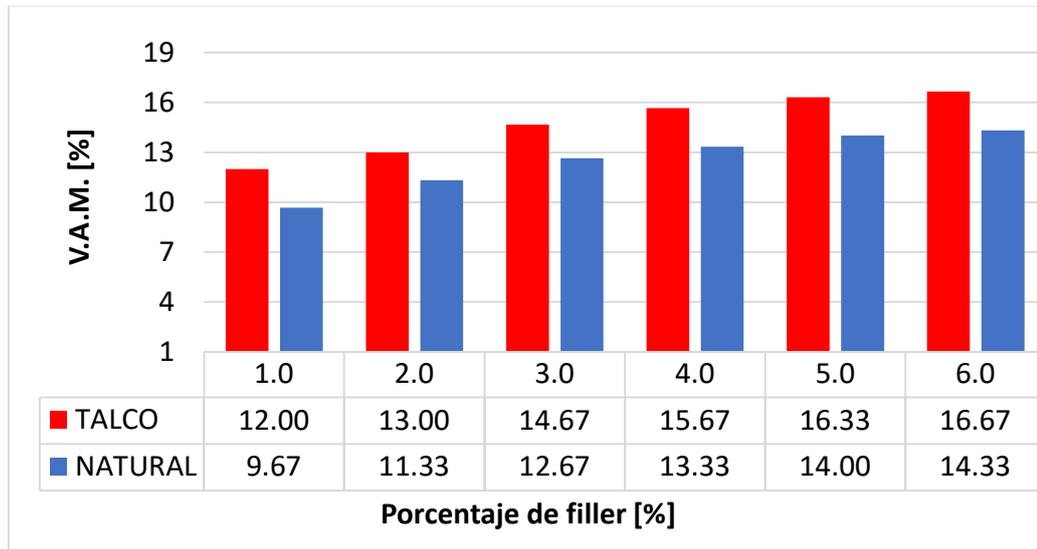
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la gráfica la fluencia aumenta a medida que se aumenta el porcentaje de filler, esto nos indica que a mayor porcentaje de filler la mezcla asfáltica puede tener una mayor deformación bajo una carga constante, por lo que no es bueno tener mucha fluencia en la mezcla asfáltica ya que puede resultar en deformaciones permanentes, para ella la norma nos da un rango el cual es de 8 a 16 pulgadas.

La fluencia de la mezcla asfáltica con talco industrial es mayor a la mezcla asfáltica con filler convencional en un 19.42 % al 1 % de filler y de 14.03 % al 6 % de filler.

4.1.4 Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs % filler

Gráfico 4.4: V.A.M. vs % filler.



Fuente: Elaboración propia.

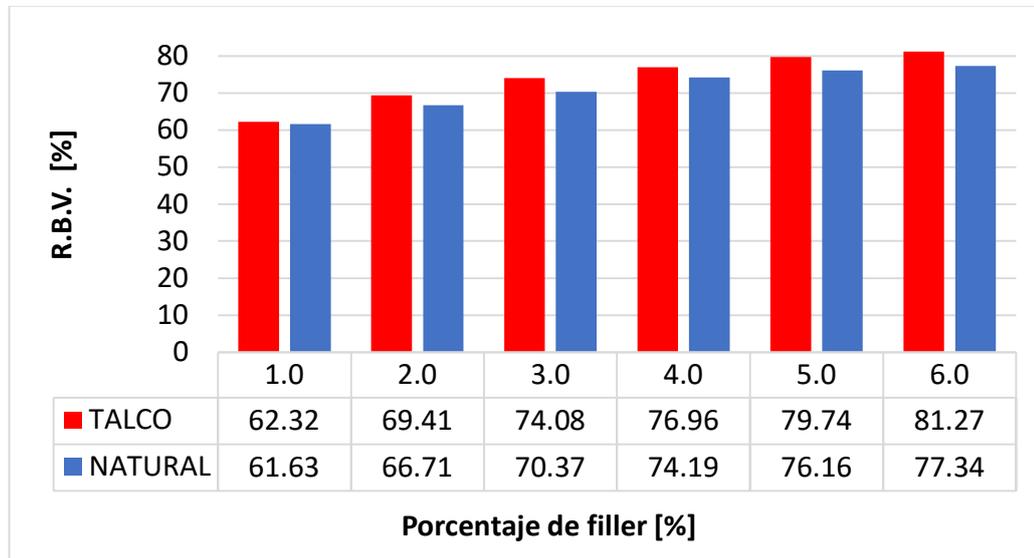
Se observa en la gráfica que el porcentaje de vacíos de agregado mineral disminuye a medida que aumenta la cantidad de filler en la mezcla asfáltica esto se debe a que el filler como material fino llena los espacios vacíos de la mezcla volviéndola menos permeable, pero poca cantidad de vacíos es perjudicial a la mezcla asfáltica ya que los vacíos proporcionan espacios para la deformación y la expansión de la mezcla asfáltica bajo cargas del tráfico y cambios de temperatura.

Según norma el porcentaje mínimo de vacíos de agregado mineral es del 13 %

El porcentaje de vacíos de agregado mineral de la mezcla con talco industrial tiene valores mayores a la mezcla asfáltica convencional por lo tanto aumenta un 2.33 % al 1 % de filler y un 2.34 % al 6 % de filler.

4.1.5 Relación betumen vacíos R.B.V. (%) vs % filler

Gráfica 4.5: R.B.V. vs % filler.

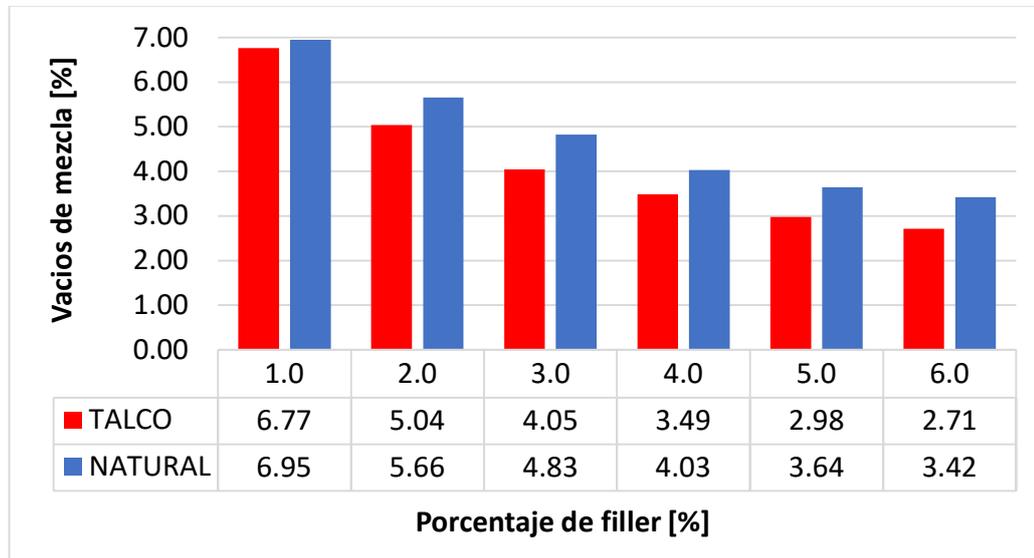


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de filler la relación betumen vacíos aumenta debido a que el filler al ser un material fino actúa como un agente de unión del agregado y betún llenando vacíos en la mezcla asfáltica también se ve que el talco industrial tiene mayor porcentaje en comparación al filler convencional variando en un 0.69 % al 1 % de filler y un 3.93% al 6 % de filler.

4.1.6 Porcentaje de vacíos % vs % filler

Gráfico 4.6: Porcentaje de vacíos vs % filler



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se puede observar que el porcentaje de vacíos empieza a disminuir a mayor porcentaje de filler esto se debe a que el filler al ser un material fino va a ocupar los espacios vacíos de la mezcla asfáltica, haciéndola menos permeable. También se observa que los vacíos del talco industrial son mucho menores que los vacíos del filler convencional esto sucede ya que el talco industrial es sumamente fino a comparación del filler convencional. El porcentaje de vacíos varía un 0.18 % al 1 % de filler y un 0.71 % al 6 % de filler.

4.2 Organización de resultados

Se organiza valores de lo procesado en el capítulo anterior

Tabla 4.1: Resultado del contenido óptimo de filler talco industrial.

Ensayo	% de filler	Valor de Diseño	Especificación
Densidad [g/cm ³]	4.12%	2.367	
Estabilidad Marshall [lb]		4690.32	>1800
Vacíos de la mezcla [%]		3.45	3-5
Fluencia [pulg]		15.68	8-16
R.B.V. [%]		77.04	75-82
V.A.M. [%]		15.03	>13

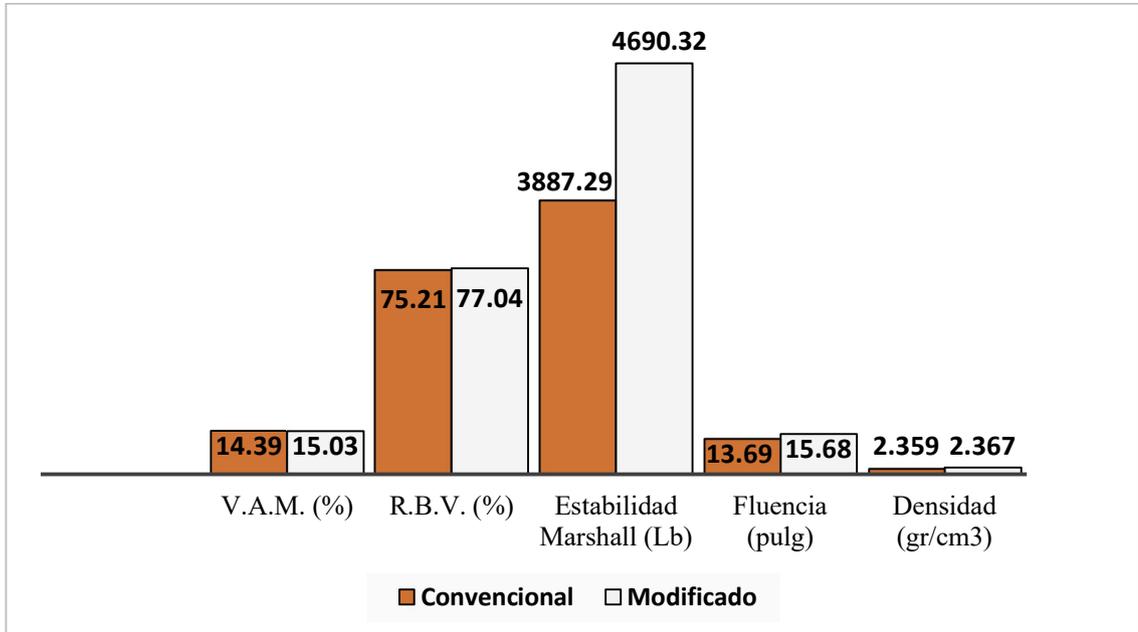
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2: Resultado del contenido óptimo de filler convencional.

Ensayo	% de filler	Valor de Diseño	Especificación
Densidad [g/cm ³]	4.58%	2.359	
Estabilidad Marshall [lb]		3887.29	>1800
Vacíos de la mezcla [%]		3.79	3-5
Fluencia [pulg]		13.69	8-16
R.B.V. [%]		75.21	75-82
V.A.M. [%]		14.39	>13

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.7: Propiedades de las mezclas asfálticas: filler optimo convencional vs filler optimo talco industrial.



Fuente: Elaboración propia.

Para el filler convencional de grafica se eligió el porcentaje de 4.58% ya que este cumple con las especificaciones establecidas en la norma, de la misma manera para el filler modificado se elegio un 4.12%.

Haciendo una comparación de las propiedades se puede observar que existe poca variación en las propiedades de V.A.M., R.B.V., fluencia y densidad, pero se puede ver una gran diferencia en la propiedad de la estabilidad.

Se procedió a realizar el ensayo de estabilidad y fluencia para poder comprobar que, si mejora dicha propiedad, para poder verificar se realizaron 30 ensayos de estabilidad y fluencia, de esta manera poder realizar un análisis de estadística inferencial, donde se analizara la hipótesis planteada en la investigación y ver si es verdadera o falsa.

Tabla 4.3: Resultados del ensayo de estabilidad con un porcentaje de 4.12% de filler talco industrial.

N° de muestra	Estabilidad [libras]
1	3732.94
2	3798.48
3	3967.44
4	4051.85
5	4095.38
6	4115.18
7	4148.87
8	4223.12
9	4231.28
10	4274.16
11	4296.82
12	4351.43
13	4353.22
14	4357.45
15	4517.32
16	4555.97
17	4577.47
18	4743.86
19	4755.16
20	4780.53
21	4796.74
22	4885.28
23	4897.23
24	4911.20
25	4963.84
26	5022.11
27	5088.84
28	5163.25
29	5332.16
30	5418.06

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4: Resultados del ensayo de fluencia con un porcentaje de 4.12% de filler talco industrial.

N° de muestra	Fluencia [0.01 pulgadas]
1	10
2	12
3	12
4	13
5	13
6	13
7	13
8	13
9	13
10	14
11	14
12	14
13	14
14	14
15	14
16	14
17	14
18	14
19	14
20	14
21	15
22	15
23	15
24	15
25	15
26	15
27	15
28	15
29	16
30	16

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Estadística descriptiva del ensayo de estabilidad

Datos de los ensayos de estabilidad al 4.12% de filler talco industrial.

1. Ordenar los datos de menor a mayor.

Tabla 4.5: Datos del ensayo de estabilidad al 4.12% de filler talco industrial

3732.94	3798.48	3967.44	4051.85	4095.38
4115.18	4148.87	4223.12	4231.28	4274.16
4296.82	4351.43	4353.22	4357.45	4517.32
4555.97	4577.47	4743.86	4755.16	4780.53
4796.74	4885.28	4897.23	4911.20	4963.84
5022.11	5088.84	5163.25	5332.16	5418.06

Fuente: Elaboración propia.

2. Obtención del rango.

$$N = 30$$

$$X_{\text{Max}} = 5418.06$$

$$X_{\text{Min}} = 3732.94$$

$$\text{Rango} = 1685.12$$

3. Intervalos, cálculo de numero de intervalos de clase según Sturges.

$$N^{\circ} \text{ clase} = 6$$

4. Amplitud de cada intervalo.

$$\text{Amplitud} = 208.85$$

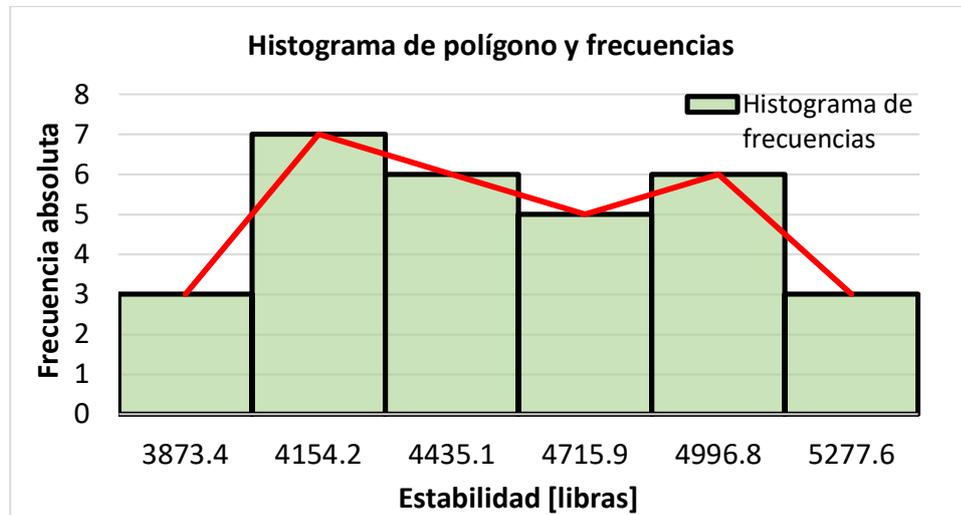
5. Cálculo de los intervalos de clase, marca de clase, frecuencia absoluta y relativa.

Tabla 4.6: Cálculo de frecuencia absoluta y relativa.

Límite Inferior	Limite Superior	Marca de clase [libras]	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
3732.94	4013.79	3873.37	3	3	10.00	10.00
4013.79	4294.65	4154.22	7	10	23.33	33.33
4294.65	4575.50	4435.07	6	16	20.00	53.33
4575.50	4856.35	4715.93	5	21	16.67	70.00
4856.35	5137.21	4996.78	6	27	20.00	90.00
5137.21	5418.06	5277.63	3	30	10.00	100.00
			30	100		

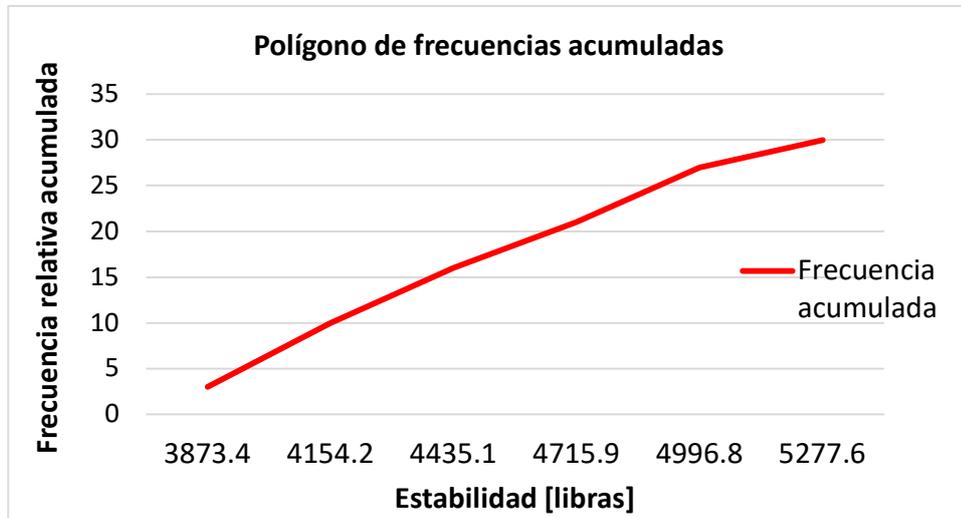
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.8: Determinación del histograma y polígono de frecuencias.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.9: Determinación de la curva de frecuencia acumulada.



Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de medias de tendencia central

Tabla 4.7: Resultados de cálculos de medias de tendencia central de los ensayos de estabilidad al 4.12% de filler talco industrial.

Medida de tendencia	Resultado	Unidad
Media	4546.89	libras
Error típico	81.83	
Mediana	4536.64	libras
Desviación estándar	448.18	
Varianza de la muestra	200862.01	
Curtosis	-0.83	
Coficiente de asimetría	0.11	
Rango	1685.12	libras
Mínimo	3732.94	libras
Máximo	5418.06	libras
Suma	136406.65	libras
Cuenta	30.00	
Nivel de confianza (95.0 %)	167.35	

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Estadística inferencial

Tabla 4.8: Cálculo de error medido de la media.

Error medido de la media	e=	95%
Para Nivel de confianza = 95%	Z=	1.96
Error típico	Ex=	81.83
Error probable	Ep=	167.35

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.9: Cálculo del rango de confianza.

Rango de confianza	Va= X± Ep
Va=	4714.24
Va=	4379.54

Fuente: Elaboración propia.

Intervalo de confianza: 4714.24 libras - 4379.54 libras

Asociación de hipótesis de investigación:

Hipótesis de investigación causal/explicativa:

“La mezcla asfáltica elaborada con talco industrial **mejora** la resistencia Marshall frente a una mezcla asfáltica convencional”.

Hipótesis alternativa → **H₁: $\bar{x} > u$**

De inmediato se activa la hipótesis nula que indica lo contrario:

Hipótesis nula → **H₀: $\bar{x} \leq u$**

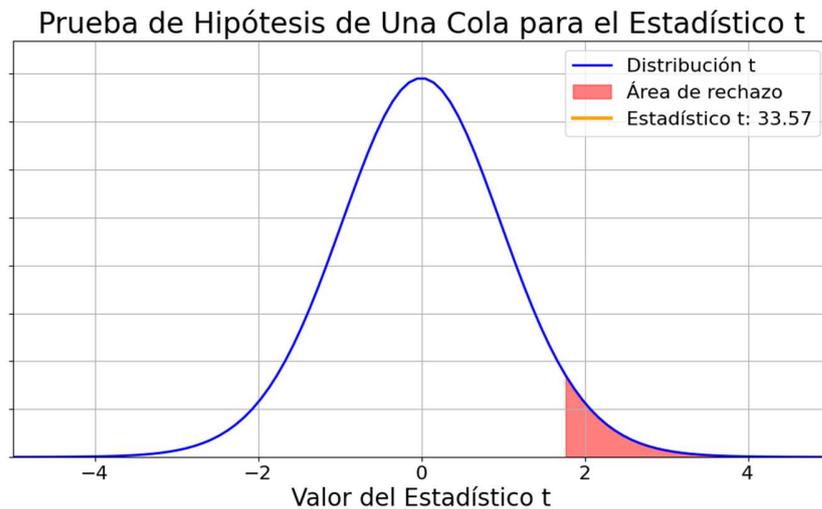
Su interpretación es: “La mezcla asfáltica elaborada con talco industrial **desmejora** la resistencia Marshall frente a una mezcla asfáltica convencional”.

Tabla 4.10: Prueba de hipótesis por el método T de Student.

Prueba de hipótesis			
1^{ra} Hipótesis $H_0: \bar{x} \leq 1800$ libras			
2^{da} Hipótesis $H_1: \bar{x} > 1800$ libras			
Significancia	$\alpha =$	0.05	
Media muestral	$\bar{x} =$	4546.89	libras
Numero de datos	$n =$	30	
Desviación estándar	$s =$	448.18	
Media muestral	$\mu =$	1800	libras
Grado de libertad	$GL =$	29	
t teórico	$t_{\alpha} =$	1.6991	
T experimental	$t_{exp} =$	33.5698	
P – valor	$=$	4.6064E-25	
P – valor < 0.05 Se rechaza la hipótesis nula			

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1: Área de rechazo de la hipótesis.



Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el valor (p-valor) para esta prueba es menor a la significancia (0.05), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que la cantidad óptima de talco industrial mejora la estabilidad (resistencia a la deformación) de la mezcla asfáltica.

H₀ : La hipótesis nula se rechaza

H₁ : La hipótesis alternativa se acepta

4.5 Estadística descriptiva del ensayo de fluencia

Datos de los ensayos de fluencia al 4.12% de filler talco industrial.

1. Ordenar los datos de menor a mayor.

Tabla 4.11: Datos del ensayo de estabilidad al 4.12% de filler talco industrial.

10.00	12.00	12.00	13.00	13.00
13.00	13.00	13.00	13.00	14.00
14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
15.00	15.00	15.00	16.00	16.00

Fuente: Elaboración propia.

2. Obtención del rango.

$$N = 30$$

$$X_{\text{Max}} = 16.00$$

$$X_{\text{Min}} = 10.00$$

$$\text{Rango} = 6$$

3. Intervalos, cálculo de número de intervalos de clase según Sturges.

$$N^{\circ} \text{ clase} = 6$$

4. Amplitud de cada intervalo.

$$\text{Amplitud} = 1$$

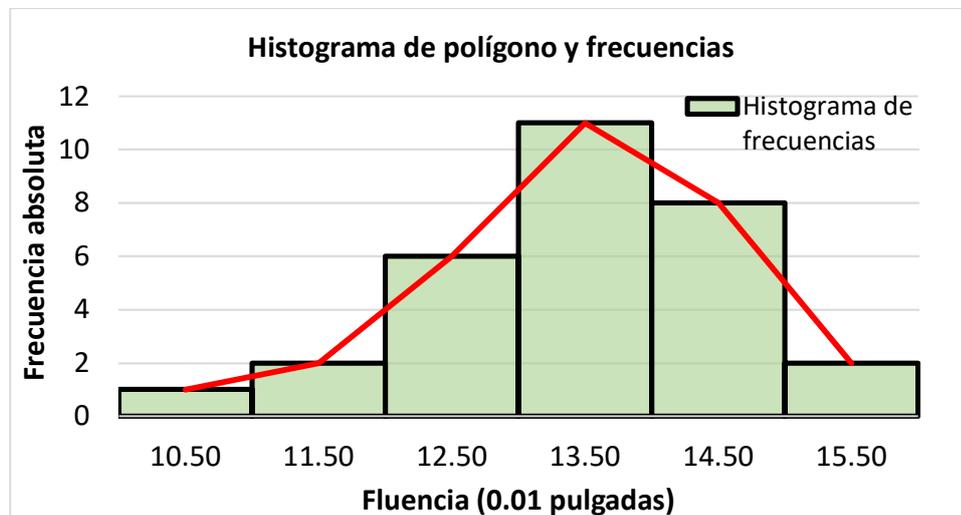
5. Cálculo de los intervalos de clase, marca de clase, frecuencia absoluta y relativa.

Tabla 4.12: Cálculo de frecuencia absoluta y relativa.

Límite Inferior	Límite Superior	Marca de clase [0.01 pulg.]	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
10.00	11.00	10.50	1	3.33	1	3.33
11.00	12.00	11.50	2	6.67	3	10.00
12.00	13.00	12.50	6	20.00	9	30.00
13.00	14.00	13.50	11	36.67	20	66.67
14.00	15.00	14.50	8	26.67	28	93.33
15.00	16.00	15.50	2	6.67	30	100.00
			30	100		

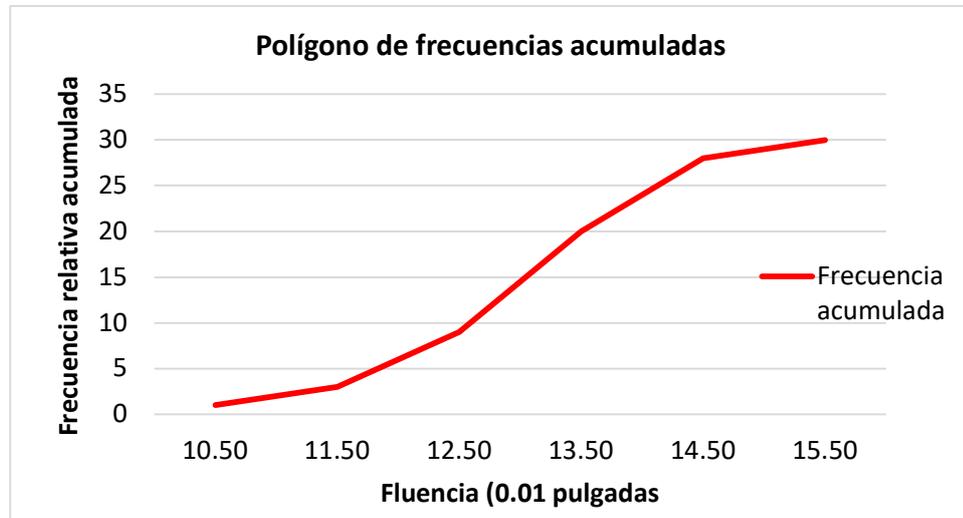
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.10: Determinación del histograma y polígono de frecuencias.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.11: Determinación de la curva de frecuencia acumulada.



Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de medias de tendencia central

Tabla 4.13: Resultados de cálculos de medias de tendencia central de los ensayos de estabilidad al 4.12% de filler talco industrial.

Medida de tendencia	Resultado	Unidad
Media	13.93	0.01 pulg.
Error típico	0.23	
Mediana	14.00	0.01 pulg.
Moda	14.00	0.01 pulg.
Desviación estándar	1.26	
Varianza de la muestra	1.58	
Curtosis	2.07	
Coefficiente de asimetría	-0.98	
Rango	6	0.01 pulg.
Mínimo	10.00	0.01 pulg.
Máximo	16.00	0.01 pulg.
Suma	418	0.01 pulg.
Cuenta	30.00	
Nivel de confianza (95.0%)	0.47	

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Estadística inferencial

Tabla 4.14: Cálculo de error medido de la media.

Error medido de la media	e=	95%
Para Nivel de confianza = 95%	Z=	1.96
Error típico	Ex=	0.23
Error probable	Ep=	0.47

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.15: Cálculo del rango de confianza.

Rango de confianza	Va= X± Ep
Va=	13.46
Va=	14.40

Fuente: Elaboración propia.

Intervalo de confianza: 13.46 (0.01 pulg) - 14.40 (0.01 pulg).

Asociación de hipótesis de investigación:

Hipótesis de investigación causal/explicativa:

“La mezcla asfáltica elaborada con talco industrial **mejora** la resistencia Marshall frente a una mezcla asfáltica convencional”.

Hipótesis alternativa → $H_1: \bar{x} > u$

De inmediato se activa la hipótesis nula que indica lo contrario:

Hipótesis nula → $H_0: \bar{x} \leq u$

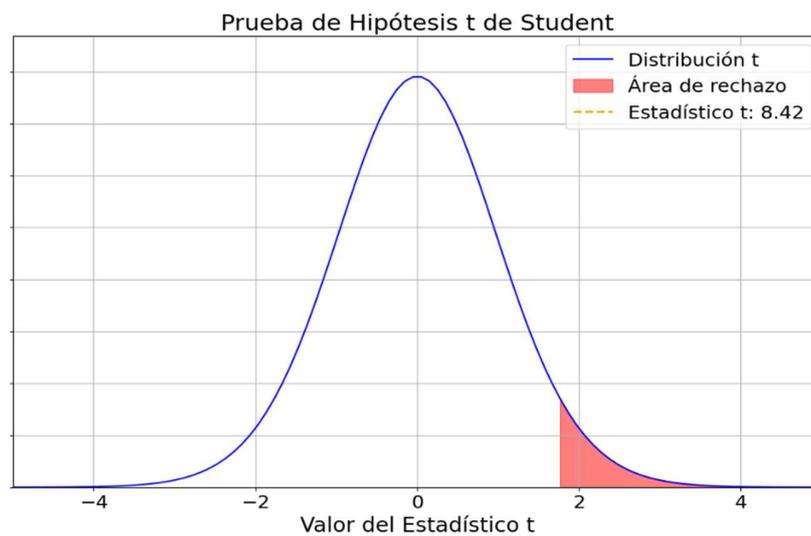
Su interpretación es: “La mezcla asfáltica elaborada con talco industrial **desmejora** la resistencia Marshall frente a una mezcla asfáltica convencional”.

Tabla 4.16: Prueba de hipótesis por el método T de Student.

Prueba de hipótesis			
1^{ra} Hipótesis $H_0: \bar{x} \leq 12$ libras			
2^{da} Hipótesis $H_1: \bar{x} > 12$ libras			
Significancia	$\alpha =$	0.05	
Media muestral	$\bar{x} =$	13.93	libras
Numero de datos	$n =$	30	
Desviación estándar	$s =$	1.26	
Media muestral	$\mu =$	12	libras
Grado de libertad	$GL =$	29	
t teórico	$t_{\alpha} =$	1.6991	
T experimental	$t_{exp} =$	8.42	
P – valor	$=$	1.40E-09	
P – valor < 0.05 Se rechaza la hipótesis nula			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2: Área de rechazo de la hipótesis



Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el valor (p-valor) para esta prueba es menor a la significancia (0.05), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que la cantidad optima de talco industrial mejora la fluencia (resistencia a la deformación) de la mezcla asfáltica.

H₀ : La hipótesis nula se rechaza

H₁ : La hipótesis alternativa se acepta

4.7 Especificación técnica

4.7.1 Concepto de objeto de investigación

La mezcla asfáltica elaborada con talco industrial mejora la resistencia Marshall frente a una mezcla asfáltica convencional.

En la hipótesis planteada en el trabajo de investigación, se realizó los respectivos ensayos y parámetros estadísticos para demostrar que nuestra hipótesis es verdadera.

4.7.2 Materiales y equipo

4.7.2.1 Materiales utilizados en la investigación

- Agregado grueso y fino

Tanto la grava, gravilla y arena es de procedencia de la chancadora Garzón que extrae áridos del río Sella, este material se solicitó a la alcaldía municipal de Tarija.

- Cemento asfáltico 85-100

El cemento asfáltico es de procedencia colombiana de la marca MULTINSA que se lo solicito a la alcaldía municipal de Tarija.

-Talco industrial

El talco industrial se lo obtuvo de FIBRA CENTER MORENO que se encuentra en la ciudad de Santa Cruz, el cual es una distribuidora de este material que procede de la ciudad de La Paz.

4.7.2.2 Equipo utilizado para la investigación

- Molde Marshall

El molde Marshall es una estructura cilíndrica donde se compactan las mezclas asfálticas durante las pruebas. Está diseñado para formar briquetas que se utilizarán para evaluar la estabilidad y la fluidez de las mezclas. Generalmente está hecho de acero y tiene un diámetro y altura estándar (usualmente 101.6 mm de diámetro y 150 mm de altura). El molde puede incluir una base y un sistema para facilitar la extracción de la biqueta después de la compactación.

- Compactador automático Marshall

El compactador Marshall utiliza un peso específico que se deja caer desde una altura determinada sobre un molde que contiene la mezcla asfáltica. Este proceso simula las condiciones de carga que experimentarán las mezclas en la práctica.

- Prensa Marshall y dial de flujo

Este equipo se emplea para evaluar principalmente la resistencia mecánica de las briquetas, la prensa aplica una carga controlada hasta que la muestra se rompe, y se registra la carga máxima soportada, el dial de flujo se utiliza para registrar la cantidad de desplazamiento o deformación que ocurre cuando se aplica esta carga.

- Balanza hidrostática

La balanza se basa en el principio de que un cuerpo sumergido en un fluido experimenta una pérdida de peso igual al peso del fluido desplazado. Esto permite calcular la densidad del objeto. Consiste en un recipiente que contiene el líquido, un gancho para suspender el objeto y un sistema de medición que es de una escala.

- Balanza

La balanza se la uso determinar el peso de las briquetas en seco y saturado superficialmente seco.

- Vernier digital

Se lo uso para medir con precisión la altura de la briqueta de ensayo.

- Termómetro 360°

El termómetro se lo uso para determinar la temperatura de la mezcla asfáltica este dentro de los 160 a 180° C.

4.7.3 Procedimiento y rango de medición

Se realizo la modificación de mezcla asfáltica adicionando el porcentaje de talco industrial el cual se debe mezclar con el agregado grueso y fino (en estado seco) para obtener una mezcla homogénea, se calentó el cemento asfáltico y se procedió a vaciar en una bandeja para mezclarlo con los agregados.

Mezclar hasta que la temperatura de la mezcla asfáltica ronde los 160 a 180 °C ya que es una temperatura adecuada que permite que el cemento asfáltico se distribuya uniformemente a través de la mezcla asegurando que todos los componentes se integren correctamente.

El porcentaje óptimo de talco industrial que mejora la resistencia de una mezcla asfáltica es de 3%, se plantearon seis porcentajes (1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%), se optó por el 4.12% en el cual la estabilidad mejora y no afecta en gran manera las demás propiedades, se optó por un equilibrio donde se evidencie mejoras en las propiedades de la mezcla y estén dentro del rango establecido según norma.

La mezcla asfáltica está pensada para zonas que tengan gran volumen de tráfico y clima cálido.

4.7.4 Medición de la variable

La variable de la presente investigación vendría a ser la adición del talco industrial mejora la resistencia de la mezcla asfáltica, se realizó mediante el ensayo Marshall en el cual se analizó las propiedades de la estabilidad y la fluencia ya que miden la resistencia a la carga máxima que pueda soportar una briqueta y la resistencia a desplazamientos y deformaciones al soportar dicha carga.

En esta investigación se pudo determinar que el 3% de talco industrial como filler es la cantidad optima que mejora la resistencia de una mezcla asfáltica, para tener intervalos de medición confiable se realizó 30 ensayos de estabilidad y fluencia, se realizó un cálculo estadístico inferencial para determinar los rangos de confianza de una mezcla asfáltica con filler talco industrial.

4.7.5 Forma de cubicación

Lo que se propone para medir es en kilogramos ya que el talco industrial se vende en bolsas de 25 kilogramos.

4.7.6 Costo de aplicación

Es fundamental considerar que el costo de producción es uno de los indicadores clave en los proyectos de ingeniería. Así, a mayor eficiencia en su ejecución, se requerirán menos recursos, lo que resultará en una reducción de los gastos. El costo de producción debe evaluarse en función del uso óptimo de los recursos materiales, laborales y financieros durante el proceso de desarrollo.

Para el análisis de precio unitario se lo realizara para 1 m³ de carpeta asfáltica con un espesor de 7 cm.

Tabla 4.17: Análisis de precios unitarios de una carpeta asfáltica modificada.

Descripción	Unidad	Rendimiento	Precio [bs]	Costo [bs]
1. Materiales				
Grava de gradación 3/8"	m ³	0.21	195.00	40.15
Arena	m ³	0.32	210.00	67.12
Cemento asfáltico 85-100	kg	122.5	11.00	1,347.01
Grava de gradación 3/4"	m ³	0.31	190.00	59.34
Diesel	l	5.64	3.72	20.99
Emulsión para imprimación	l	5.25	9.67	50.77
Filler talco industrial	kg	95.79	5.00	478.95
Total materiales				2,064.33
2. Mano de obra				
Operador de planta asfáltica	hr	0.06	41.83	2.39
Ayudante de planta asfáltica	hr	0.04	23.87	1.02
Personal de limpieza	hr	0.59	16.06	9.52
Peón	hr	0.64	16.06	10.33
Operador de terminadora de asfalto	hr	0.11	26.96	3.08
Operador de rodillo neumático	hr	0.11	25.00	2.86
Operador de rodillo liso	hr	0.11	25.00	2.86
Maestro de asfaltos	hr	0.06	43.75	2.50
Operador de equipo	hr	0.11	25.00	2.86
Ayudante de operador	hr	0.11	20.00	2.29
Sub total mano de obra				39.70
Cargas sociales 55 %				21.84
IVA 14.94% (del sub total de mano de obra + cargas sociales)				
Total mano de obra				61.54
3. Equipo maquinaria y herramientas				
				782.86
Planta asfáltica	hr	0.11	3,800	434.29
Distribuidor de asfalto	hr	0.01	400	5.71
Terminadora de asfalto	hr	0.11	1,500	171.43
Rodillo neumático	hr	0.11	350	40.00
Cargador frontal	hr	0.11	350	40.00
Volqueta	hr	0.34	150	51.43
Rodillo liso	hr	0.11	350	40.00
Herramientas menores 5 %				3.077
Total equipo, maquinaria y herramientas				785.93
4. Gastos generales y administrativos				
Gastos generales 10% (1+2+3)				
Total gastos generales y administrativos				0.00
5. Utilidad				
Utilidad 10% (1+2+3+4)				
Total utilidad				0.00
6. Impuestos				
Impuestos I.T. 3.09(1+2+3+4+5)				
Total impuestos				0.00
Total precio unitario				2,911.80

Fuente: Elaboración propia.

El costo de una carpeta asfáltica modificada con filler talco industrial es de 2911.80 bs , dando el precio unitario por kilo de 5 bs.

4.6 Análisis de precios unitarios de una carpeta asfáltica convencional

Para el análisis de precio unitario se lo realizara para 1 m³ de carpeta asfáltica con un espesor de 7 cm.

Tabla 4.18: Análisis de precios unitarios de una carpeta asfáltica convencional.

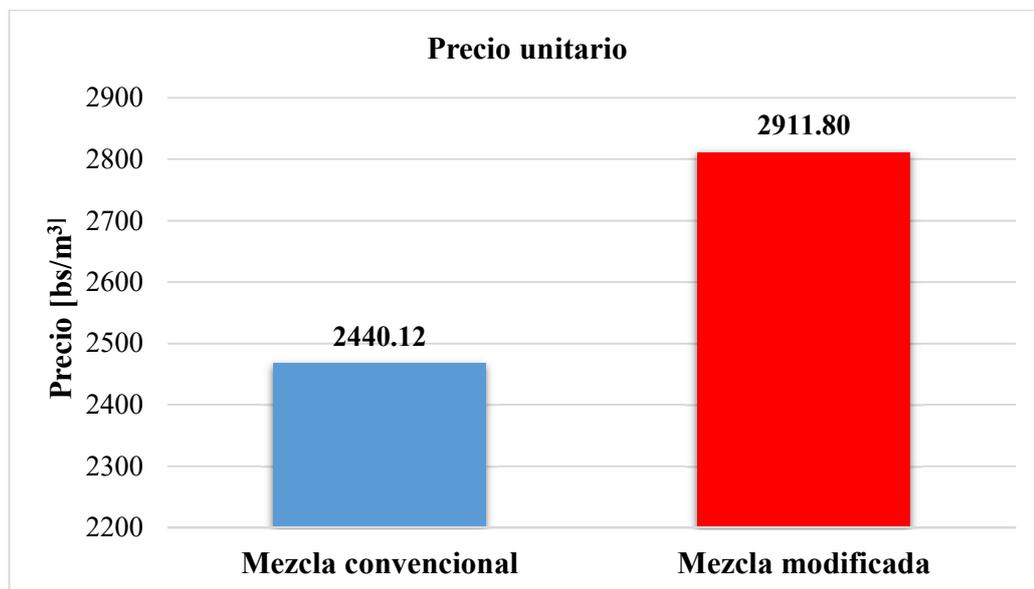
Descripción	Unidad	Rendimiento	Precio [bs]	Costo [bs]
1. Materiales				
Grava de gradación 3/8"	m ³	0.21	195.00	40.15
Arena	m ³	0.32	210.00	66.26
Cemento asfáltico 85-100	kg	124.95	11.00	1,347.01
Grava de gradación 3/4"	m ³	0.31	190.00	59.34
Diesel	l	5.64	3.72	20.99
Emulsión para imprimación	l	5.25	9.67	50.77
Filler convencional	m ³	0.039	210.00	8.13
Total materiales				1,592.65
2. Mano de obra				
Operador de planta asfáltica	hr	0.06	41.83	2.39
Ayudante de planta asfáltica	hr	0.04	23.87	1.02
Personal de limpieza	hr	0.59	16.06	9.52
Peón	hr	0.64	16.06	10.33
Operador de terminadora de asfalto	hr	0.11	26.96	3.08
Operador de rodillo neumático	hr	0.11	25.00	2.86
Operador de rodillo liso	hr	0.11	25.00	2.86
Maestro de asfaltos	hr	0.06	43.75	2.50
Operador de equipo	hr	0.11	25.00	2.86
Ayudante de operador	hr	0.11	20.00	2.29
Sub total mano de obra				39.70
Cargas sociales 55 %				21.84
IVA 14.94% (del sub total de mano de obra + cargas sociales)				
Total mano de obra				61.54
3. Equipo maquinaria y herramientas				
Total equipo, maquinaria y herramientas				785.93
4. Gastos generales y administrativos				
Gastos generales 10% (1+2+3)				

Total gastos generales y administrativos		0.00
5. Utilidad		
Utilidad 10% (1+2+3+4)		
Total utilidad		0.00
6. Impuestos		
Impuestos I.T. 3.09(1+2+3+4+5)		
Total impuestos		0.00
Total precio unitario		2,440.12

Fuente: Elaboración propia.

4.7 Comparación de precios unitarios entre una carpeta asfáltica modificada y una convencional.

Gráfico 4.12: Comparación de precio de carpeta asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

Aunque técnicamente el filler talco industrial mejora la resistencia de una mezcla asfáltica considerablemente, económicamente como se observa en la gráfica hay una diferencia de 471.68 bs en la cual la mezcla asfáltica convencional es más económica que la mezcla asfáltica modificada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

De acuerdo a la investigación realizada se llegó a las siguientes conclusiones:

- El objetivo general propuesto en la investigación se cumple ya que se logró mejorar la resistencia de una mezcla asfáltica con la adición de talco industrial como filler, se logró mejorar la propiedad de la estabilidad al realizar diferentes porcentajes (1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%), en el cual establecer un porcentaje óptimo el cual fue del 3%, dicho porcentaje mejora significativamente esta propiedad.
- Los objetivos específicos planteados se cumplieron a cabalidad, se recopiló información de mezclas asfálticas modificadas con diferentes materiales el cual fueron usados como filler, el cual sirvió de respaldo de la investigación planteada.
- Se realizó la caracterización de los agregados y del objeto de investigación talco industrial, en el cual se obtuvieron datos como granulometría de los agregados, peso específico, porcentaje de absorción del agregado con el cual se realizó el cálculo correspondiente para determinar una dosificación y el contenido mínimo de cemento asfáltico.
- Con el contenido mínimo de cemento asfáltico se elaboraron 18 briquetas variando el porcentaje de cemento asfáltico del cual se obtuvieron gráficas y se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico para un 4% de vacíos.
- Se elaboró briquetas variando el porcentaje de filler convencional (1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%), para ver su comportamiento de la mezcla.
- Al igual que el filler convencional se realizó el mismo procedimiento con el talco industrial, del cual mediante gráficas se comparó el comportamiento tanto del filler convencional como el talco industrial en una mezcla asfáltica.

- La incorporación de filler talco industrial en mezclas asfálticas ha demostrado ser efectiva para mejorar la resistencia de la mezcla asfáltica. Sin embargo, el análisis económico revela que la mezcla asfáltica convencional es más rentable, con una diferencia de 471.68 bs.

5.2 Recomendaciones

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

- Se recomienda consultar la guía técnica realizada en la investigación en la cual se presentan los resultados obtenidos de la adición del talco industrial en una mezcla asfáltica.
- Se recomienda mezclar bien los agregados para tener una mezcla homogénea para asegurar una distribución uniforme de cargas, una mejor adherencia entre el cemento asfáltico y los agregados, y también tienden a resistir mejor las condiciones ambientales adversas, como cambios de temperatura y humedad, lo que reduce el agrietamiento y el desgaste.
- Es muy importante respetar las especificaciones técnicas de los ensayos, sobre todo en las temperaturas de realización de las pruebas ya que si se tiene una variación de la misma los resultados nos dará un dato erróneo.
- No se debe sobrecalentar la muestra del cemento asfáltico demasiado tiempo ya que se alteran sus propiedades físicas y químicas, esto puede resultar en una disminución de la viscosidad del cemento asfáltico, lo que afecta la capacidad de mezcla para adherirse y mantener su cohesión.
- Se recomienda usar un termómetro de 360 °C al momento de realizar la elaboración de briquetas.
- Al momento de romper las briquetas en el equipo Marshall siempre estar atento y concentrado a las lecturas del dial de flujo y estabilidad para obtener datos más precisos.
- Se recomienda realizar 3 veces el ensayo al momento de la caracterización de los materiales para así obtener resultados más confiables y representativos.

