CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En la construcción de pavimentos flexibles, las mezclas asfálticas juegan un papel crucial al proporcionar una superficie resistente y duradera para carreteras y caminos. Estas mezclas se componen de agregados granulares, asfalto y fillers, que mejoran las propiedades mecánicas y la estabilidad del pavimento. El uso de fillers es fundamental para optimizar la mezcla, y el carbonato de magnesio se presenta como una alternativa innovadora a los fillers tradicionales.

El carbonato de magnesio es un mineral fino que pasa el tamiz N°200 (75 micras), lo que lo convierte en un candidato adecuado para su uso en mezclas asfálticas. Al incorporar carbonato de magnesio, se espera mejorar la estabilidad de la mezcla, reducir el contenido de asfalto necesario y aumentar la durabilidad del pavimento. Además, la utilización de este filler puede mitigar el impacto ambiental asociado con la extracción de materiales naturales no renovables en Bolivia posee diversas fuentes de carbonato de magnesio, principalmente localizadas en el Salar de Uyuni, y las regiones de Oruro, Potosí y La Paz, donde se extraen depósitos de magnesita.

Este mineral es esencial para aplicaciones industriales, incluyendo la construcción y productos químicos, también como filler y así verificar si existe alguna mejora en las propiedades mecánicas de mezcla asfáltica. 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 cual se hará una comparación con un filler natural.

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 magnesio, 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 Comparación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas durabilidad de los pavimentos.

La investigación se basa en un trabajo realizado en Bolivia “"Comparación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas convencionales calientes con otras con adición de cemento Portland y cal hidratada como reemplazo del filler"”, en el cual su objetivo principal es evaluar los cambios que experimentan las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente, utilizando como filler cemento Portland y cal hidratada, de tal manera se pueda verificar la influencia en las propiedades mecánicas de mezcla asfáltica, en dicha investigación se concluyó que la adición de cemento Portland como filler mejora la estabilidad de la mezcla asfáltica, mientras que la adición de cal hidratada no mejora esta propiedad.

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 sus efectos 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 proporcionar un aporte significativo al conocimiento sobre la incorporación del carbonato de magnesio como filler en mezclas asfálticas, buscando optimizar sus propiedades y desempeño. Esta investigación servirá como herramienta útil para profesionales, empresas e instituciones dedicadas al diseño y construcción de infraestructuras viales dentro del ámbito de la ingeniería civil que se dedican al diseño y construcción vial de carreteras.

1.3.3 Justificación e importancia social

El objetivo de este trabajo es desarrollar una mezcla asfáltica más resistente y duradera en comparación con las mezclas convencionales. Este objetivo se alcanzará determinando el porcentaje adecuado de carbonato de magnesio que optimice las propiedades de la mezcla asfáltica.

En el contexto social, el principal beneficio de este proyecto será la mejora de la infraestructura vial, proporcionando carreteras más seguras, con mayor durabilidad y menores necesidades de mantenimiento. Esto tendrá un impacto positivo en el desarrollo económico del país, facilitando un transporte más eficiente y reduciendo los costos a largo plazo.

1.4 Planteamiento del problema

1.4.1 Situación problémica

El carbonato de magnesio, compuesto por magnesio, carbono y oxígeno, es un material que presenta una estructura cristalina variable y, generalmente, se encuentra en forma de polvo fino. En este análisis es explorar su potencial como filler en mezclas asfálticas para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, un componente esencial en la construcción de carreteras de alta calidad y durabilidad.

La incorporación de este material en las mezclas asfálticas puede influir positivamente en aspectos cruciales de la mezcla: puede aumentar la cohesión interna, disminuir la deformación permanente y mejorar la trabajabilidad durante su aplicación, aspectos que en conjunto contribuyen a un pavimento más resistente y confiable frente a las exigencias del tránsito y las condiciones ambientales.

Este análisis servirá como referencia para comprender cómo el uso de carbonato de magnesio puede transformar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

A través de esta investigación, se busca generar información útil para futuros proyectos que quieran incorporar este filler en el asfalto, permitiendo optimizar sus características y ofreciendo una alternativa viable en el diseño de pavimentación.

1.4.2 Delimitación del espacio

- Área temática: Mezclas asfálticas.

La investigación se enmarca en el estudio del uso de filler en mezclas asfálticas, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas, en particular la estabilidad Marshall.

-Base de operaciones: Laboratorio de Asfaltos, Laboratorio de Hormigones y Resistencia de Materiales y Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

La investigación se desarrollará en los laboratorios especializados de la UAJMS, principalmente en el Laboratorio de Asfaltos y en el de Hormigones y Resistencia de Materiales, donde se podrán realizar ensayos de estabilidad Marshall y pruebas de resistencia de las mezclas asfálticas. Además, el Laboratorio de Suelos será esencial para realizar el análisis granulométrico de los agregados que se emplearán en la mezcla, lo que permitirá evaluar cómo el carbonato de magnesio como filler interactúa con los componentes de la mezcla asfáltica. Estos laboratorios están equipados con la tecnología necesaria para realizar ensayos detallados, asegurando un entorno adecuado para obtener resultados precisos y fiables.

-Aplicación: Carreteras

El objetivo de la investigación es optimizar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción y mantenimiento de carreteras, con el fin de mejorar su estabilidad y durabilidad mediante la incorporación del carbonato de magnesio como filler.

1.4.3 Formulación del problema

¿Cuál es el efecto del carbonato de magnesio en la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica en caliente?

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo General

Analizar el efecto del carbonato de magnesio utilizado como material filler en mezclas asfálticas en caliente, para determinar su estabilidad de la mezcla mediante el método Marshall.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información técnica sobre mezclas asfálticas modificadas con carbonato de magnesio como filler.
- Realizar la caracterización del carbonato de magnesio y de los agregados.
- Determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica convencional.
- Elaborar briquetas con distintos porcentajes de carbonato de magnesio como filler.
- Determinar la estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica convencional.
- Analizar la estabilidad alcanzada por la mezcla asfáltica con carbonato de magnesio en diferentes porcentajes.

1.6 Hipótesis

"La adición de carbonato de magnesio como material filler en mezclas asfálticas en caliente mejora la estabilidad de la mezcla."

- Variable independiente: Adición del carbonato de magnesio.
- Variable dependiente: Estabilidad de la mezcla.

1.7 Conceptualización y operacionalización de variables

Adición del carbonato de magnesio: Es un mineral que se usara como filler en una mezcla asfáltica para mejorar su estabilidad**.** 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.

Estabilidad de la mezcla: 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 1.1: Operacionalización de variables.

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

Variable dependiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Estabilidad de la mezcla	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 esta investigación engloba conceptos básicos y parámetros de análisis, recopilados de bibliografía especializada y normas técnicas (AASHTO - ASTM).

Los ensayos realizados están orientados de manera objetiva a analizar y evaluar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica modificada con carbonato de magnesio como filler, en comparación con una mezcla convencional.

Para ello se realizó un estudio de los parámetros de diseño que intervienen en las mezclas asfálticas, adoptando el método Marshall; así mismo, se analizaron en laboratorio los materiales que componen la mezcla (agregados, cemento asfáltico y

filler) para verificar que cumplan con los requisitos establecidos por norma, y posteriormente elaborar briquetas con diferentes porcentajes de carbonato de magnesio, determinando su contenido óptimo.

Una vez obtenidas las briquetas, se procedió a medir sus propiedades mecánicas (estabilidad, fluencia, densidad, vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos de asfalto), para analizarlas y dar validez a los resultados mediante comparación con la mezcla convencional.

Para concluir el trabajo se establecieron conclusiones de acuerdo con los objetivos planteados y recomendaciones en base a la experiencia adquirida durante los ensayos de laboratorio.

La realización del siguiente trabajo de investigación se plantea como:

Experimental; puesto que se realizan netamente ensayos de laboratorio para caracterizar y lograr valorar el efecto que tendrá el carbonato de magnesio como filler en una mezcla asfáltica.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1 Marco conceptual

Se define como pavimento al conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben en forma directa las cargas de tránsito y las transmiten a las capas inferiores, distribuyéndolas con uniformidad. Este conjunto de capas proporciona también la superficie de rodamiento, en donde se debe tener una operación rápida y cómoda.

De acuerdo con las teorías de esfuerzos y las medidas de campo que se realizan, los materiales con que se construyen los pavimentos deben tener la calidad suficiente para resistir. Por lo mismo, las capas localizadas a mayor profundidad pueden ser de menor calidad, en relación con el nivel de esfuerzos que recibirán, aunque el pavimento también transmite los esfuerzos a las capas inferiores y los distribuye de manera conveniente, con el fin de que éstas los resistan. (Bustamante Olivera, 2004)

Tipos de pavimentos

Existen dos tipos principales de pavimento:

- Pavimentos flexibles.
- Pavimentos rígidos.

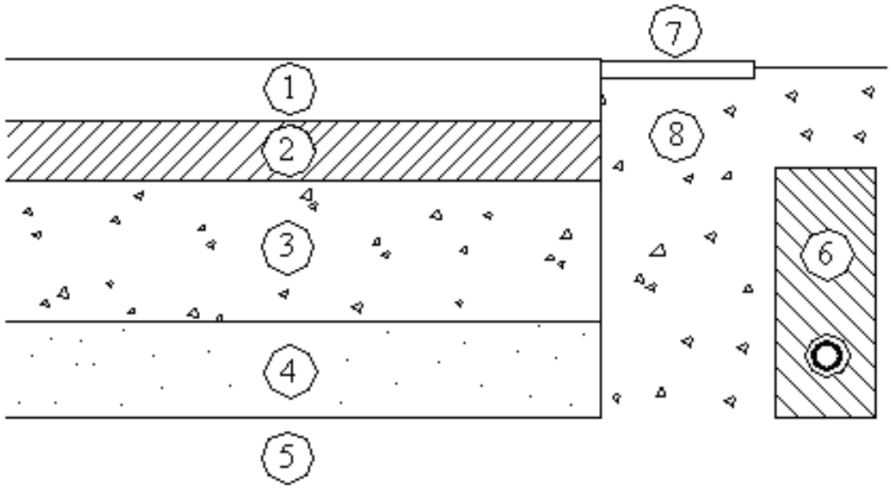
2.1.2 Pavimentos flexibles

Una carpeta asfáltica proporciona la superficie de rodamiento; las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores se distribuyen por medio de las características de fricción y cohesión de las partículas de los materiales; y la carpeta asfáltica se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se rompa. Las capas que forman un pavimento flexible son: carpeta asfáltica, base y sub-base, las cuales se construyen sobre la capa subrasante. (Bustamante Olivera, 2004)

2.1.3 Componentes de un pavimento asfáltico

En la Figura 2.1 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. (UMSS – Facultad de Ciencias y Tecnología)

Figura 2.1: Componentes principales de pavimento asfáltico.



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

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

2.1.4 Capa de rodadura o revestimiento asfáltico

Una mezcla en caliente de pavimento asfáltico es una combinación homogénea de asfalto y agregado caliente. La mayoría del asfalto que se utiliza hoy en día proviene de la refinación del crudo de petróleo. El cemento asfáltico, o asfalto de pavimentación, se clasifica según su viscosidad o penetración. Las propiedades físicas más relevantes del asfalto para pavimentación son: durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, y resistencia al envejecimiento y endurecimiento. Los ensayos típicos para determinar las características del asfalto incluyen pruebas de viscosidad, penetración, punto de inflamación, envejecimiento, endurecimiento, ductilidad, solubilidad y peso específico.

En una mezcla asfáltica en caliente, el asfalto y el agregado se combinan en proporciones exactas. Estas proporciones son clave para definir las propiedades físicas de la mezcla y su rendimiento como pavimento. Para determinar las proporciones correctas de asfalto y agregado, se utilizan dos métodos de diseño ampliamente reconocidos: el método Marshall y el método Hveem. En este estudio, nos enfocaremos en el método Marshall, aunque ambos son igualmente efectivos. La elección del método de diseño depende principalmente de preferencias personales en ingeniería, ya que cada uno tiene ventajas y características propias.

Las mezclas asfálticas en caliente pueden ser fabricadas con diversas combinaciones de agregados, cada uno con sus características específicas para adaptarse a un diseño y uso particular en construcción. Además del tipo y cantidad de asfalto, las principales características de la mezcla dependen de las proporciones relativas de agregado grueso, fino y polvo mineral. (UMSS – Facultad de Ciencias y Tecnología)

2.1.5 Componentes de una mezcla asfáltica

2.1.5.1 Agregados

En la mezcla agregado-asfalto comúnmente usadas en pavimentos asfalticos, 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 asfaltico, 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. (Universidad Internacional del Ecuador. (2015). Diseño de mezclas asfálticas en caliente utilizando el método Marshall.)

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 asfaltico. 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. (Universidad Internacional del Ecuador. (2015). Diseño de mezclas asfálticas en caliente utilizando el método Marshall.)

2.1.6 Características y comportamiento de la mezcla asfáltica

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 el efecto que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son la densidad de la mezcla, vacíos de aire, o simplemente vacíos, vacíos en el agregado mineral y el contenido de asfalto.

2.1.6.1 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 para el inspector, Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

En las pruebas y el análisis de diseño de mezclas, densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cubico (kg/m3) o libras por pie cubico (lb/ft3). La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por 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 muy rara vez la compactación in-situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio. (Asphalt institute, 1982)

2.1.6.2 Porcentaje de vacíos de aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas

las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales esta entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.

La durabilidad de un pavimento asfaltico es función del contenido de vacíos. La razón de estos 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 realidad) de vacíos; preferible menos del 8 por ciento. (Asphalt institute, 1982)

2.1.6.3 Vacíos en el agregado mineral (V.A.M)

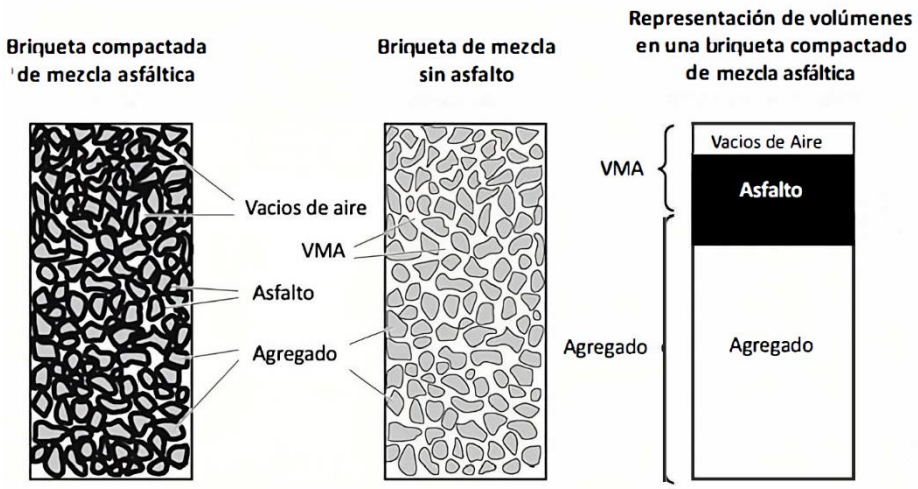
Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuanto mayor sea el VMA, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del

agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuánto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, deben tener valores mínimos de VMA. Un aumento de la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA 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 VMA para economizar en el contenido de asfalto. (Asphalt institute, 1982)

Figura 2.2: Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada.



Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (Asphalt Institute MS-22).

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 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 de 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 superficie 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 (No.200)). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultado 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 de relleno mineral 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 superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de la mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregado, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas. (Asphalt institute, 1982)

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. (Asphalt institute, 1982)

2.1.7.1 Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable 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 deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el transito esperado. Las

especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el transito 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 la forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad del 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 (trafico).

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 pérdidas de fricción entre partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento. (Asphalt institute, 1982)

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: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

2.1.7.2 Durabilidad

La durabilidad de un pavimento asfaltico es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las partículas 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 de 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 agregados firme, duro y resistente a la separación, contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de 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 minerales como la cal hidratada.

La intrusión de aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible. (Asphalt institute, 1982)

Tabla 2.2: Causas y efecto de un poco durabilidad.

Causas	**Efectos**
Bajo contenido de asfaltos.	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por perdida 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 degastado, o desintegrado.

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

2.1.7.3 Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento asfaltico 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 relacionan 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 más 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.

Aunque la permeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. (Asphalt institute, 1982)

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: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

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 68 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.

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.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tiene algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla. (Asphalt institute, 1982)

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: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

2.1.7.5 Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfaltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfaltico 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, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de 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. (Asphalt institute, 1982)

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.

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles. (Asphalt institute, 1982)

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: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

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 (38 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. (Asphalt institute, 1982)

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: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (MS-22), Asphalt institute.

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 perdida 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 cura todo y no se lo debe emplear como un sustituto de una buena práctica de la construcción.

2.1.8.1 Caucho en asfalto

El caucho, ya sea natural, sintético o recuperado, se ha utilizado en forma de polvo, migas, grano o látex para modificar ciertas propiedades del asfalto. Incluso en pequeñas cantidades, como el 0,1%, y generalmente entre el 1% y 5%, el caucho puede incrementar la viscosidad del asfalto, disminuir su susceptibilidad térmica y reducir la tendencia al flujo.

2.1.8.2 Siliconas

Las siliconas se agregan al asfalto bajo ciertas condiciones para reducir o eliminar los efectos de la humedad y otros propósitos. Por ejemplo, pueden añadirse al asfalto caliente para evitar la formación de espuma durante el almacenamiento. En las mezclas asfálticas, las siliconas ayudan a prevenir el endurecimiento del concreto asfáltico durante el almacenamiento, evitan el asentamiento y la segregación de la mezcla durante el transporte, y reducen la separación de la mezcla durante su colocación.

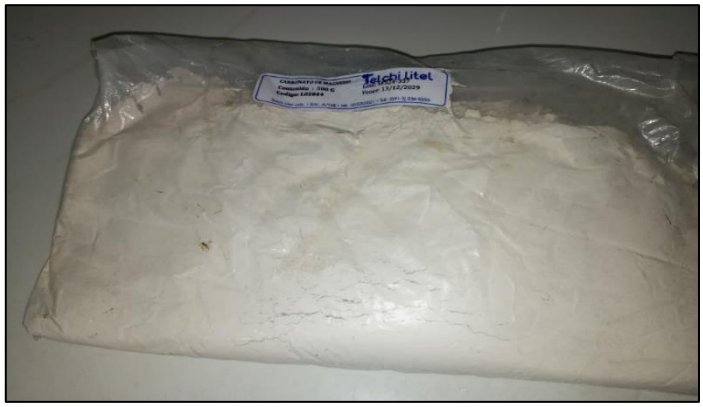
2.1.8.3 Cal hidratada

La cal hidratada se añade a agregados de baja calidad para permitir su uso en mezclas asfálticas destinadas a caminos. Generalmente, la adición de aproximadamente un 1% de cal hidratada mejora las propiedades de la mezcla, permitiendo que cumpla con los requisitos exigidos para pavimentos asfálticos. La cal hidratada puede servir como filler en el material granular y se añade al agregado en la mezcladora. Su incorporación permite el uso de hasta un 1% adicional de asfalto sobre el contenido normal sin causar desintegración o exudación en el pavimento terminado, resultando en una superficie más densa, firme y durable.

2.1.8.4 Carbonato de magnesio

El carbonato de magnesio es un compuesto químico natural y sintético, presente principalmente en forma de polvo blanco fino, aunque también se encuentra en forma granulada o sólida como la magnesita. Su estructura le permite actuar como filler en múltiples industrias para mejorar propiedades físicas, reducir costos o aumentar volumen.

Figura 2.3: Carbonato de magnesio.



Fuente: Elaboración propia

Gracias a su versatilidad, se usa comúnmente en:

- Plásticos y caucho: mejora resistencia y estabilidad.
- Papel: aumenta opacidad y suavidad.
- Pinturas: mejora textura y cobertura.
- Farmacéutica: se emplea como excipiente y antiácido.
- Alimentos: actúa como anti aglomerante y regulador ácido.

2.1.8.5 Información del producto

Base química

Carbonato de Magnesio

Fórmula química

$MgCO_3$

Empaque

El carbonato de magnesio generalmente se comercializa en:

- Bolsas **0.5 kg**
- Bolsas **1 kg**

- Bolsas **25 kg**

El producto se presenta en polvo fino, adecuado para su uso como material filler en mezclas asfálticas.

En un estudio técnico titulado “Mezclas asfálticas sostenibles mediante la sustitución parcial de agregados finos por subproducto de carbonato de magnesio de baja calidad”, realizado por los investigadores Teresa López-Montero, Jofre Mañosa, Rodrigo Miró y Josep M. Chimenos de la Universidad de Barcelona y la Universidad Politécnica de Catalunya, se evaluó el potencial del carbonato de magnesio (LG-MC) por sus siglas en inglés Low-Grade Magnesium Carbonate como filler y agregado fino en mezclas asfálticas para pavimentos de carretera.

Esta investigación surgió como respuesta a la creciente necesidad de reutilizar subproductos industriales para reducir el impacto ambiental asociado a la explotación de áridos naturales. El LG-MC, un residuo generado durante la producción de magnesita, ha sido históricamente desechado en vertederos, acumulando más de un millón de toneladas. En este contexto, los autores plantean su uso como sustituto parcial de la fracción fina y del filler tradicional.

El estudio se centró en analizar el comportamiento mecánico de dos tipos de mezclas asfálticas [BBTM11B (que es una mezcla discontinua de capa de rodadura, caracterizada por tener un tamaño máximo de agregado de 11 mm y propiedades antideslizantes) y AC16S (que es una mezcla densa de concreto asfáltico para capas superficiales, con un tamaño máximo de agregado de 16 mm.)], incorporando LG-MC en lugar de árido fino y filler. Se realizaron ensayos de resistencia a tracción indirecta, ensayo Fénix y Cántabro bajo condiciones normales, con daño por humedad y envejecimiento acelerado.

Los resultados revelaron que:

- Las mezclas con LG-MC presentaron comportamientos similares a las mezclas convencionales en cuanto a resistencia, cohesión y durabilidad.
- Se observó un efecto protector del LG-MC frente al agrietamiento, especialmente a bajas temperaturas y en mezclas envejecidas.
- La ductilidad de la mezcla con LG-MC se conservó mejor tras el envejecimiento comparado con el filler convencional.
- El uso de LG-MC no generó pérdidas significativas en la resistencia a la humedad ni a la cohesión de la mezcla.

En conclusión, el estudio demostró la viabilidad técnica y ambiental de utilizar este subproducto como alternativa sostenible en la fabricación de mezclas asfálticas, contribuyendo a la economía circular y a la reducción del uso de recursos naturales no renovables.

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 110º C (230ºF).

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

La muestra se calienta completamente una segunda vez, y se vuele 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 60º C (140º 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 asfaltico y elaboración de mezcla asfáltica, seguido del código AASHTO, ASTM.

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

N°	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.

N°	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 especifica.	D-71	T 229-97

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**	
Criterio de mezcla	Mínimo	Máximo
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

Los rellenos minerales (fillers) son materiales compuestos por partículas muy finas, con tamaños generalmente inferiores a 75 μm, que se incorporan a las mezclas asfálticas con el objetivo de mejorar su desempeño reológico, térmico, mecánico y de durabilidad. Su función principal consiste en llenar los vacíos entre los agregados gruesos, incrementar la densidad y proporcionar cohesión al mortero asfáltico, especialmente después de la compactación (AASHTO, 2000).

Diversos estudios han demostrado que la naturaleza mineralógica, la granulometría y la interacción química del filler con el ligante asfáltico influyen directamente en el comportamiento de la mezcla. A pesar de la vasta investigación disponible, aún existe debate en el ámbito académico respecto a los mecanismos físicos y químicos que

determinan la efectividad de los distintos tipos de filler (Sebaaly et al., 2003; Anderson et al., 1992b).

El presente trabajo de investigación se fundamenta en antecedentes técnicos recientes relacionados con la incorporación de materiales alternativos y subproductos industriales como rellenos en mezclas asfálticas, con el propósito de mejorar el desempeño y promover prácticas sostenibles.

Como primer antecedente, se toma el estudio internacional titulado "Mezclas asfálticas sostenibles mediante la sustitución parcial de agregados finos por subproducto de carbonato de magnesio de baja calidad", desarrollado por investigadores de la Universitat de Barcelona y la Universitat Politècnica de Catalunya. En dicho trabajo se evaluó el uso de carbonato de magnesio de baja calidad (LG-MC) —un subproducto industrial de la producción de magnesita— como reemplazo parcial del filler convencional en mezclas del tipo BBTM11B y AC16S. Los resultados mostraron que las mezclas modificadas con LG-MC presentaron comportamiento mecánico equivalente al de mezclas convencionales, destacando una mejor resistencia al agrietamiento en condiciones de baja temperatura y tras envejecimiento, sin comprometer la resistencia a la humedad ni la cohesión de la mezcla. Este trabajo demostró la viabilidad técnica y ambiental del uso de LG-MC como filler alternativo en pavimentación, aportando a la economía circular y reduciendo el uso de recursos vírgenes (López-Montero et al., 2021).

Como segundo antecedente, se considera el 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", desarrollado por Daniel Eliecer Moreno en la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. En este estudio, se evaluó la incorporación de talco industrial como reemplazo de arena en proporciones del 10%, 20% y 30%. Los resultados indicaron que la resistencia a compresión se incrementó hasta en un 20.78% a altas temperaturas, evidenciando el efecto positivo del filler en la cohesión del material.

Finalmente, se toma como referencia la ponencia técnica titulada “Implementación de talco industrial en la construcción de vías” presentada por Sandra Patricia Reyes Ortiz de la Universidad Cooperativa de Colombia, en la cual se exploró la mejora de materiales granulares subestándar mediante la adición de talco industrial en proporciones variables. Los ensayos demostraron que, al incorporar este aditivo, los materiales que inicialmente no cumplían con la normativa alcanzaron propiedades físicas y mecánicas aceptables para su uso en capas granulares de pavimentos.

2.4 Análisis del aporte teórico

La presente investigación toma como base teórica el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo el método Marshall, ampliamente utilizado para evaluar la estabilidad, fluencia y contenido óptimo de asfalto. Este enfoque permite analizar el efecto de distintos fillers en las propiedades mecánicas de la mezcla.

Se consideraron estudios previos que han abordado el uso de materiales alternativos como filler, tales como el carbonato de calcio, la cal hidratada, el talco industrial y, más recientemente, el carbonato de magnesio de baja calidad, los cuales han demostrado tener efectos positivos sobre la estabilidad, resistencia a la humedad y comportamiento a largo plazo de las mezclas. Estas investigaciones proporcionaron la justificación técnica y científica para proponer el uso del carbonato de magnesio como filler experimental en este estudio.

La investigación también se apoya en el uso de normas técnicas como las:

- ASTM D6927, para la determinación de la estabilidad y fluencia mediante el ensayo Marshall.
- AASHTO T245, para la elaboración de briquetas asfálticas compactadas.
- Normas de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras), como referencia nacional para la validación de propiedades físicas de los materiales utilizados en pavimentación.

Estas normativas fueron seleccionadas por su amplia aceptación en el ámbito técnico, y por ser utilizadas en proyectos reales de infraestructura vial tanto en Bolivia como en otros países de la región.

La combinación de estas fuentes garantiza que la metodología utilizada en el presente trabajo sea coherente, reproducible y técnicamente respaldada.

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 estabilidad de la mezcla asfáltica con la adición del carbonato de magnesio 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.

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

Fuente: Crochan (1977)

Se adoptará una varianza de (σ^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	$Ni * \sigma^2$	**fi**	**ni**	**ni**
Caracterización del cemento asfáltico						
Penetración	3	0.1	0.3	0.0238	2.3810	3
Ductilidad	3	0.10	0.3	0.0234	2.3438	3
Punto de ablandamiento	2	0.10	0.2	0.0156	1.5625	2
Punto de inflamación	3	0.10	0.3	0.0234	2.3438	3
Peso especifico	3	0.10	0.3	0.0234	2.3438	3
Caracterización de los agregados						
Granulometría	12	0.10	1.2	0.0938	9.3750	10
Porcentaje de caras fracturadas	2	0.10	0.2	0.0156	1.5625	2
Equivalente de arena	3	0.10	0.3	0.0234	2.3438	3
Desgaste de las Ángeles	2	0.10	0.2	0.0156	1.5625	2
Peso específico	9	0.10	0.9	0.0703	7.0313	7
Peso específico del carbonato de magnesio	2	0.10	0.2	0.0156	1.5625	2
Pruebas preliminares (Marshall)						
Contenido óptimo de C.A.	18	0.10	1.8	0.1406	14.0625	15
Filler (carbonato de magnesio).	18	0.10	1.8	0.1406	14.0625	15
Filler (convencional).	18	0.10	1.8	0.1406	14.0625	15
Pruebas finales (Marshall)						
Estabilidad	30	0.10	3	0.2344	23.4375	24
Total	**128**		**12.8**			**109**

Fuente: Elaboración propia.

$$n = \frac{12.8}{128 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{12,8}{128}}$$

n= 70 ensayos

El total de ensayos cubierto por la investigación en el periodo entre 4 a 5 meses corresponde a 70 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 asfaltico 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:

- Los ensayos se llevaron a cabo en un ambiente controlado, evitando que factores externos como temperatura y humedad afectaran los resultados.
- Se utilizo el mismo equipo y metodología para la elaboración de briquetas.
- Se adquirieron conocimientos y habilidades específicas en el uso adecuado de instrumentos, 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

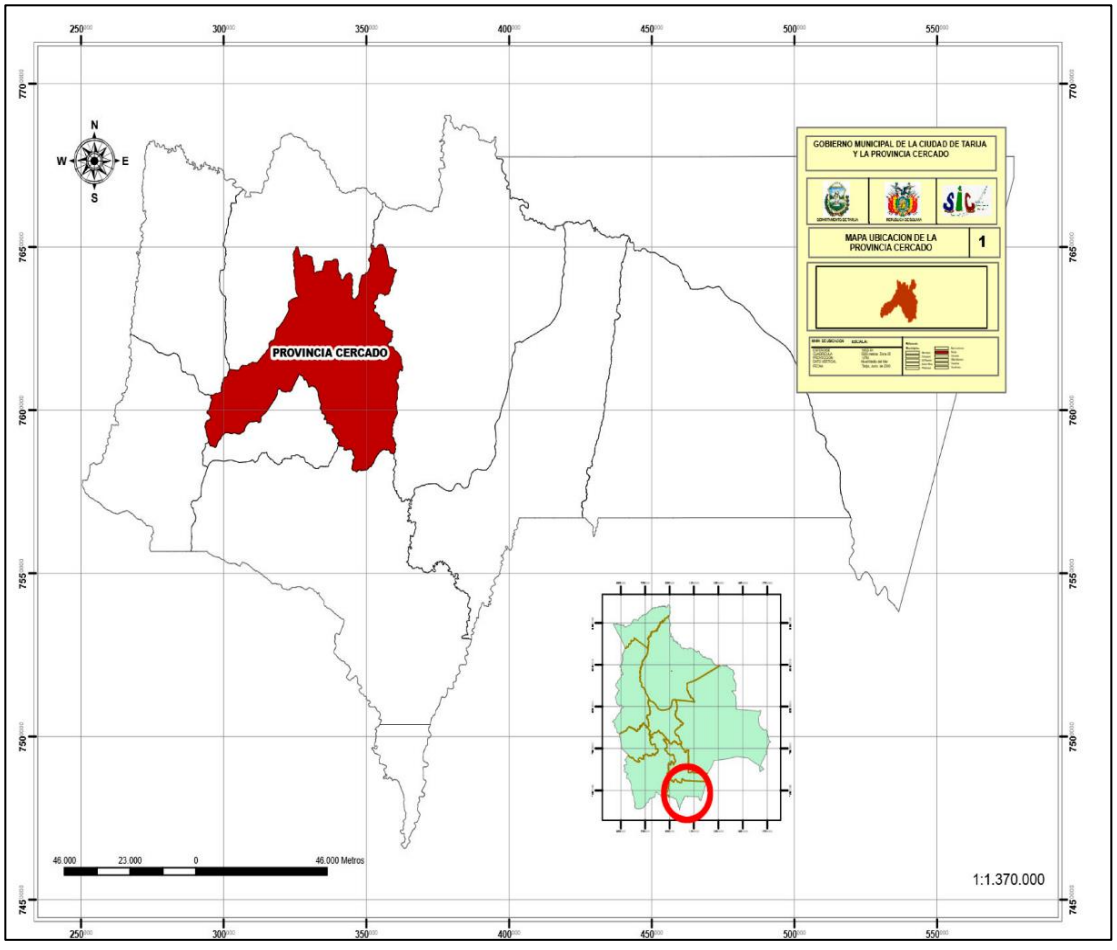
3.1.6.1 Criterios de extracción

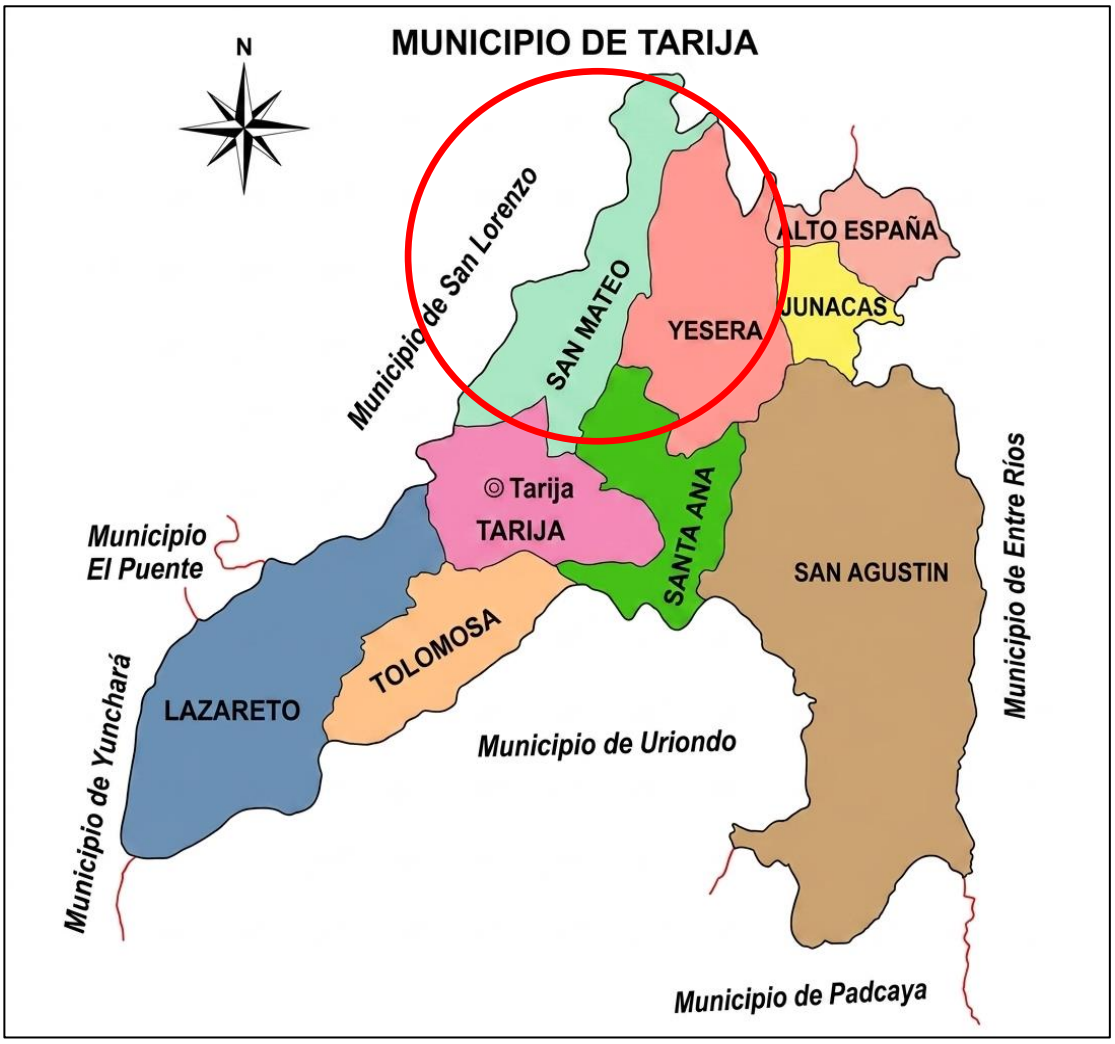
Áridos

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 rio Sella en las coordenadas:

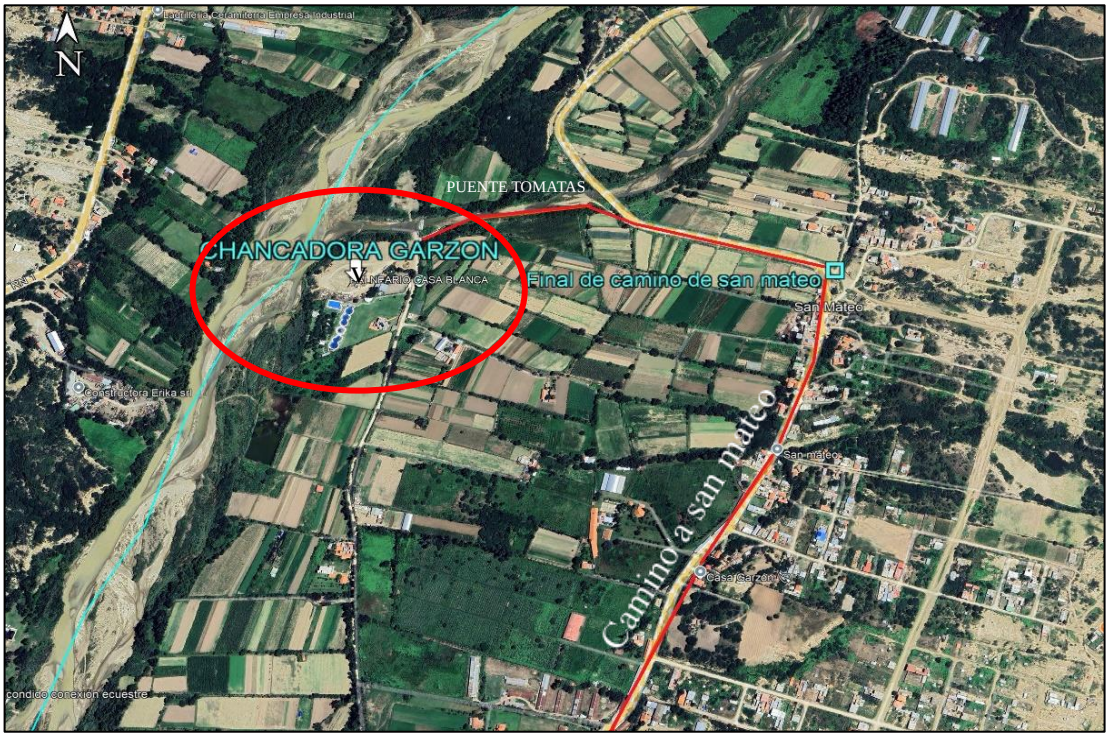
Zona: 20 K

Este: 318574.64 m E

Norte: 7624711.38 m S

Figura 3.2: Ubicación de la Chancadora Garzon.





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

La elección de este material se basa en estudios previos que evidencian sus buenas propiedades y comportamiento favorable en el diseño de mezclas asfálticas. Para la recolección del agregado grueso y fino, se empleó la técnica de muestreo aleatorio simple, garantizando así una representación adecuada de la muestra.

Filler

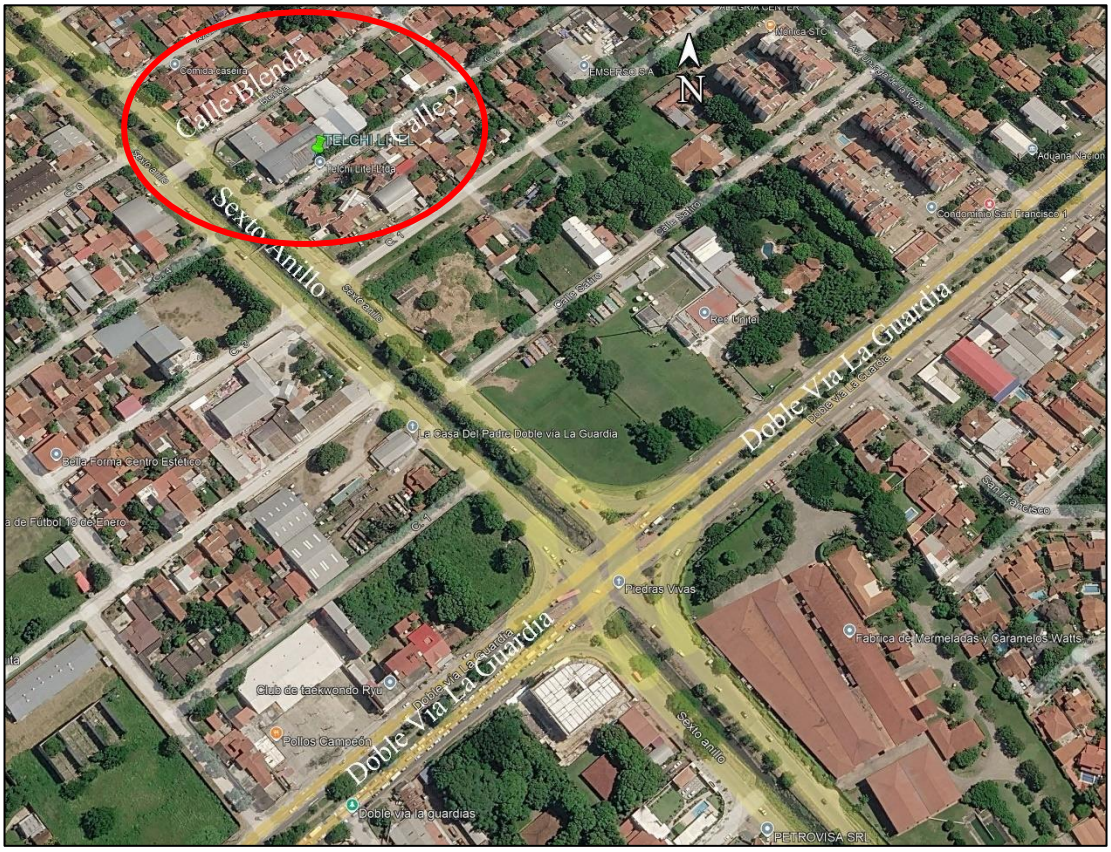
El carbonato de magnesio utilizado en este estudio fue obtenido de la empresa Telchi Litel, encargada de la distribución de este tipo de material. La adquisición se realizó directamente en sus instalaciones ubicadas en la ciudad de Santa Cruz. Calle 3 Km. 5 Doble Vía a la Guardia Sexto anillo.

Coordenadas

Zona: 20 K Este: 476458.96 m E Norte: 8029731.75 m S

Figura 3.3: Ubicación de Telchi Litel.





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

Cemento asfáltico

El cemento asfaltico se lo obtuvo de la alcaldía: Cemento asfaltico 85-100 de la marca Repsol que es de procedencia peruana.

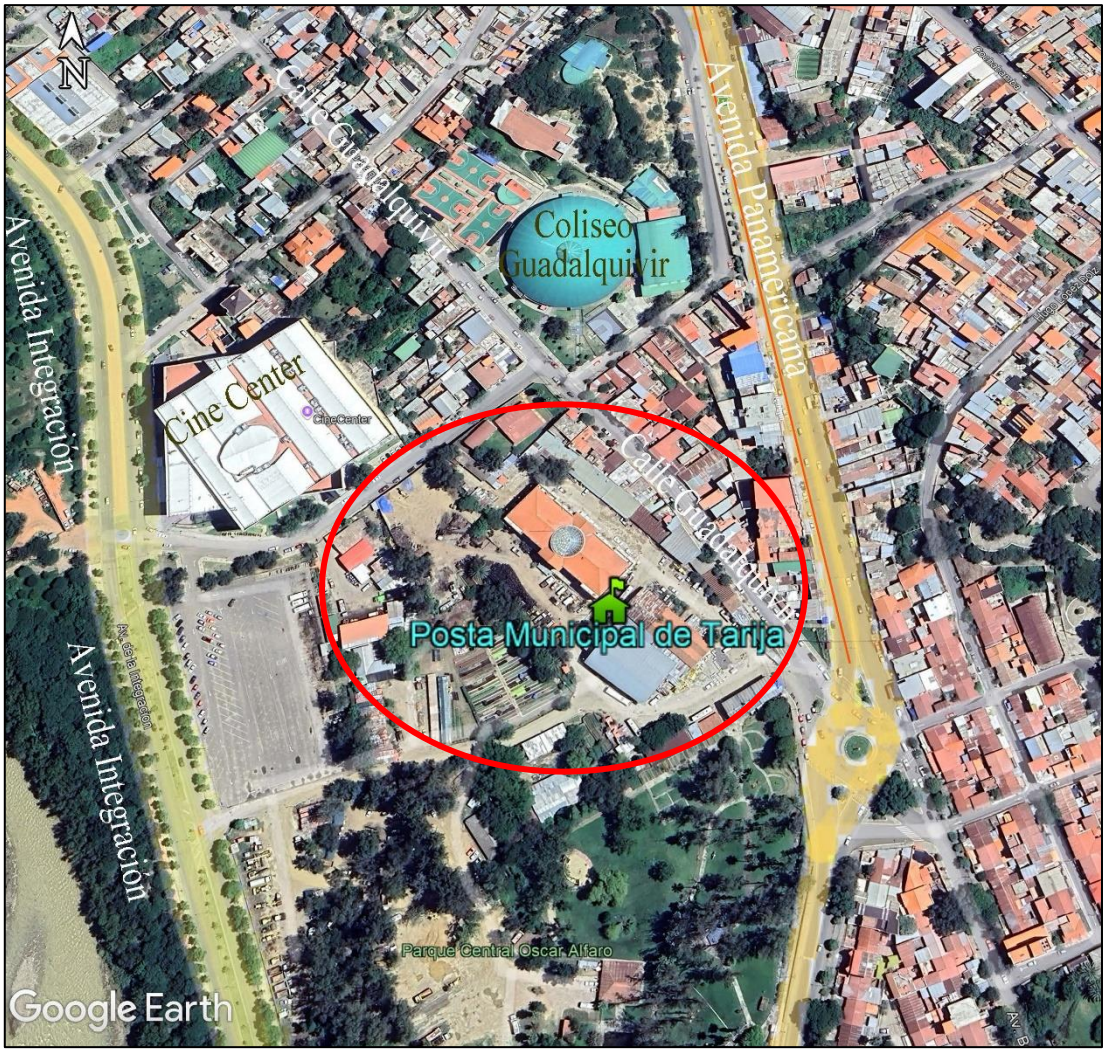
Coordenadas

Zona: 20 K

Este: 319766.22 m E

Norte: 7618546.07 m S

Figura 3.4: Ubicación de la posta municipal.



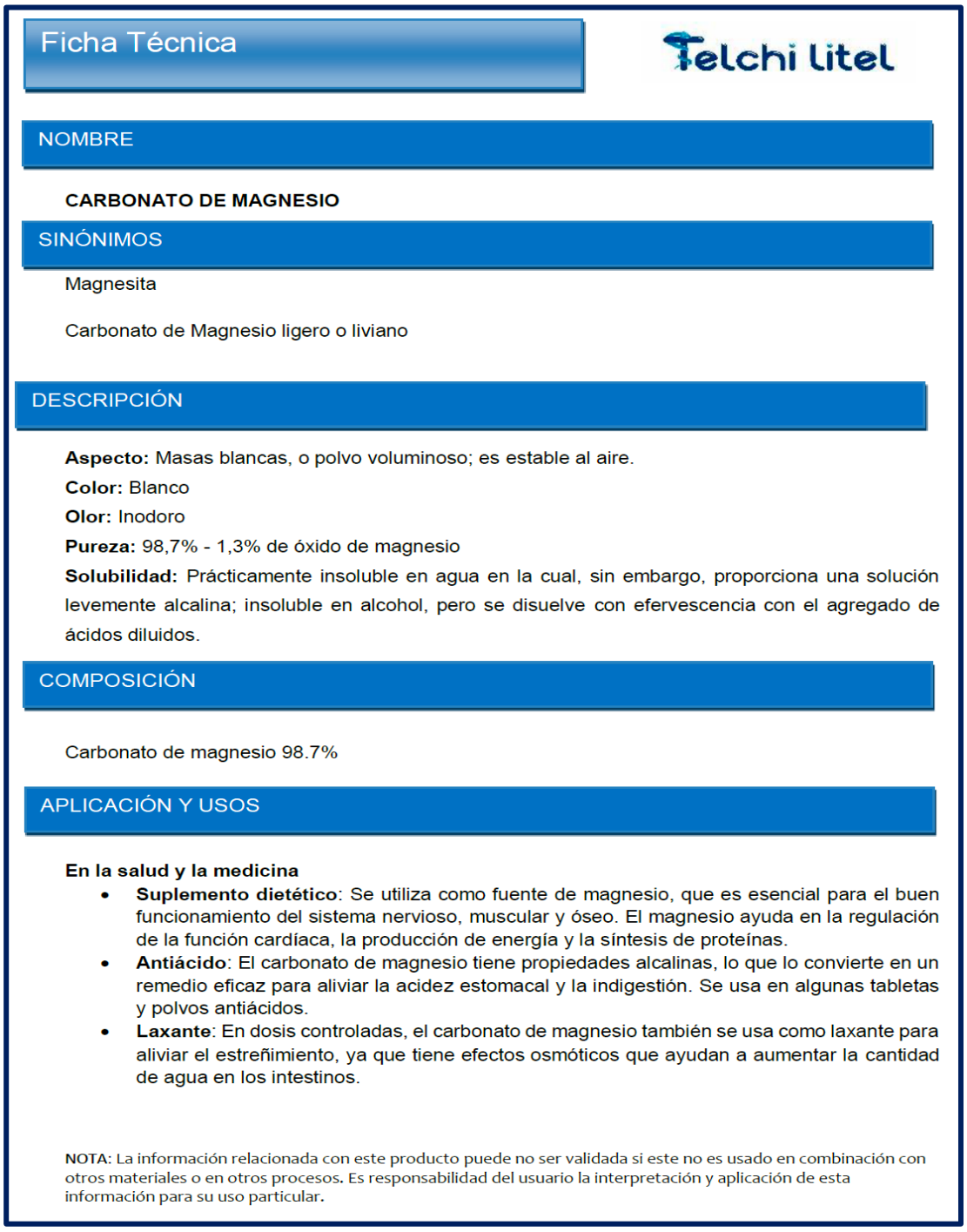
Fuente: https://www.GoogleEarth.jpg.

El muestreo realizado fue de tipo no probabilístico, ya que tanto el cemento asfáltico como los agregados fueron seleccionados de manera intencional, siendo proporcionados por la alcaldía. Estos materiales fueron trasladados al laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, donde se conservaron adecuadamente hasta que se realizaron los ensayos de caracterización.

3.2 Características de los materiales de investigación

3.2.1 Ficha técnica del carbonato de magnesio

Figura 3.5: Ficha técnica del carbonato de magnesio.



Ficha Técnica

Telchi litel

NOMBRE

CARBONATO DE MAGNESIO

SINÓNIMOS

Magnesita

Carbonato de Magnesio ligero o liviano

DESCRIPCIÓN

Aspecto: Masas blancas, o polvo voluminoso; es estable al aire.
Color: Blanco
Olor: Inodoro
Pureza: 98,7% - 1,3% de óxido de magnesio
Solubilidad: Prácticamente insoluble en agua en la cual, sin embargo, proporciona una solución levemente alcalina; insoluble en alcohol, pero se disuelve con efervescencia con el agregado de ácidos diluidos.

COMPOSICIÓN

Carbonato de magnesio 98.7%

APLICACIÓN Y USOS

En la salud y la medicina

- **Suplemento dietético**: Se utiliza como fuente de magnesio, que es esencial para el buen funcionamiento del sistema nervioso, muscular y óseo. El magnesio ayuda en la regulación de la función cardíaca, la producción de energía y la síntesis de proteínas.
- **Antiácido**: El carbonato de magnesio tiene propiedades alcalinas, lo que lo convierte en un remedio eficaz para aliviar la acidez estomacal y la indigestión. Se usa en algunas tabletas y polvos antiácidos.
- **Laxante**: En dosis controladas, el carbonato de magnesio también se usa como laxante para aliviar el estreñimiento, ya que tiene efectos osmóticos que ayudan a aumentar la cantidad de agua en los intestinos.

NOTA: La información relacionada con este producto puede no ser validada si este no es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos. Es responsabilidad del usuario la interpretación y aplicación de esta información para su uso particular.

Ficha Técnica

Telchi litel

En la industria

- **Fabricación de materiales refractarios**: El carbonato de magnesio se utiliza en la producción de ladrillos refractarios, que son materiales capaces de soportar altas temperaturas sin descomponerse. Es fundamental en industrias como la metalurgia y la cerámica.
- **Industria química**: Se utiliza como reactivo en la fabricación de otros compuestos químicos, como el óxido de magnesio (MgO), que se emplea en la producción de fertilizantes, materiales de construcción y otros productos industriales.
- **Pigmentos y pinturas**: Se usa en la formulación de ciertos pigmentos y pinturas como un relleno blanco o para dar opacidad a los productos.
- **Producción de goma y plásticos**: El carbonato de magnesio se incorpora en la fabricación de algunos productos de goma y plásticos para mejorar sus propiedades de resistencia y durabilidad.

En la agricultura

- **Suplemento de magnesio para suelos**: El carbonato de magnesio se puede usar para corregir deficiencias de magnesio en los suelos, especialmente en aquellos donde el suelo es ácido. Es una fuente de magnesio que puede mejorar el crecimiento de las plantas.
- **Fertilizantes**: Se emplea en la formulación de fertilizantes, ya que el magnesio es un componente clave para la fotosíntesis en las plantas.

En la fabricación de cosméticos

- **Ingrediente en productos cosméticos**: Se encuentra en algunos productos cosméticos y de cuidado personal como base en polvo, ya que tiene propiedades absorbentes que ayudan a controlar la humedad y el aceite en la piel. Se usa en productos como polvos faciales, desodorantes y talcos.

En la producción de alimentos

- **Aditivo alimentario**: En algunas ocasiones, se utiliza como aditivo alimentario (E504) para mejorar la textura y evitar la aglomeración de ciertos productos alimenticios como sal, harinas o productos en polvo.

MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación: Usar equipos de protección personal(EPP), guantes, protección ocular, mascarilla o respirador, ropa protectora, evitar la inhalación y contacto con los ojos.

Trabajar en áreas ventiladas, no comer, beber ni fumar durante la manipulación.

Almacenamiento: Almacenar en lugares frescos y secos en envases herméticamente cerrados.

Alejados de sustancias incompatibles como: ácidos fuertes. Aunque no es un material altamente reactivo, es importante no almacenarlo cerca de sustancias que puedan causar reacciones indeseadas.

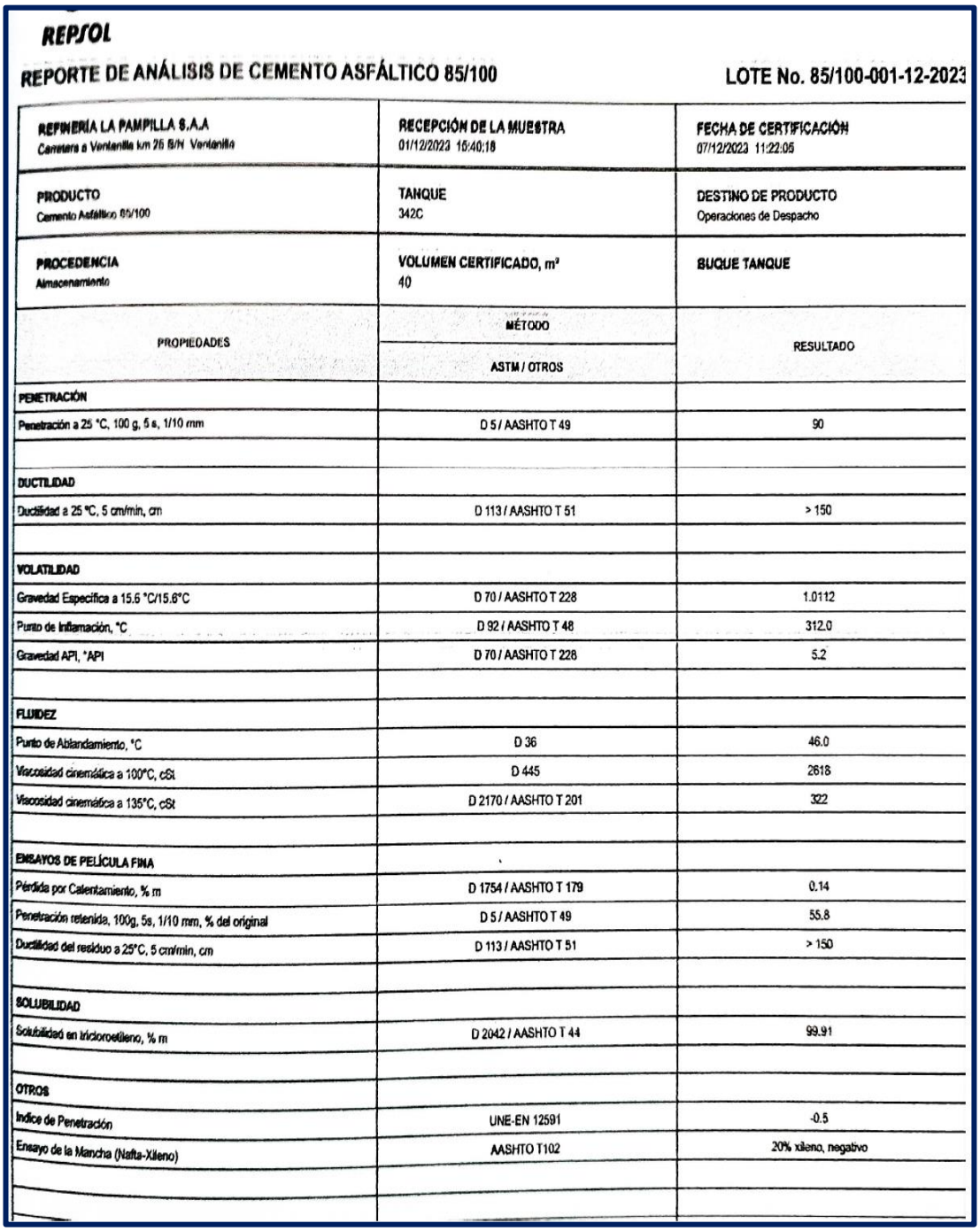
Temperatura recomendada de almacenamiento: No mayor a 30°C

NOTA: La información relacionada con este producto puede no ser validada si este no es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos. Es responsabilidad del usuario la interpretación y aplicación de esta información para su uso particular.

Fuente: Telchi litel.

3.2.2 Ficha técnica del cemento asfáltico Repsol 85-100

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



REPSOL

REPORTE DE ANÁLISIS DE CEMENTO ASFÁLTICO 85/100 — **LOTE No. 85/100-001-12-2023**

REFINERÍA LA PAMPILLA S.A.A Carretera a Ventanilla km 26 S/N Ventanilla	**RECEPCIÓN DE LA MUESTRA** 01/12/2023 15:40:18	**FECHA DE CERTIFICACIÓN** 07/12/2023 11:22:05
PRODUCTO Cemento Asfáltico 85/100	**TANQUE** 342C	**DESTINO DE PRODUCTO** Operaciones de Despacho
PROCEDENCIA Almacenamiento	**VOLUMEN CERTIFICADO, m³** 40	**BUQUE TANQUE**

PROPIEDADES	MÉTODO ASTM / OTROS	RESULTADO
PENETRACIÓN		
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	D 5 / AASHTO T 49	90
DUCTILIDAD		
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min, cm	D 113 / AASHTO T 51	> 150
VOLATILIDAD		
Gravedad Específica a 15.6 °C/15.6°C	D 70 / AASHTO T 228	1.0112
Punto de Inflamación, °C	D 92 / AASHTO T 48	312.0
Gravedad API, °API	D 70 / AASHTO T 228	5.2
FLUIDEZ		
Punto de Ablandamiento, °C	D 36	46.0
Viscosidad cinemática a 100°C, cSt	D 445	2618
Viscosidad cinemática a 135°C, cSt	D 2170 / AASHTO T 201	322
ENSAYOS DE PELÍCULA FINA		
Pérdida por Calentamiento, % m	D 1754 / AASHTO T 179	0.14
Penetración retenida, 100g, 5s, 1/10 mm, % del original	D 5 / AASHTO T 49	55.8
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm	D 113 / AASHTO T 51	> 150
SOLUBILIDAD		
Solubilidad en tricloroetileno, % m	D 2042 / AASHTO T 44	99.91
OTROS		
Indice de Penetración	UNE-EN 12591	-0.5
Ensayo de la Mancha (Nafta-Xileno)	AASHTO T102	20% xileno, negativo

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''	685.00	730.00	675.00
1/2''	2775.00	2700.00	2757.00
3/8''	815.00	785.00	710.00
Nº4	670.00	715.00	798.00
Nº8	55.00	70.00	60.00
Nº16	0.00	0.00	0.00
Nº30	0.00	0.00	0.00
Nº50	0.00	0.00	0.00
Nº100	0.00	0.00	0.00
Nº200	0.00	0.00	0.00
Peso total [g]	5000.00	5000.00	5000.00

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''	10.00	25.00	18.00
Nº4	4660.00	4620.00	4655.00
Nº8	330.00	355.00	327.00
Nº16	0.00	0.00	0.00
Nº30	0.00	0.00	0.00
Nº50	0.00	0.00	0.00
Nº100	0.00	0.00	0.00
Nº200	0.00	0.00	0.00
Peso total [g]	5000.00	5000.00	5000.00

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
Nº4	27.40	34.80	33.60
Nº8	81.55	85.72	86.74
Nº16	88.94	87.65	85.65
Nº30	180.65	187.95	180.65
Nº50	320.45	317.84	331.01
Nº100	185.60	180.94	175.12
Nº200	76.95	75.23	72.38
Base	35.95	28.65	32.64
Peso total [g]	997.49	998.78	997.79

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5: Datos de los ensayos realizados del carbonato de magnesio.

Tamices	Carbonato de magnesio	
	Ensayo 1 [g]	Ensayo 2 [g]
1''	0.00	0.00
3/4''	0.00	0.00
1/2''	0.00	0.00
3/8''	0.00	0.00
Nº4	0.00	0.00
Nº8	0.00	0.00
Nº16	0.00	0.00
Nº30	0.00	0.00
Nº50	0.00	0.00
Nº100	0.40	0.50
Nº200	1.80	1.50
Base	96.00	96.80
Peso total [g]	98.2	98.8

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de porcentaje que pasan los tamices

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

$$\%\ \text{Que Pasa} = 100 - \left(\frac{33.6}{997{,}79} * 100\right)$$

$$\%\ \text{Que Pasa} = 96{,}64\ \%$$

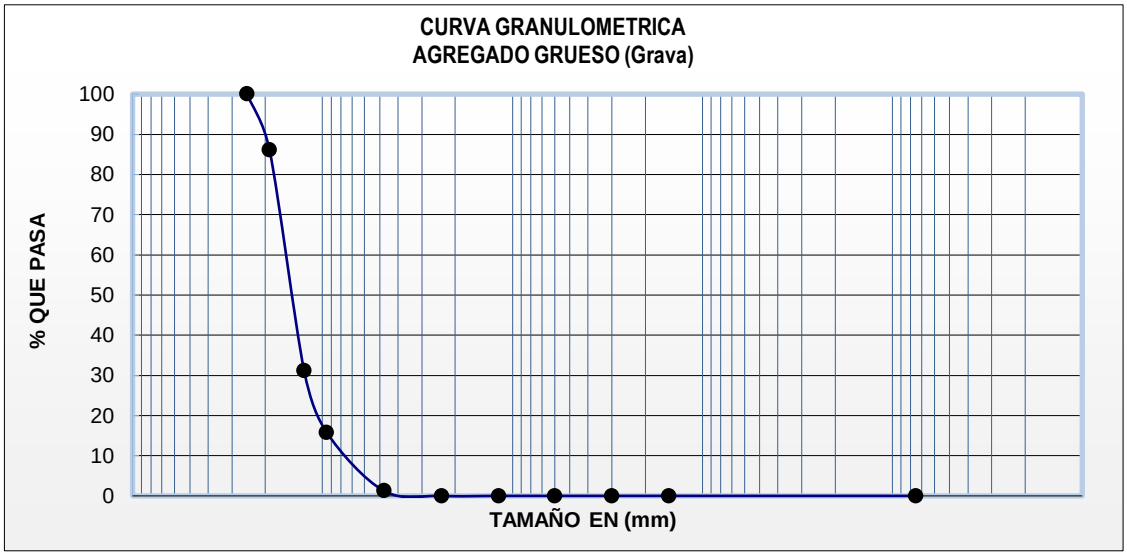
Planilla de resultados de las granulometrías promedio.

Tabla 3.6: 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	696.67	696.67	13.93	86.07
1/2''	12.50	2744.00	3440.67	68.81	31.19
3/8''	9.50	770.00	4210.67	84.21	15.79
Nº4	4.75	727.67	4938.33	98.77	1.23
Nº8	2.36	61.67	5000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº200	0.01	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE		0.00	5000.00	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.1: Curva granulométrica – grava.



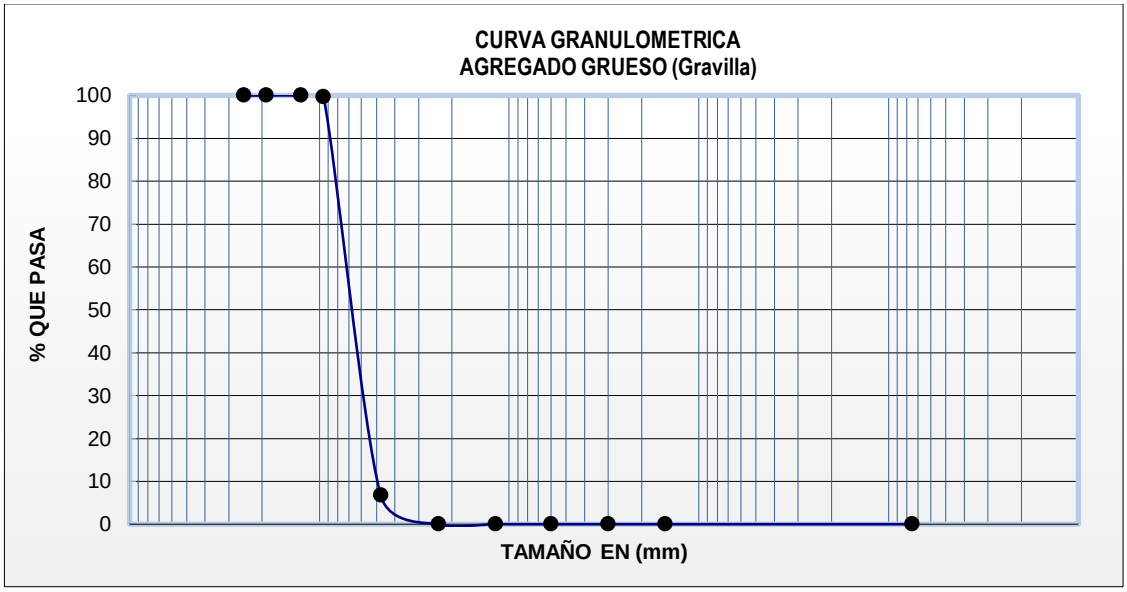
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7 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	17.67	17.67	0.35	99.65
Nº4	4.75	4645.00	4662.67	93.25	6.75
Nº8	2.36	337.33	5000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº200	0.01	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE		0.00	5000.00	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.2: Curva granulométrica – gravilla.



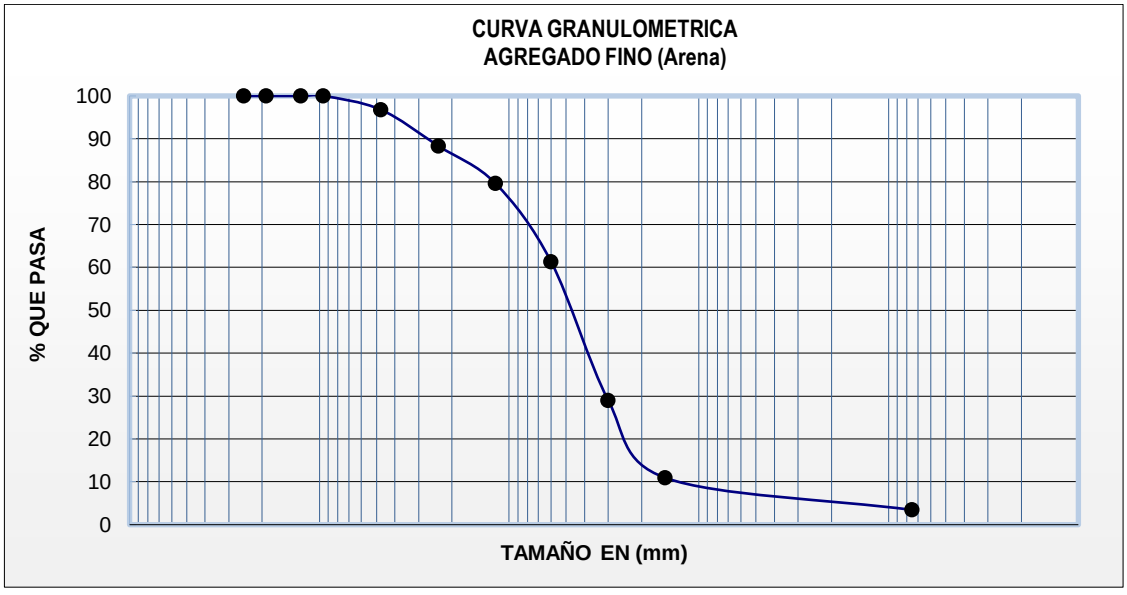
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8: 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
Nº4	4.75	31.93	31.93	3.19	96.81
Nº8	2.36	84.67	116.60	11.66	88.34
Nº16	1.18	87.41	204.02	20.40	79.60
Nº30	0.60	183.08	387.10	38.71	61.29
Nº50	0.30	323.10	710.20	71.02	28.98
Nº100	0.15	180.55	890.75	89.08	10.92
Nº200	0.01	74.85	965.61	96.56	3.44
BASE		32.41	998.02	99.80	0.20

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.3: Curva granulométrica – arena.



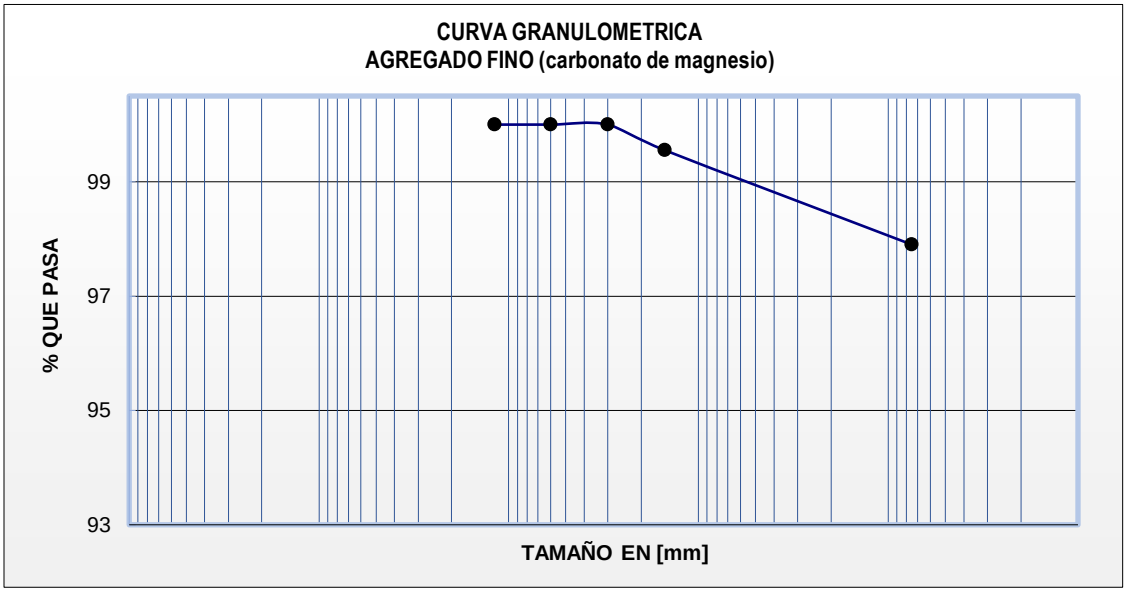
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9: Granulometría – agregado fino (carbonato de magnesio).

Tamices	Tamaño [mm]	Peso retenido [g]	Retenido acumulado		% Que pasa de total
			[g]	[%]	
Nº16	1.18	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº30	0.60	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº50	0.30	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº100	0.15	0.50	0.45	0.45	99.55
Nº200	0.01	1.70	2.10	2.10	97.90
BASE		96.40	98.50	98.50	1.50

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.4: Curva granulométrica – carbonato de magnesio.



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 3.10: Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso grava 3/4”.

Muestra Nº	**Peso muestra secada [g]**	**Peso muestra saturada con sup. seca [g]**	**Peso muestra Saturada dentro del agua [g]**
1	4925.10	5000.00	3097.00
2	4931.10	5000.00	3092.00
3	4933.80	5000.00	3096.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.11: Resultados del ensayo de peso específico para grava 3/4".

Muestra Nº	**Peso específico a granel [g/cm^3]**	**Peso específico S.S.S [g/cm^3]**	**Peso específico aparente [g/cm^3]**	**% de absorción**
1	2.588	2.627	2.694	1.521
2	2.584	2.621	2.681	1.397
3	2.591	2.626	2.685	1.342

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.12: 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	4915.00	5000.00	3097.00
2	4915.80	5000.00	3097.00
3	4915.80	5000.00	3096.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.13: Resultados del ensayo peso específico de agregado grueso gravilla 3/8".

Muestra Nº	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	2.583	2.627	2.704	1.729
2	2.583	2.627	2.703	1.713
3	2.582	2.626	2.701	1.713

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 3.14: 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	731.20	1023.40	490.30
2	500.00	730.30	1029.90	491.40
3	500.00	681.40	1001.10	489.10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.15: 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	2.36	2.41	2.48	1.98
2	2.45	2.50	2.56	1.75
3	2.71	2.77	2.89	2.23

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 3.16: 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 3.17: 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)		5001.1
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7mm)		3736.7
Pasa tamiz N°12 y retenido en base		1264.4
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

$$\%\ \text{de desgaste} = \frac{(\text{mi} - \text{mf})}{\text{mi}} * 100$$

$$\%\ \text{de desgaste} = \frac{(5001.1 - 3736.7)}{5001.1} * 100$$

$$\boldsymbol{\%\ \text{de desgaste} = 25,28\ \%}$$

Proceso de cálculo para la gravilla 3/8”:

Tabla 3.18: 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)		5000.8
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7mm) (m final)		3709.6
Pasa tamiz N°12 y retenido en base		1291.20
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

$$\%\ \text{de desgaste} = \frac{(\text{mi} - \text{mf})}{\text{mi}} * 100$$

$$\%\ \text{de desgaste} = \frac{(5000.8 - 3709.6)}{5000.8} * 100$$

$$\%\ \mathbf{de\ desgaste} = \mathbf{25,82}\ \%$$

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 3.19: Datos del ensayo de caras fracturadas.

Descripción		**Peso [g]**
Grava 3/4"	Peso total de muestra.	1500
	Peso de caras fracturadas retenidas.	1241.5
Gravilla 3/8"	Peso total de muestra.	1000
	Peso de caras fracturadas retenidas.	458.67

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20: Resultados del ensayo de caras fracturadas.

Descripción		**Unidad**	**Valor**
Grava 3/4"	Porcentaje de caras fracturadas.	[%]	86.02
	Peso de caras no fracturadas.	[g]	258.5
Gravilla 3/8"	Porcentaje de caras fracturadas.	[%]	78.58
	Peso de caras no fracturadas.	[g]	541.3

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 AASHO T-100 y ASTM D-854.

Proceso de cálculo:

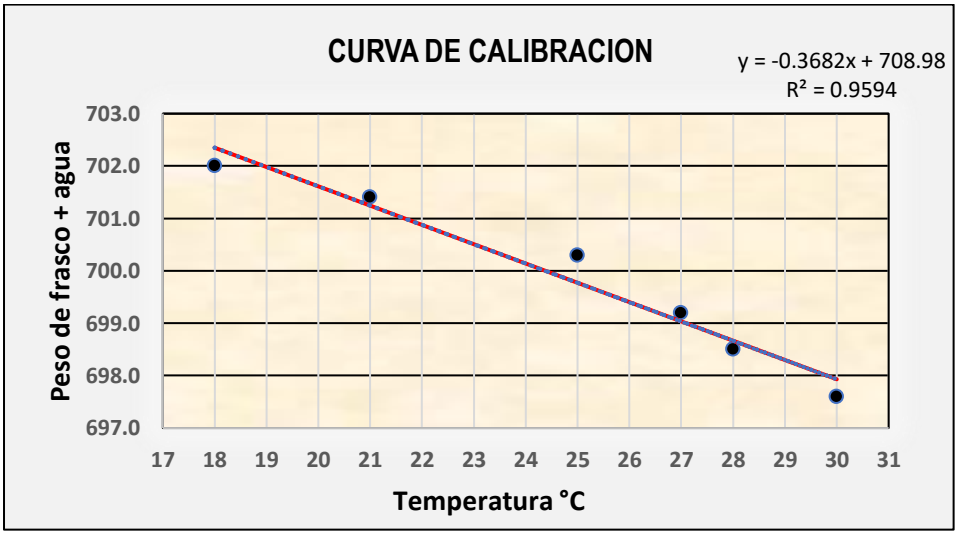
Calibración del frasco volumétrico:

Tabla 3.21: Datos de la calibración de frasco volumétrico.

N° de ensayo	Wfw [g]	T [°C]
1	697.60	30
2	698.50	28
3	699.20	27
4	700.30	25
5	701.40	21
6	702.00	18

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.5: Curva de calibración del frasco volumétrico.



Fuente: Elaboración propia.

Para filler convencional:

Tabla 3.22: 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	21	18
Peso del suelo seco Ws	**[g]**	80	80	80	80	80
Peso del frasco + agua Wfw	**[g]**	698.302	699.039	699.775	701.248	702.352
Peso del frasco + agua + suelo Wfws	**[g]**	749.50	749.80	750.10	750.50	750.80
Peso especifico	**[g/cm³]**	2.778	2.736	2.696	2.602	2.535
Factor de corrección K		0.9977	0.9983	0.9989	0.9998	1.0004
Peso específico corregido	**[g/cm³]**	2.771	2.731	2.693	2.601	2.536
Promedio	**[g/cm³]**	**2.667**				

Fuente: Elaboración propia.

Para filler carbonato de magnesio:

Tabla 3.23: Datos y resultados del ensayo de peso específico de filler carbonato de magnesio.

Datos del ensayo	**Unidad**	**Ensayo**				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Temperatura de ensayo °C	**[°C]**	29	27	25	21	18
Peso del suelo seco Ws	**[g]**	80	80	80	80	80
Peso del frasco + agua Wfw	**[g]**	698.30	699.039	699.775	701.248	702.352
Peso del frasco + agua + suelo Wfws	**[g]**	749.60	749.80	750.00	750.10	750.20
Peso especifico	**[g/cm³]**	2.787	2.736	2.687	2.568	2.488
Factor de corrección K		0.9980	0.9989	0.9993	0.9998	1.0004
Peso específico corregido	**[g/cm³]**	2.782	2.733	2.685	2.568	2.489
Promedio	**[g/cm³]**	**2.651**				

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 3.24: Datos del ensayo equivalente de arena.

Descripción	**Unidad**	**Ensayo**		
		1	**2**	**3**
Lectura nivel inferior.	[cm]	9.6	9.7	9.6
Lectura nivel superior.	[cm]	9.9	9.9	9.7

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

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

$$\text{Porcentaje de arena} = \frac{9{,}7}{9.9} * 100\%$$

$$\mathbf{Porcentaje\ de\ arena = 97{,}97\ \%}$$

Tabla 3.25: Resultados del ensayo equivalente de arena.

Descripción	**Unidad**	**Ensayo**		
		1	**2**	**3**
Porcentaje de arena.	[%]	96.97	97.98	98.97
Promedio.	[%]	97.97		

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 3.26: 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]	94	93	85
	Lectura N°2	[mm]	96	92	87
	Lectura N°3	[mm]	98	87	88

Fuente: Elaboración propia.

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

Se tiene como resultado una penetración promedio de 91.11 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 3.27: Datos del ensayo punto de inflamación.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de inflamación	[°C]	307	305	310
Promedio	[°C]	307.33		

Fuente: Elaboración propia.

Especificación técnica: Punto de inflamación, vaso abierto de Cleveland mínimo 312°C

De los tres ensayos realizados se obtiene el promedio el cual será el valor más representativo del ensayo el cual es 307.33°C el cual se encuentra en el rango según ficha técnica.

3.3.10 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 3.28: Datos del ensayo peso específico.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso del matraz (A)	[g]	35.7	34.3	34
Peso del matraz + agua destilada (25°C) (B)	[g]	86.2	88.6	84.9
Peso del matraz + muestra (C)	[g]	65.7	65.7	63.3
Peso del matraz + agua+ muestra (D)	[g]	86.6	89.1	85.1

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

Peso específico del cemento asfaltico:

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

Donde:

$\rho_W =$ Densidad del asfalto a la temperatura de ensaye [g/cm^3].

$\rho_b =$ Densidad del agua a la temperatura de ensaye [g/cm^3].

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

$$\rho_W = \frac{65{,}7 - 35{,}7}{(86{,}2 - 35{,}7) - (86{,}6 - 65{,}7)} * 0{,}997$$

$$\boldsymbol{\rho_W = 1{,}010 \ [g/cm^3]}$$

Tabla 3.29: Resultados del ensayo peso específico.

Descripción	**Unidad**	**Ensayo 1**	**Ensayo 2**	**Ensayo 3**
Peso específico del cemento asfáltico a 25 °C	[g/cm³]	1.010	1.013	1.004
Promedio	[g/cm³]	1.009		

Fuente: Elaboración propia.

Especificación técnica: Peso específico a 25 °C, entre 1.00-1.0112 g/cm^3.

De los tres ensayos se obtiene el promedio de peso específico de 1.009 g/cm^3, el cual se encuentra dentro del rango según fecha técnica.

3.3.11 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 asfalticos, cuyo valor se encuentre en el rango de 30 a 200 °C por medio del aparato de anillo y bola.

Tabla 3.30: Datos del ensayo punto de ablandamiento.

Descripción	**Unidad**	**Ensayo 1**	**Ensayo 2**
Punto de Ablandamiento, Anillo-Bola	[°C]	46	47
Promedio	[°C]	46.50	

Fuente: Elaboración propia.

Especificación técnica: Punto de Ablandamiento, Anillo-Bola, 46 °C.

El promedio del ensayo de Punto de ablandamiento fue de 46.50°C el cual se encuentra dentro del rango establecido según fecha técnica.

3.3.12 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 ± 5 % y temperatura 25 ± 0,5 °C.

Tabla 3.31: Datos del ensayo de ductilidad.

Descripción	**Unidad**	**Ensayo 1**	**Ensayo 2**	**Ensayo 3**
Lectura Inicial	[cm]	0	0	0
Lectura Final	[cm]	98	110	105
Promedio de ductilidad a 25 °C	[cm]	104.33		

Fuente: Elaboración propia.

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

El promedio del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico es de 104.33 cm, valor que supera el mínimo requerido de 100 cm según la normativa técnica aplicable (AASHTO T 51). Por lo tanto, el material cumple con las especificaciones técnicas en cuanto a ductilidad.

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 3.32: 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"	-	-	2.69 g/cm^3	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	2.70 g/cm^3	
Peso específico y absorción de agua en agregados finos.	Arena	-	-	2.64 g/cm^3	C-128
Peso específico del filler.	Convencional	-	-	2.67 g/cm^3	D-854
	Carbonato de magnesio	-	-	2.65 g/cm^3	
Porcentaje de caras fracturadas.	Grava 3/4"	75%	-	86.02%	D-5821
	Gravilla 3/8"	75%	-	78.58%	
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles.	Grava 3/4"	-	40%	25.28%	C-131
	Gravilla 3/8"	-	40%	25.82%	
Equivalente de arena	Arena	45%	-	97.97%	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 3.33: Resultados de la caracterización del cemento asfáltico.

Ensayo	Especificación		Resultado	Norma ASTM
	Mínimo	Máximo		
Penetración	85	100	91.11 [mm]	D-5
Punto de inflamación	-	312	307.33 [°C]	D-92
Ductilidad	100	-	104.33 [cm]	D-113
Punto de ablandamiento	46	-	46.50 [°C]	D-36
Densidad especifica	1.00	1.0112	1.009 [g/cm³]	D-70

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Combinación de agregados

Tabla 3.34: Promedio de granulometría de agregados pétreos.

Tamices N°	Tamaño [mm]	Grava Peso retenido a 5000 [g]	Gravilla Peso retenido a 5000 [g]	Arena Peso retenido a 5000 [g]	Filler Peso retenido a 5000 [g]
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.0	696.67	0.00	0.00	0.00
1/2"	12.5	2744.00	0.00	0.00	0.00
3/8"	9.50	770.00	17.67	0.00	0.00
Nº4	4.75	727.67	4645.00	159.98	0.00
Nº8	2.36	61.67	337.33	424.19	0.00
Nº16	1.18	0.00	0.00	437.93	0.00
Nº30	0.60	0.00	0.00	917.23	79.14
Nº50	0.30	0.00	0.00	1618.71	97.91
Nº100	0.15	0.00	0.00	904.56	189.23
Nº200	0.075	0.00	0.00	375.01	306.08
BASE	-	0.00	0.00	162.39	4327.63
	Peso total	5000.00	5000.00	5000.00	5000.00

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:

$$\mathbf{P = G * a + F * b + M * c \ \ldots etc}$$

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 3.35: Combinación granulométrica del agregado grueso.

Peso total [g]			**4000**	**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	278.67	278.67	6.97	93.03
1/2''	12.50	1097.60	1376.27	34.41	65.59
3/8''	9.50	315.07	1691.33	42.28	57.72
Nº4	4.75	2149.07	3840.40	96.01	3.99

Nº8	2.36	159.60	4000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	4000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	4000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	4000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	4000.00	100.00	0.00
Nº200	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 3.36: 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
Nº4	4.75	63.99	63.99	3.20	96.80
Nº8	2.36	169.68	233.67	11.68	88.32
Nº16	1.18	175.17	408.84	20.44	79.56
Nº30	0.60	366.89	775.74	38.79	61.21
Nº50	0.30	647.48	1423.22	71.16	28.84
Nº100	0.15	361.82	1785.04	89.25	10.75
Nº200	0.01	150.00	1935.04	96.75	3.25
BASE		64.96	2000.00	100.00	0.00
	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 3.37 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	100.00	93.03	65.59	57.72	3.99	0.00	0.00	0.00
Fino F	100.00	100.00	100.00	96.80	88.32	61.21	10.75	3.25
Filler M	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.37	97.07	94.62

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 especifico (en este caso el tamiz N°8) puede calcularse:

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

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

Debido a que:

$$a + b = 1 \qquad \text{Ecuación 2}$$

Sustituyendo y despejando:

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

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

Reemplazando en ecuación 4:

$$a = \frac{36 - 88{,}32}{0 - 88{,}32}$$

$$a = 0{,}592 \text{ (redondeado a } 0{,}60)$$

La ecuación para tres agregados:

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

Debido a que:

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

Despejando:

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

$$b = 1 - 0{,}592 - c$$

$$b = 0{,}408 - c \qquad \text{Ecuación 8}$$

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

$$P = G * 0{,}592 + F * b + M * c$$

$$5 = 0 * 0{,}592 + 3{,}25 * (0{,}408 - c) + 100 * c$$

$$c = 0{,}038 \text{ (redondeado a } 0{,}4)$$

Sustituyendo “c” en ecuación 8:

$$b = 0{,}408 - c$$

$$b = 0{,}408 - 0{,}038$$

$$b = 0{,}37 \text{ (redondeado a } 0{,}36)$$

Como resultado nos da un porcentaje granulométrico de:

$a = 0{,}60 \quad ; \; b = 0{,}36 \quad ; \quad c = 0{,}04$

$a + b + c = 1$

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 36% y 4% 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.

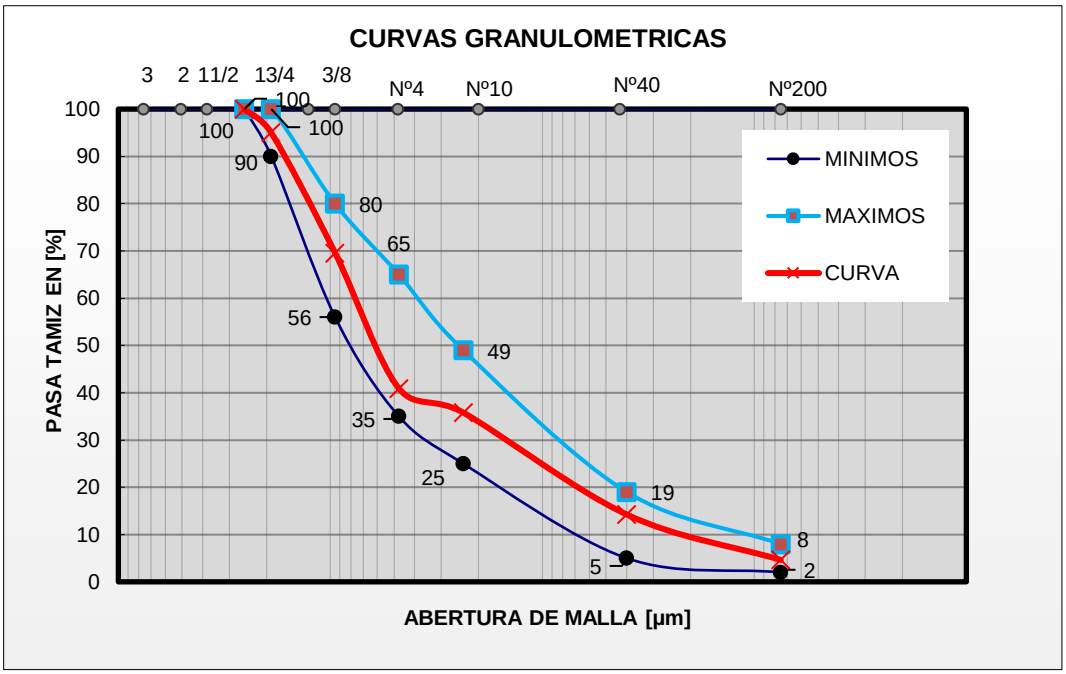
Tabla 3.38: Dosificación de materiales pétreos.

Tamices N°	**tamaño [mm]**	**Grava [%] 36.00**	**Gravilla [%] 24.00**	**Arena [%] 36.00**	**Filler [%] 4.00**	**% retenido**	**[%] que pasa del total**	**Especificaciones ASTM D3515**	
								Mínimo	**Máximo**
1"	25.4	0	0	0	0	0	100	100	100
3/4"	19.0	250.80	0.00	0.00	0.00	5.02	94.98	90	100
1/2"	12.5	987.84	0.00	0.00	0.00	24.77	75.23	-	-
3/8"	9.50	277.20	4.24	0.00	0.00	30.40	69.60	56	80

Nº4	4.75	261.96	1114.80	57.59	0.00	59.09	40.91	35	65
Nº8	2.36	22.20	80.96	152.71	0.00	64.21	35.79	23	49
Nº16	1.18	0.00	0.00	157.66	0.00	67.36	32.64	-	-
Nº30	0.60	0.00	0.00	330.20	3.17	74.03	25.97	-	-
Nº50	0.30	0.00	0.00	314.30	2.01	85.76	14.24	5	19
Nº100	0.15	0.00	0.00	325.64	7.57	92.42	7.58	-	-
Nº200	0.075	0.00	0.00	135.00	12.24	95.37	4.63	2	8
BASE	-	0.00	0.00	58.46	173.11	100	0	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.6: Curva granulométrica formada.



Fuente: Elaboración propia.

3.5 Contenido mínimo del cemento asfáltico

Para obtener el contenido óptimo de cemento asfaltico primero se debe calcular el contenido mínimo de cemento asfaltico, para obtener esto 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 3.39: 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: Diseño y construcción de pavimentos.

También se determina el índice asfaltico 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 3.40: Índice asfáltico.

Material pétreo	Índice asfaltico n		
	Absorción 0 a 2,5 %	**Absorción 2,6 a 5 %**	**Absorción mayor de 5 %**
Grava o arena de rio 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: Diseño y construcción de pavimentos.

Proceso de cálculo:

Para el cálculo se debe aplicar la siguiente formula:

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

Donde:

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

n = Índice de asfalticos.

Tabla 3.41: 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"	94.98	0.05	0.27	0.0075	0.01
1/2"	75.23				
3/8"	69.60				
Nº4	40.91	0.54	0.41	0.0075	0.17
Nº8	35.79				
Nº16	32.64				
Nº40	20.57	0.20	2.05	0.0075	0.31
Nº50	14.24				
Nº100	7.58				

Nº200	4.63	0.16	15.38	0.0075	1.84
BASE	0.00	0.05	53.3	0.0075	1.85
		1.00			**4.18**

Fuente: Elaboración propia.

Nos da como resultado un contenido mínimo del cemento asfaltico de 4.18 % con el cual partiremos para hallar el contenido optimo.

3.6 Contenido óptimo de cemento asfáltico

El contenido óptimo de cemento asfaltico 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 optimo 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 asfaltico 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 asfaltico dando un total de 18 briquetas con la cual se determinará el contenido óptimo de cemento asfaltico.

Tabla 3.42: Dosificación de la mezcla asfáltica.

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

Porcentaje de briqueta	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 3.43: Dosificación de la mezcla asfáltica con variación de porcentajes de cemento asfáltico.

Porcentaje de Cemento asfaltico [%]	**3.18**	**4.18**	**4.68**	**5.18**	**5.68**	**6.18**
Porcentaje de agregado [%]	96.82	95.82	95.32	94.82	94.32	93.82
Peso del cemento asfaltico [g]	38.14	50.14	56.14	62.14	68.14	74.14
Peso de grava [g]	418.27	413.95	411.79	409.63	407.47	405.31
Peso de gravilla [g]	278.85	275.97	274.53	273.09	271.65	270.21
Peso de arena [g]	418.27	413.95	411.79	409.63	407.47	405.31
Peso de filler [g]	46.47	45.99	45.75	45.51	45.27	45.03
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 asfaltico 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: Colocación de la muestra al molde en tres capas, cada capa se la compacta con 25 golpes manuales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9: Compactación de la briqueta con el martillo Marshall mecánico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.10: Giro de la briqueta para realizar la compactación en la otra cara.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.11: Proceso de desmolde de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.12: 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 briqueta de ensayo (ASTM D-3549)

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

Para determinar su altura se divide en 4 partes iguales y con la ayuda de un vernier medimos la altura de la briqueta de esta manera obtendremos una altura representativa de la briqueta.

Figura 3.13: Marcado y medición de altura de la briqueta.



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 3.14: 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 ± 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 3.15 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 asfaltico de 3,18 %.

3.8.1 Identificación de briquetas.

Para la identificación de briquetas se las enumero para este caso de porcentaje de cemento asfaltico de 3,18 % 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 3.44: Alturas o espesores de cada briqueta ensayada.

Identificación	Alturas [cm]	Promedio [cm]
1	6.802	6.77
	6.793	
	6.670	
	6.795	
2	6.748	6.73
	6.731	
	6.723	
	6.715	
3	6.671	6.72
	6.681	
	6.854	
	6.676	

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 3,18 %.

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

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

$$\text{Base d agregado} = \frac{3.18 * 100}{100 - 3.18}$$

$$\text{Base d agregado} = 3.28\ \%$$

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 3.45: Peso de briquetas en estado seco.

Identificación	**Peso de briqueta [g]**
1	1191.5
2	1197.3
3	1193.5

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 3.46: Peso de briqueta saturada superficialmente seca (S.S.S.).

Identificación	Peso de briqueta S.S.S [g]
1	1199.3
2	1201.4
3	1196.4

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 3.47: Peso de briqueta sumergida en agua.

Identificación	Peso de briqueta sumergida en agua [g]
1	679.0
2	684.0
3	678.0

Fuente: Elaboración propia.

3.8.5 Volumen de la briqueta.

Para briqueta identificada como 1:

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

$$\text{Volumen de briqueta} = 1199.3 - 679.00$$

$$\textbf{Volumen de briqueta} = \textbf{520.30}\ [\textbf{g}]$$

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

$$\textbf{Volumen de briqueta} = \textbf{520.30}\ [\textbf{cm}^{\textbf{3}}]$$

3.8.6 Densidad de la briqueta.

Para briqueta identificada como 1:

3.8.6.1 Densidad real de la briqueta.

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

$$\text{Densidad real} = \frac{1191.5}{520.30}$$

$$\textbf{Densidad real} = \textbf{2.29}\left[\frac{\textbf{g}}{\textbf{cm}^{\textbf{3}}}\right]$$

3.8.6.2 Densidad máxima teórica de la briqueta.

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

$$\text{Densidad max.} = \frac{100}{\frac{3.28}{1.009} + \frac{100 - 3.28}{2.67}}$$

$$\textbf{Densidad max.} = \textbf{2.54}\ \left[\frac{\textbf{g}}{\textbf{cm}^{\textbf{3}}}\right]$$

3.8.7 Porcentaje de vacíos.

Para briqueta identificada como 1:

3.8.7.1 Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv).

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

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

$$\text{Vv} = \frac{2.54 - 2.30}{2.54} * 100\%$$

$$\mathbf{Vv = 9.20}\ \%$$

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

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

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

$$\text{V. A. M.} = \frac{3.28 * 2{,}30}{1.009} + 9.20\ \%$$

$$\mathbf{V.A.M = 16.37}\ \%$$

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:

$$\text{Estabilidad} = (0.012 * 777 - 0.0812) * 102 * 2.2$$

$$\textbf{Estabilidad} = \textbf{2074.08 libras}$$

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 3.48: 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	2074.08	1877.05
2	6.73	0.92	2001.38	1831.26
3	6.72	0.92	1993.30	1828.85

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado se tiene lo siguiente:

Tabla 3.49: Resultados de estabilidad y fluencia.

Identificación	**Estabilidad [libras]**		**Fluencia [0,01 pulgadas]**	
	Corregida	**Promedio**	**Lecturada**	**Promedio**
1	1877.05	1845.72	9	9.67
2	1831.26		10	
3	1828.85		10	

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:

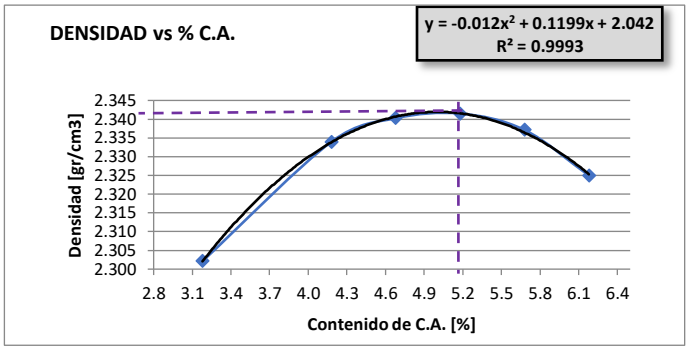
Tabla 3.50: Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional.

Porcentaje de cemento asfáltico [%]	Densidad promedio [g/cm³]	Estabilidad corregida [libras]	Fluencia [pulg.]	% de vacíos de mezcla total [%]	R.B.V. (Relación Betún Vacíos) [%]	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) [%]
3.18	2.302	1845.72	9.67	9.20	43.78	16.37
4.18	2.334	2401.07	10.00	6.40	60.02	16.00
4.68	2.340	2571.44	11.00	5.35	66.86	16.16
5.18	2.342	2610.58	13.33	4.51	72.66	16.48
5.68	2.337	2434.31	15.33	3.88	77.18	16.99
6.18	2.325	2236.14	18.00	3.57	79.93	17.77

Fuente: Elaboración propia.

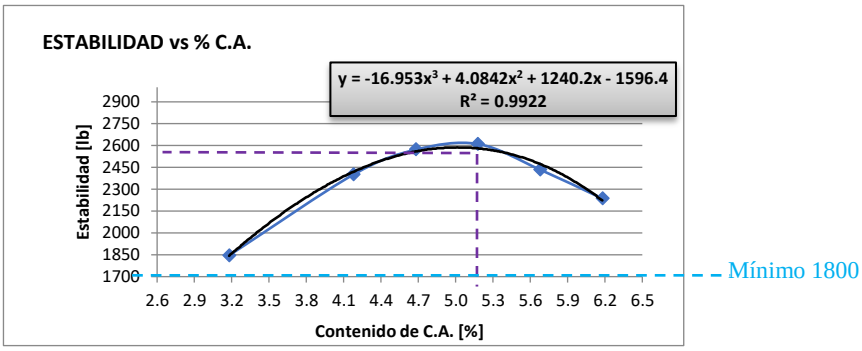
3.10 Determinación del contenido óptimo de cemento asfaltico.

Gráfico 3.7: Porcentaje de cemento asfáltico vs densidad



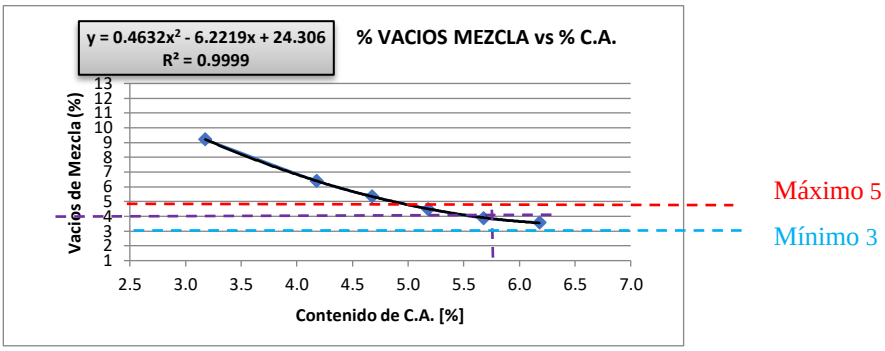
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.8: Porcentaje de cemento asfáltico vs estabilidad corregida.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.9: Porcentaje de cemento asfáltico vs % de vacíos respecto a la mezcla total



Fuente: Elaboración propia.

La obtención del contenido óptimo de cemento asfaltico 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 asfaltico, donde se sacará el promedio y este será el contenido óptimo de cemento asfaltico.

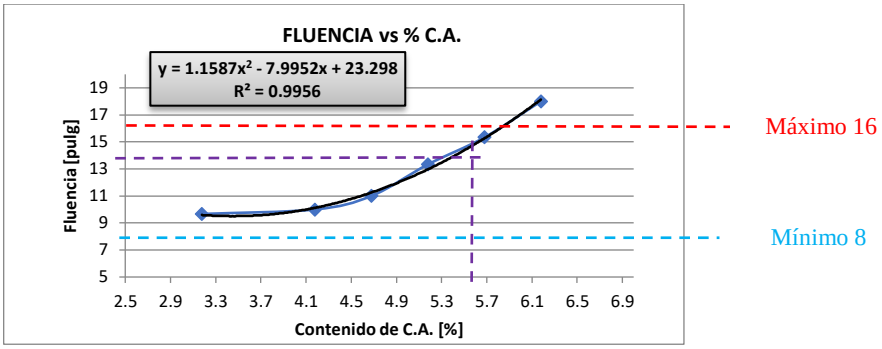
Tabla 3.51: Resultados de las gráficas del ensayo Marshall.

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall [lb]	2579.35	5.20
Densidad máxima [g/cm^3]	2.341	5.20
Vacíos de la mezcla [%]	4.00	5.66
% Porcentaje óptimo de C.A.	**Promedio (%) =**	**5.4**

Fuente: Elaboración propia.

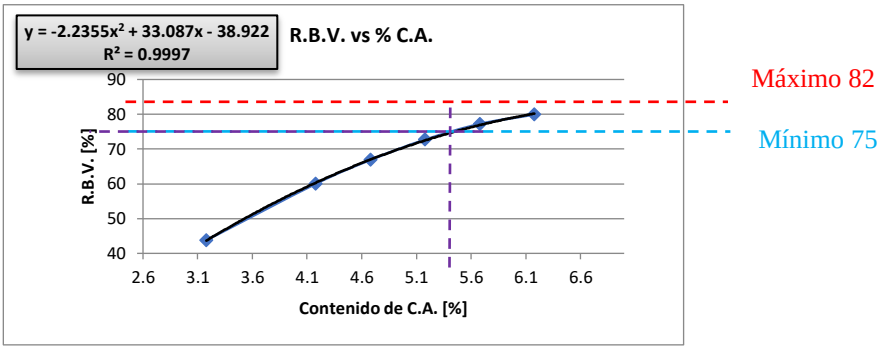
Con el contenido óptimo de cemento asfaltico de 5.4% se verifica en las demás propiedades si cumplen con la norma establecida.

Gráfico 3.10: Porcentaje de cemento asfáltico vs fluencia.



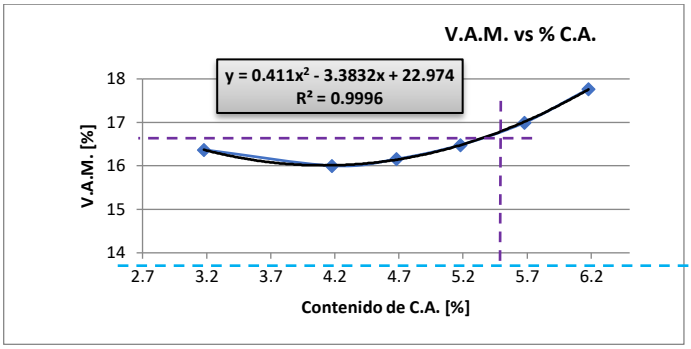
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.11: Porcentaje de cemento asfáltico vs relación betumen vacíos (R.B.V.).



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.12: 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 carbonato de magnesio.

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 3.52: Dosificación con el contenido óptimo de cemento asfaltico variando el porcentaje del carbonato de magnesio como filler.

Identificación	Dosificación				
	Filler [%]	C.A. [%]	Grava [%]	Gravilla [%]	Arena [%]
1	1	5.4	36	24	39
2	2	5.4	36	24	38
3	3	5.4	36	24	37
4	4	5.4	36	24	36
5	5	5.4	36	24	35
6	6	5.4	36	24	34

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.53: 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	94.65	11.36	64.24	408.87	272.58	442.95	1200
2	94.65	22.72	64.24	408.87	272.58	431.59	1200
3	94.65	34.07	64.24	408.87	272.58	420.23	1200
4	94.65	45.43	64.24	408.87	272.58	408.87	1200
5	94.65	56.79	64.24	408.87	272.58	397.52	1200
6	94.65	68.15	64.24	408.87	272.58	386.16	1200

Fuente: Elaboración propia.

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

Figura 3.16: Pesaje del cemento asfaltico y del agregado para realizar briquetas.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.54: Datos obtenidos del ensayo Marshall de mezclas asfálticas con adición del carbonato de magnesio en reemplazo del filler convencional.

Porcentaje de carbonato de magnesio [%]	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	6.61	1186.24	1195.80	682	1010	10
	2	6.53	1197.23	1204.40	685	1075	13
	3	6.53	1195.56	1199.40	681	1055	12
2	4	6.56	1190.20	1197.40	698	1480	14
	5	6.66	1190.10	1200.50	696	1450	12
	6	6.58	1189.36	1196.70	679	1335	14
3	7	6.61	1187.81	1199.10	691	1500	14
	8	6.54	1188.94	1194.70	694	1960	14
	9	6.63	1193.75	1195.70	688	1340	15
4	10	6.82	1199.54	1200.70	699	1700	15
	11	6.70	1194.25	1204.50	695	1450	17
	12	6.53	1198.57	1205.00	699	1600	16
5	13	6.92	1187.56	1193.40	691	1450	19
	14	6.88	1194.57	1202.40	698	1250	16
	15	6.94	1196.87	1201.50	699	1190	15
6	16	6.97	1193.78	1194.90	698	1030	18
	17	6.94	1196.21	1201.20	700	950	16
	18	6.95	1197.88	1200.30	694	1050	18

Fuente: Elaboración propia.

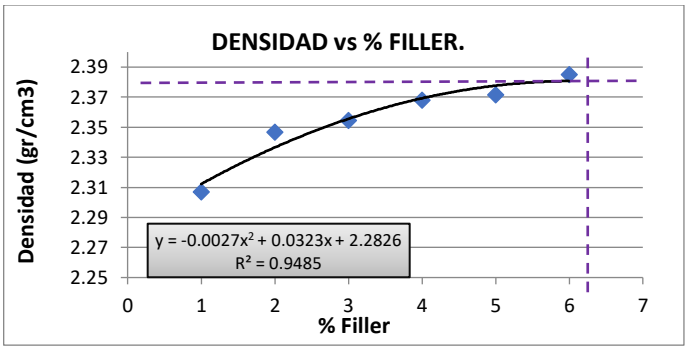
Tabla 3.55: Resultados de las mezclas asfálticas con porcentaje de carbonato de magnesio como filler en reemplazo del convencional.

Porcentaje de carbonato de magnesio [%]	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	2.307	2664.36	11.67	5.62	68.44	17.80
2	2.347	3593.32	13.33	3.99	75.66	16.40
3	2.355	4056.96	14.33	3.67	77.25	16.12
4	2.368	3919.10	16.00	3.13	80.04	15.66
5	2.371	3037.34	16.67	2.99	80.77	15.54
6	2.385	2341.86	17.33	2.43	83.86	15.06

Fuente: Elaboración propia.

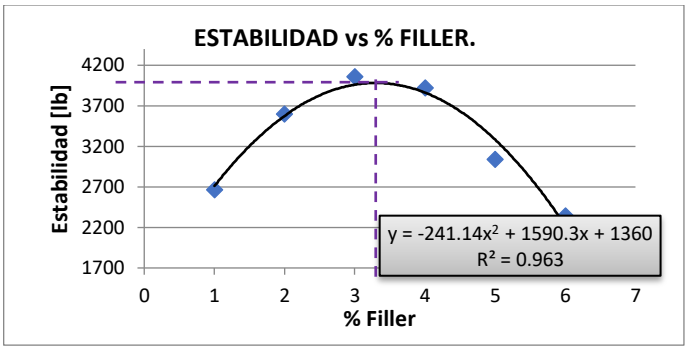
Obtenidos estos resultados se debe graficar las siguientes relaciones:

Gráfico 3.13: Densidad vs filler.



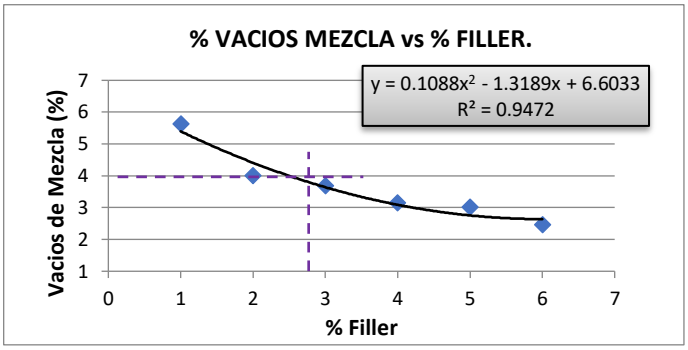
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.14: Estabilidad vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.15: Porcentaje de vacíos de mezcla vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

La obtención del contenido óptimo de carbonato de magnesio 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%

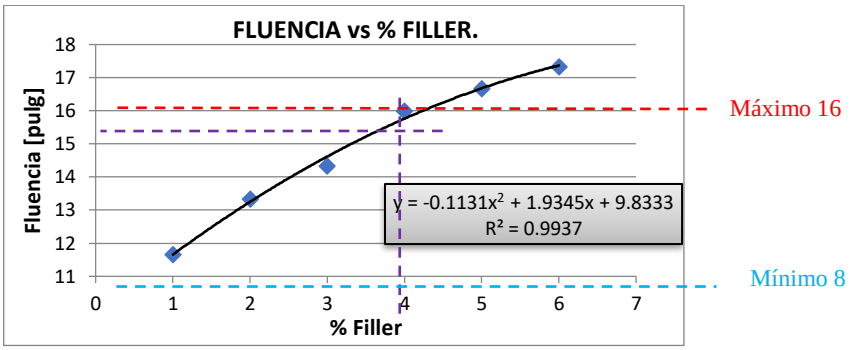
Tabla 3.56: Resultados de las gráficas del ensayo Marshall para el contenido óptimo de carbonato de magnesio.

Ensayo	Valor de Diseño	% de carbonato
Estabilidad Marshall [lb]	3981.98	3.00
Densidad máxima [g/cm^3]	2.379	6.00
Vacíos de la mezcla [%]	4.00	2.48
% Porcentaje óptimo de carbonato	**Promedio [%] =**	**3.8**

Fuente: Elaboración propia.

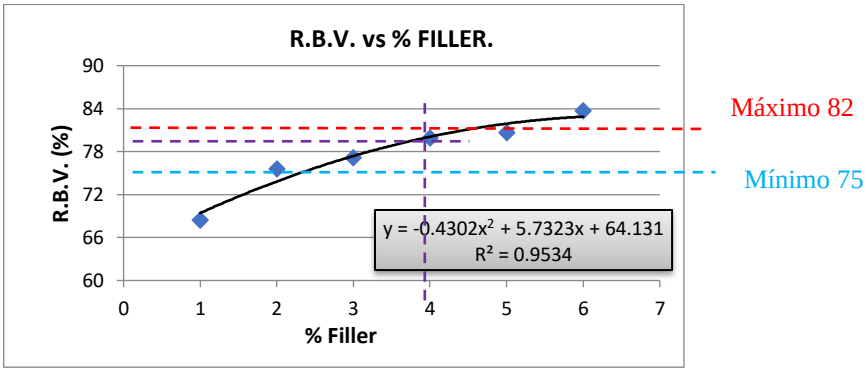
Con el contenido óptimo de carbonato de magnesio de 3.8 % se verifica en las demás propiedades si cumplen con la norma establecida.

Gráfico 3.16: Fluencia vs filler.



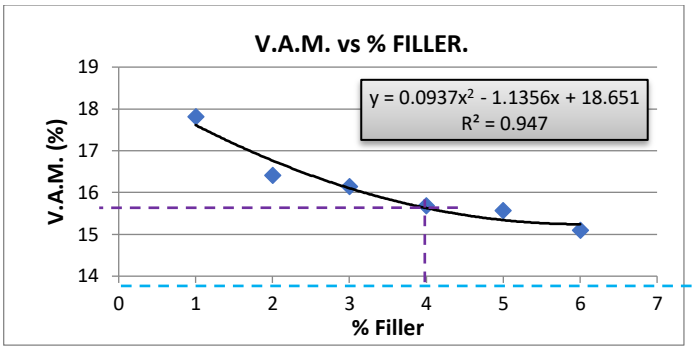
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.17: R.B.V. vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.18: 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 carbonato de magnesio.

Figura 3.17: Ruptura de briquetas.



Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 3.57: 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	6.55	1191.80	1199.30	685.00	850	10
	2	6.59	1203.60	1210.80	687.00	845	12
	3	6.58	1185.60	1191.00	686.00	880	13
2	4	6.57	1209.70	1214.80	684.00	905	12
	5	6.49	1184.60	1191.10	690.00	850	13
	6	6.37	1188.20	1192.80	692.00	1105	12
3	7	6.44	1195.90	1199.50	693.00	1040	10
	8	6.37	1188.10	1193.10	689.00	1400	13
	9	6.41	1195.20	1199.70	692.00	1340	15
4	10	6.34	1186.90	1190.30	691.00	1500	14
	11	6.46	1182.70	1188.50	687.00	1340	13
	12	6.40	1189.80	1193.20	688.00	1405	12
5	13	6.38	1184.30	1187.80	690.00	1445	15
	14	6.40	1184.40	1187.70	686.00	1170	11
	15	6.33	1191.90	1194.80	695.00	1390	15
6	16	6.40	1192.20	1195.60	697.00	1390	14
	17	6.28	1180.40	1183.50	691.00	1320	16
	18	6.32	1191.30	1195.10	689.00	1250	15

Fuente: Elaboración propia.

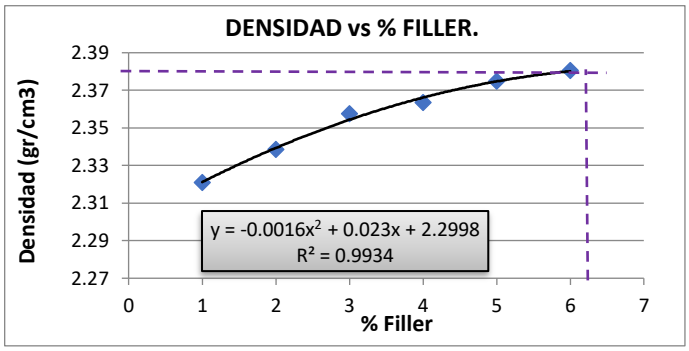
Tabla 3.58: Resultados del ensayo Marshall las mezclas asfálticas con porcentaje de filler convencional.

Porcentajes de filler convencional [%]	Densidad promedio [g/cm³]	Estabilidad [libras]	Fluencia [pulg]	Porcentaje de vacíos de mezcla total [%]	R.B.V. (relación betún vacíos) [%]	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) [%]
1	2.321	2174.14	11.67	5.04	70.87	17.31
2	2.339	2476.21	12.33	4.33	74.07	16.70
3	2.357	3329.64	12.67	3.57	77.76	16.04
4	2.364	3747.51	13.00	3.32	79.00	15.83
5	2.375	3560.14	13.67	2.87	81.42	15.44
6	2.381	3552.08	15.00	2.64	82.67	15.25

Fuente: Elaboración propia.

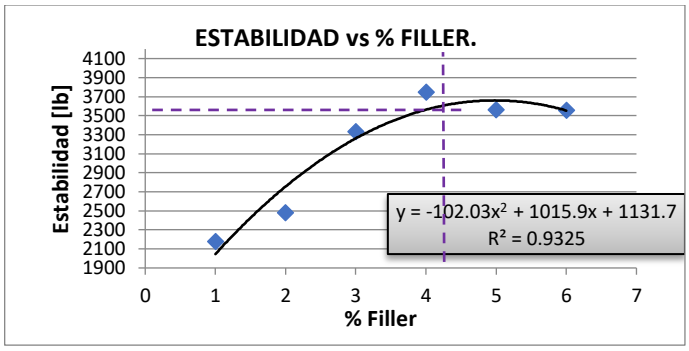
Obtenidos estos resultados se debe graficar las siguientes relaciones:

Gráfico 3.19: Densidad vs filler.



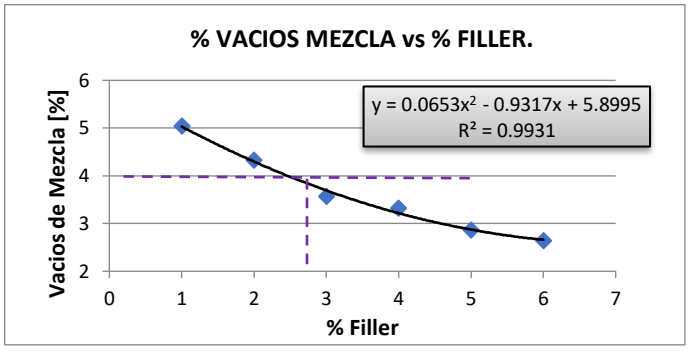
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.20: Estabilidad corregida vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.21: 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%

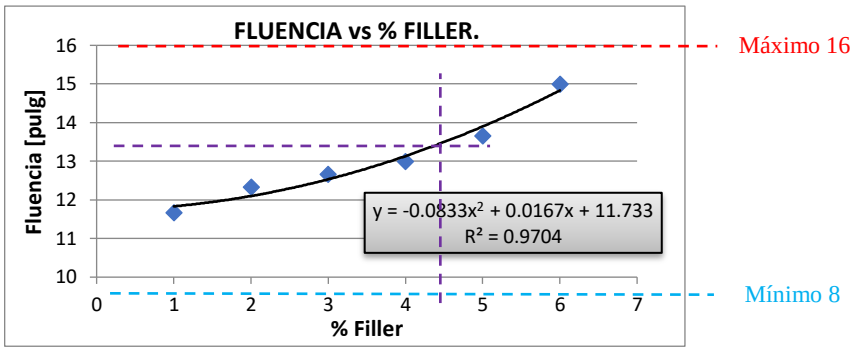
Tabla 3.59: Resultados de las gráficas del ensayo Marshall para el contenido óptimo de filler convencional.

Ensayo	Valor de Diseño	% de filler
Estabilidad Marshall [lb]	3562.82	4.00
Densidad máxima [g/cm^3]	2.380	6.00
Vacíos de la mezcla [%]	4.00	2.29
% Porcentaje óptimo de filler convencional	**Promedio [%] =**	**4.1**

Fuente: Elaboración propia.

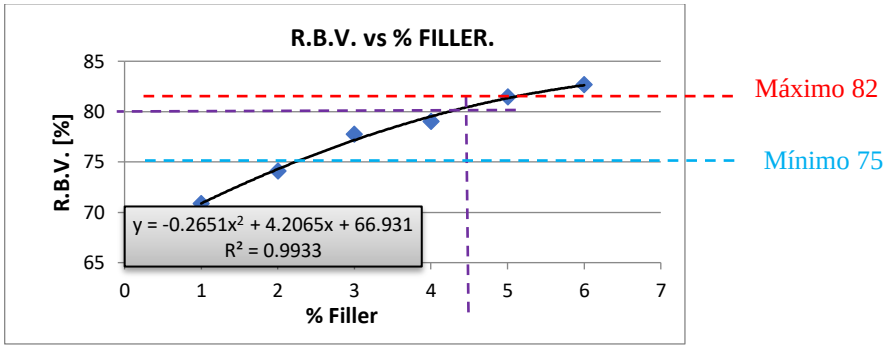
Con el contenido óptimo de filler convencional de 4.1 % se verifica en las demás propiedades si cumplen con la norma establecida.

Gráfico 3.22: Fluencia vs filler.



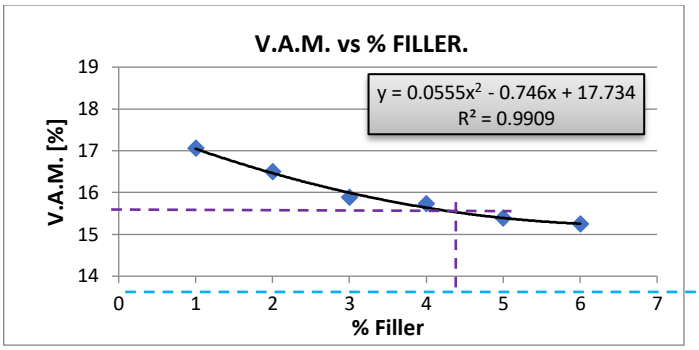
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.23: Relación betumen vacíos (R.B.V.). vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.24: Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs filler.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE DATOS OBSERVADOS

CAPÍTULO IV

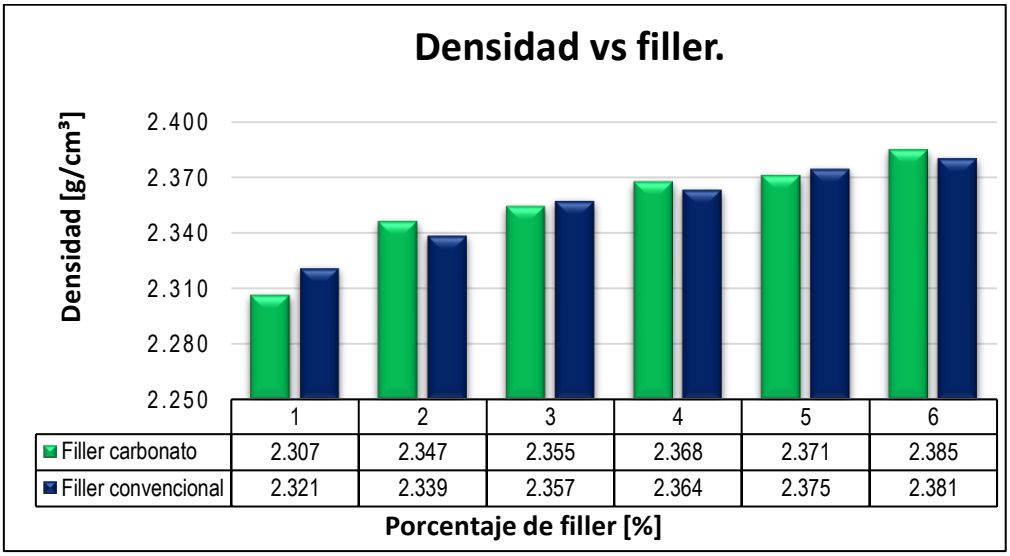
PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

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

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con mezclas asfálticas modificadas con carbonato de magnesio como filler, comparadas con aquellas elaboradas con filler convencional

4.1.1 Densidad vs filler

Gráfico 4.1: Densidad vs filler.



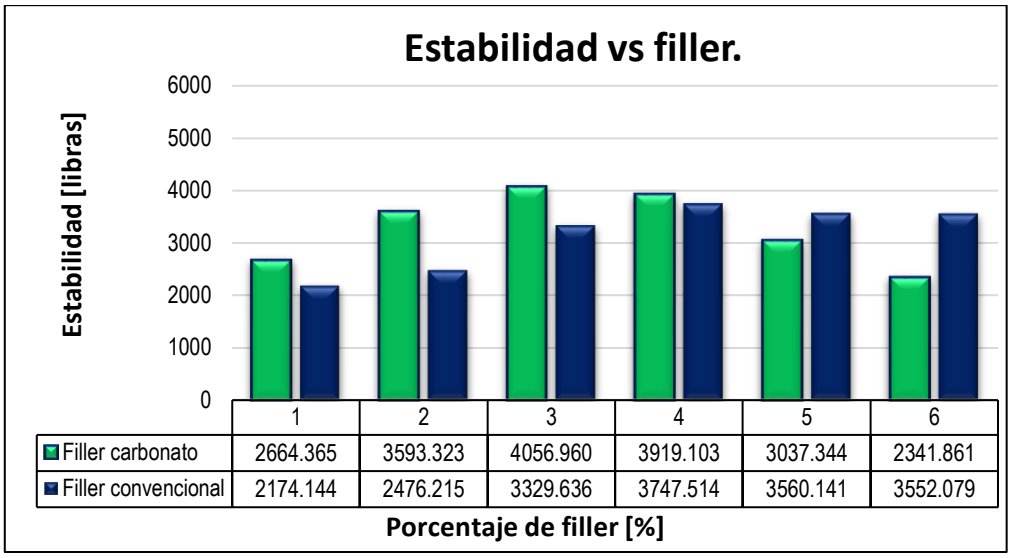
	1	2	3	4	5	6
Filler carbonato	2.307	2.347	2.355	2.368	2.371	2.385
Filler convencional	2.321	2.339	2.357	2.364	2.375	2.381

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la gráfica, a medida que se incrementa el porcentaje de filler, la densidad de la mezcla asfáltica tiende a aumentar, alcanzando un máximo de 2.385 g/cm³ en la mezcla con carbonato de magnesio y 2.381 g/cm³ en el filler convencional. Este comportamiento sugiere una ligera mejora en el empaquetamiento de partículas y una mayor compactación en la mezcla al emplear carbonato de magnesio como filler.

4.1.2 Estabilidad vs filler

Gráfico 4.2: Estabilidad vs filler.



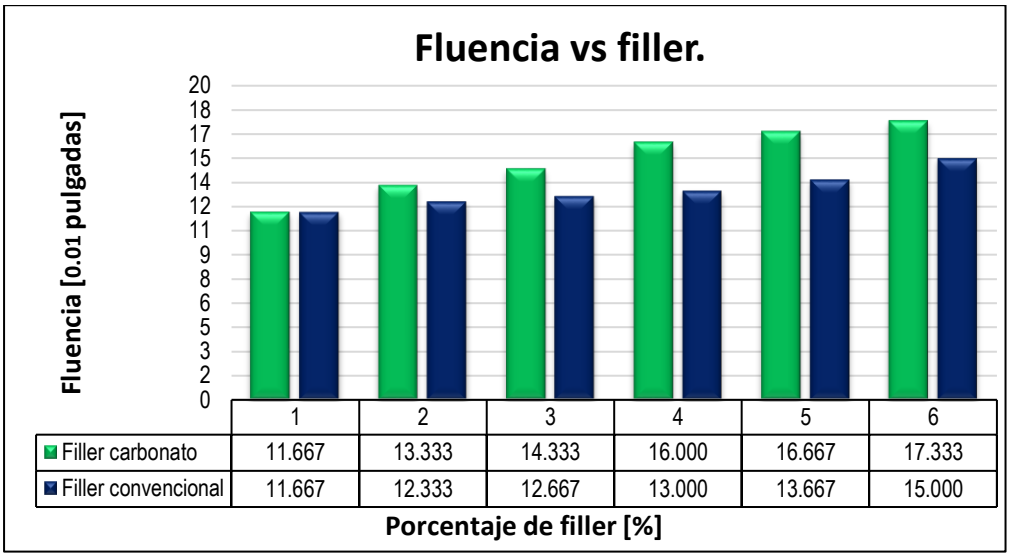
Fuente: Elaboración propia.

La estabilidad mostró un comportamiento parabólico, con un pico máximo de 4056.96 lb en la mezcla con 3% de carbonato, mientras que la mezcla con filler convencional alcanzó un máximo de 3747.51 lb. Esta diferencia demuestra un mejor desempeño estructural del carbonato de magnesio como relleno, especialmente en contenidos entre 3% y 4%.

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

4.1.3 Fluencia

Gráfico 4.3: Fluencia vs filler.



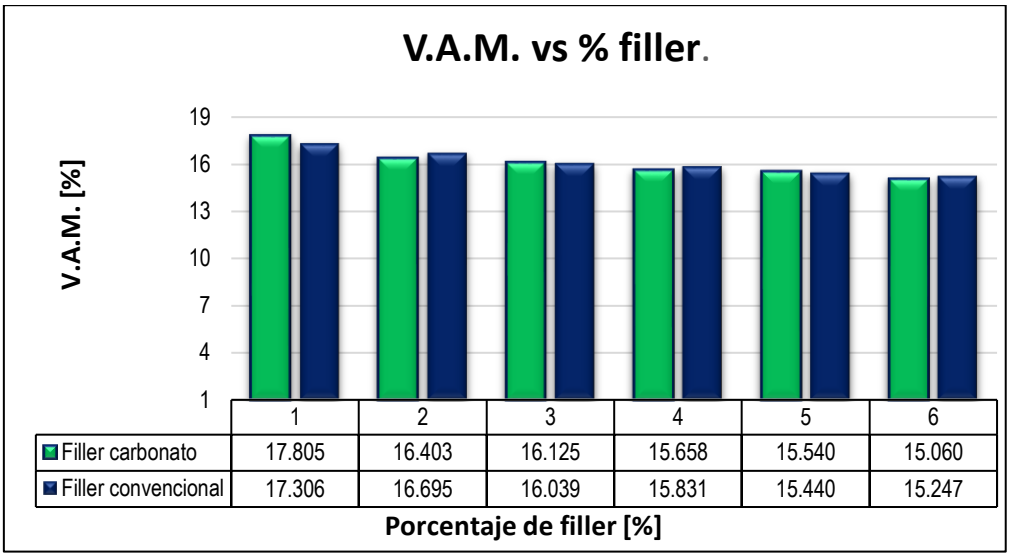
Fuente: Elaboración propia.

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 mezcla con carbonato de magnesio mostró valores entre 11.66 y 17.33 (0.01 pulgadas), estando dentro de un rango aceptable para el diseño Marshall. No obstante, se debe tener cuidado con valores de fluencia elevados en contenidos mayores al 4.5%.

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

Gráfico 4.4: V. A.M. vs % filler.



Fuente: Elaboración propia.

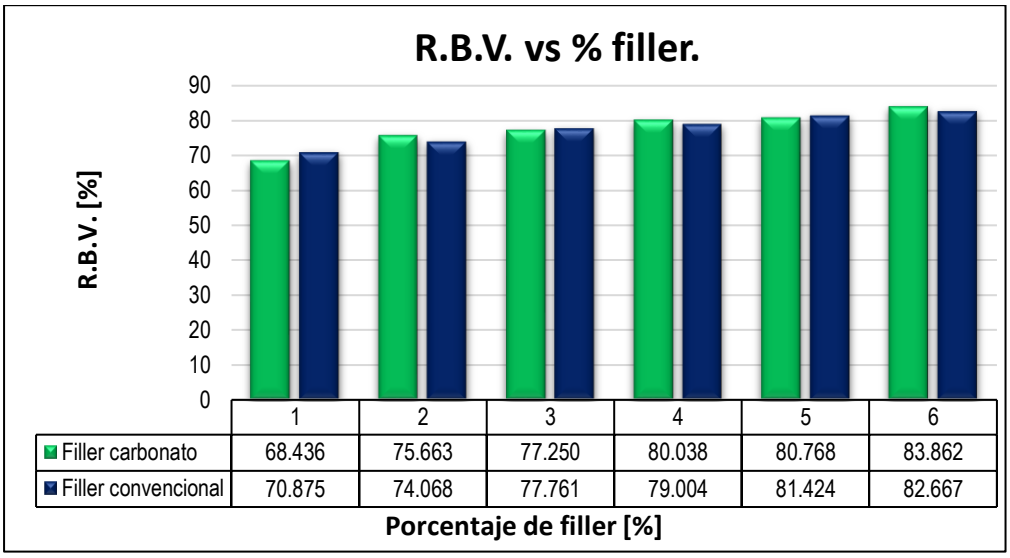
Se observa en la gráfica que el porcentaje de vacíos de agregado mineral disminuye a medida que aumenta la cantidad de filler en la mezcla asfáltica esto se debe a que el filler como material fino llena los espacios vacíos de la mezcla volviéndola menos permeable, pero poca cantidad de vacíos es perjudicial 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 carbonato de magnesio mantuvo valores ligeramente inferiores, descendiendo de 17.80% a 15.06%, lo cual indica mayor aprovechamiento del espacio interno de la mezcla. Ambos cumplen con el mínimo exigido por la normativa.

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

Gráfica 4.5: R.B.V. vs % filler.

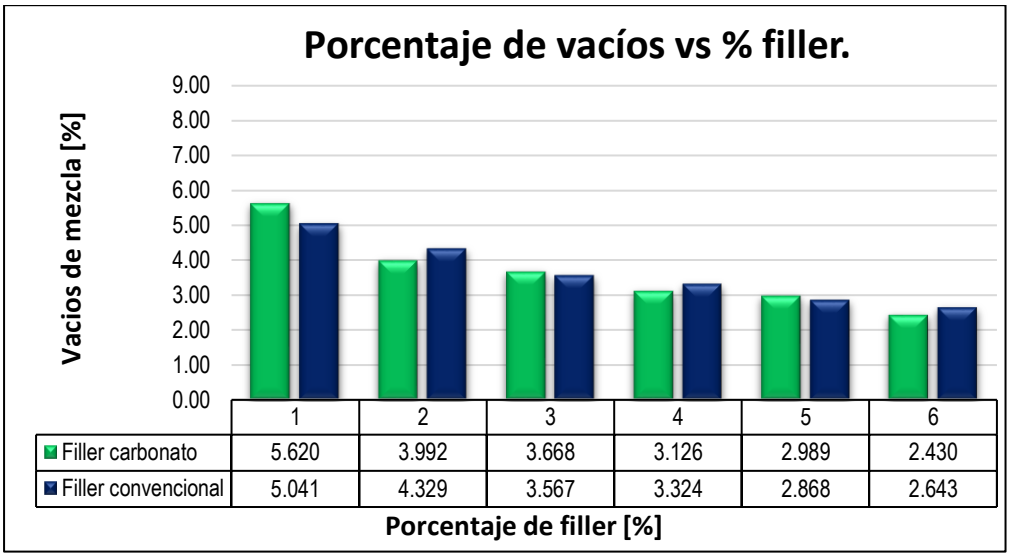


Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que, a medida que se incrementa el porcentaje de filler, la relación betún-vacío (R.B.V.) también aumenta. Esto se debe a que el filler actúa como un agente de unión entre el ligante asfáltico y los agregados, rellenando los vacíos internos de la mezcla y favoreciendo una mejor retención del betún. Al incorporar carbonato de magnesio, se alcanza un valor máximo de 83.86%, ligeramente superior al obtenido con el filler convencional 82.66%. Este resultado indica una mejor resistencia a la humedad y mayor durabilidad de la mezcla frente a procesos de degradación provocados por el agua.

4.1.6 Porcentaje de vacíos % vs % filler

Gráfico 4.6: Porcentaje de vacíos vs % filler



	1	2	3	4	5	6
Filler carbonato	5.620	3.992	3.668	3.126	2.989	2.430
Filler convencional	5.041	4.329	3.567	3.324	2.868	2.643

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se observa que el porcentaje de vacíos disminuye conforme aumenta el contenido de filler. Esto sucede porque el filler, al ser un material muy fino, llena los espacios vacíos entre los agregados, reduciendo la porosidad de la mezcla y disminuyendo su permeabilidad. Sin embargo, en la mezcla con carbonato de magnesio, los vacíos caen por debajo del límite mínimo aceptable del 3% a partir de un 4% de contenido de filler. El valor más bajo registrado fue de 2.43%, lo cual puede generar problemas como exudación o sangrado si no se controla la cantidad de filler utilizada en la mezcla.

4.2 Organización de resultados

Se organiza valores de lo procesado en el capítulo anterior

Tabla 4.1: Resultado del contenido óptimo de filler carbonato de magnesio.

Ensayo	% de filler	Valor de Diseño	Especificación
Densidad [g/cm^3]	3.8%	2.3667	
Estabilidad Marshall [lb]		3914.27	>1800
Vacíos de la mezcla [%]		3.15	3-5
Fluencia [pulg]		15.58	8-16
R.B.V. [%]		79.77	75-82
V.A.M. [%]		15.68	>13

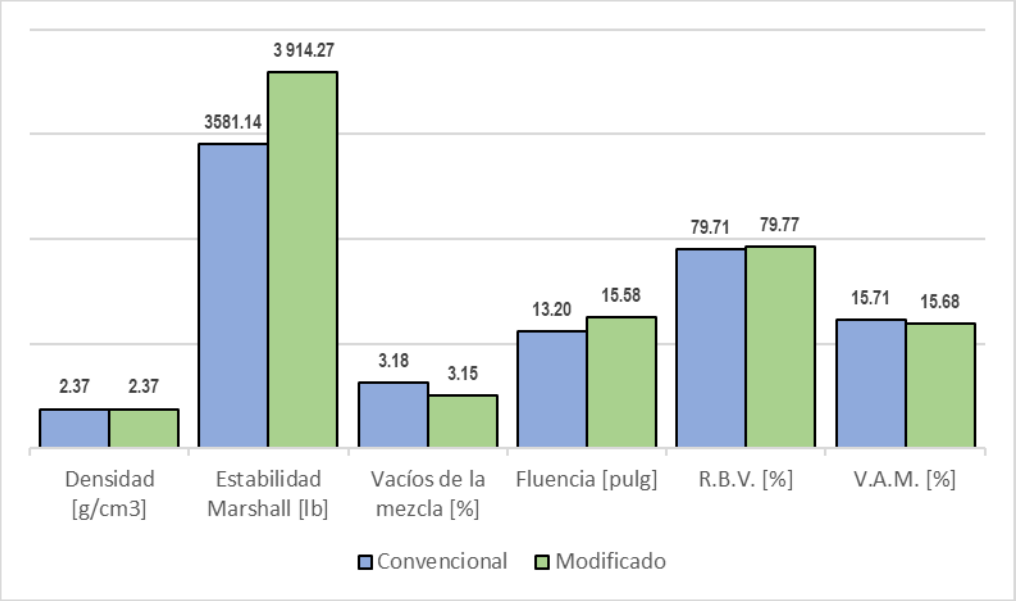
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2: Resultado del contenido óptimo de filler convencional.

Ensayo	% de filler	Valor de Diseño	Especificación
Densidad [g/cm^3]	4.1%	2.3672	
Estabilidad Marshall [lb]		3581.14	>1800
Vacíos de la mezcla [%]		3.18	3-5.
Fluencia [pulg]		13.20	8-16.
R.B.V. [%]		79.71	75-82
V.A.M. [%]		15.71	>13

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.7: Propiedades de las mezclas asfálticas: filler optimo convencional vs filler optimo carbonato de magnesio.



Fuente: Elaboración propia.

Para el filler convencional de grafica se eligió el porcentaje de 4.1% ya que este cumple con las especificaciones establecidas en la norma, de la misma manera para el filler modificado se elegio un 3.8%.

Haciendo una comparación de las propiedades, se puede observar que existe poca variación en las propiedades de V.A.M. (15.71% vs. 15.68%), R.B.V. (79.71% vs. 79.77%), fluencia (13.20 pulgadas vs. 15.58 pulgadas) y densidad (2.37 g/cm³ para ambos casos). Sin embargo, se evidencia una diferencia significativa en la estabilidad Marshall, donde el filler modificado alcanza 3914.27 lb, superando al filler convencional que logra 3581.14 lb. Se procedió a realizar el ensayo de estabilidad para poder comprobar que, si mejora dicha propiedad, para poder verificar se realizaron 30 ensayos de estabilidad, 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 3.8% de filler carbonato de magnesio

Nº de muestra	Estabilidad [libras]
1	3833.91
2	3853.43
3	3886.04
4	3947.42
5	3953.07
6	3981.31
7	3981.64
8	4038.60
9	4064.35
10	4083.09
11	4085.81
12	4088.13
13	4135.74
14	4137.63
15	4143.62
16	4192.49
17	4264.15
18	4287.48
19	4365.23
20	4373.16
21	4374.57
22	4551.71
23	4606.75
24	4695.12
25	4727.37
26	4788.43
27	4793.66
28	4872.84
29	4967.05
30	5140.62

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Estadística descriptiva del ensayo de estabilidad

Datos de los ensayos de estabilidad al 3.8% de filler carbonato de magnesio.

1. Ordenar los datos de menor a mayor.

Tabla 4.4: Datos del ensayo de estabilidad al 3.8% de filler carbonato de magnesio.

3833.91	3981.64	4135.74	4365.23	4727.37
3853.43	4038.60	4137.63	4373.16	4788.43
3886.04	4064.35	4143.62	4374.57	4793.66
3947.42	4083.09	4192.49	4551.71	4872.84
3953.07	4085.81	4264.15	4606.75	4967.05
3981.31	4088.13	4287.48	4695.12	5140.62

Fuente: Elaboración propia.

2. Obtención del rango.

N = 30

X_{Max} = 5140.62

X_{Min} = 3833.91

Rango = 1306.71

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

Nº clase = 6

4. Amplitud de cada intervalo.

Amplitud = 217.785

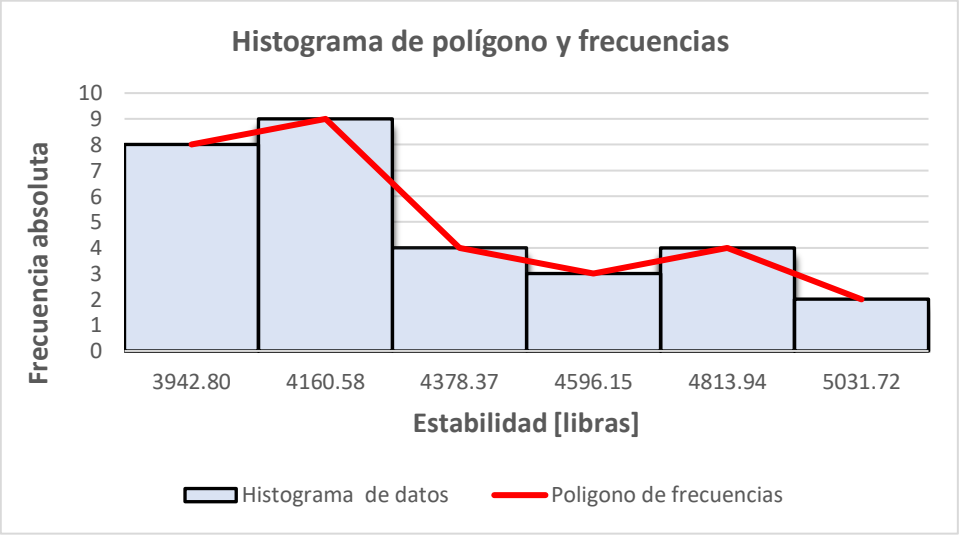
5. Cálculo de los intervalos de clase, marca de clase, frecuencia absoluta y relativa.

Tabla 4.5: Cálculo de frecuencia absoluta y relativa.

Límite Inferior	Limite Superior	Marca de clase [libras]	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
3833.91	4051.69	3942.80	8	8	26.67	26.67
4051.69	4269.48	4160.58	9	17	30.00	56.67
4269.48	4487.26	4378.37	4	21	13.33	70.00
4487.26	4705.05	4596.15	3	24	10.00	80.00
4705.05	4922.83	4813.94	4	28	13.33	93.33
4922.83	5140.62	5031.72	2	30	6.67	100.00
			30	100		

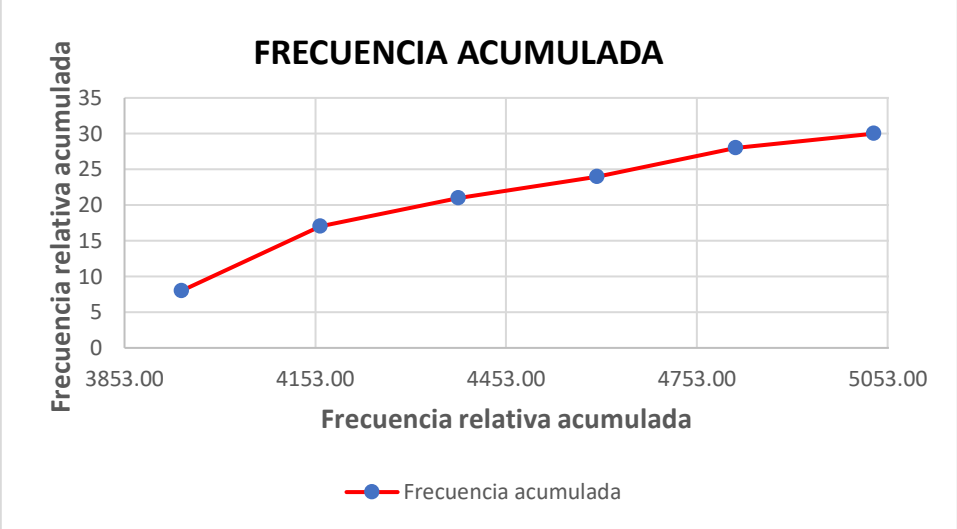
Fuente: Elaboración propia.

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 4.6: Resultados de cálculos de medias de tendencia central de los ensayos de estabilidad al 3.8% de filler carbonato de magnesio.

Medida de tendencia	Resultado	Unidad
Media	4307.15	libras
Error típico	66.60	
Mediana	4168.05	libras
Desviación estándar	364.83	
Varianza de la muestra	133102.11	
Curtosis	-0.59	
Coeficiente de asimetría	0.71	
Rango	1306.71	libras
Mínimo	3833.91	libras
Máximo	5140.62	libras
Suma	129214.41	libras
Cuenta	30.00	
Nivel de confianza (95.0 %)	130.55	

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Estadística inferencial

Tabla 4.7: 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=	66.60
Error probable	Ep=	130.55

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.8: Cálculo del rango de confianza.

Rango de confianza	Va= X± Ep
Va=	4437.70
Va=	4176.59

Fuente: Elaboración propia.

Intervalo de confianza: 4437.70 libras - 4176.59 libras

Asociación de hipótesis de investigación:

Hipótesis de investigación causal/explicativa:

"La mezcla asfáltica elaborada con carbonato de magnesio **mejora** la estabilidad Marshall frente a una mezcla asfáltica convencional".

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

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

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

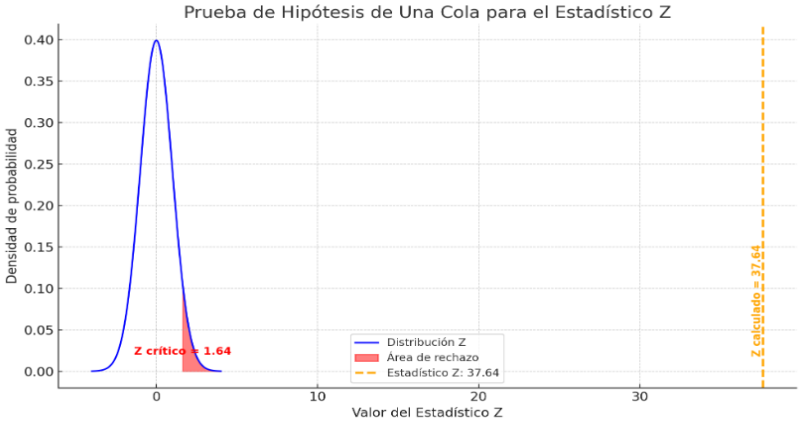
Su interpretación es: "La mezcla asfáltica elaborada con carbonato de magnesio **desmejora** la estabilidad Marshall frente a una mezcla asfáltica convencional".

Tabla 4.9: Prueba de hipótesis por el método Z Normal.

Prueba de hipótesis		
1ra Hipótesis $H_o: \bar{x} \leq 1800$ libras		
2da Hipótesis $H_1: \bar{x} > 1800$ libras		
Significancia **α =**	0.05	
Media muestral **x =**	4307.15	libras
Numero de datos **n =**	30	
Desviación estándar **s =**	364.83	
Media poblacional **μ =**	1800	libras
variable estandarizada **(Zt)=**	1.64	
Cálculo de la variable estandarizada **(Zc)=**	37.6398	
Zc>=Zt 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 (Zc) para esta prueba es mayor a (Zt), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que la cantidad optima de carbonato de magnesio mejora la estabilidad (resistencia a la deformación) de la mezcla asfáltica.

H_o : La hipótesis nula se rechaza

H_1 : La hipótesis alternativa se acepta

Por lo tanto, al estar asociada la hipótesis de investigación con la hipótesis alternativa; se verifica que esta se encuentra con un valor de verdad VERDADERO, en tal sentido, la hipótesis de Investigación es aceptada.

4.5 Especificación técnica

4.5.1 Concepto de objeto de investigación

La mezcla asfáltica elaborada con carbonato de magnesio mejora la estabilidad 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.

4.5.2 Materiales y equipo

4.5.2.1 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 rio Sella, este material se solicitó a la alcaldía municipal de Tarija.

- Cemento asfaltico 85-100

El cemento asfaltico es de procedencia peruana de la marca REPSOL que se lo solicito a la alcaldía municipal de Tarija.

-Carbonato de magnesio

El carbonato de magnesio se lo obtuvo de Telchi litel que se encuentra en la ciudad de Santa Cruz, el cual es una distribuidora de este material.

4.5.2.2 Equipo utilizado para la investigación

- 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.

- 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.

- 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 briqueta después de la compactación.

- 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.

4.5.3 Procedimiento y rango de medición

Se realizo la modificación de mezcla asfáltica adicionando el porcentaje de carbonato de magnesio el cual se debe mezclar con el agregado grueso y fino (en estado seco) para obtener una mezcla homogénea, se calentó el cemento asfaltico 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 asfaltico se distribuya uniformemente a través de la mezcla asegurando que todos los componentes se integren correctamente.

Para hallar el porcentaje óptimo de carbonato de magnesio que mejora la estabilidad de una mezcla asfáltica, se plantearon seis porcentajes (1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%), se optó por el 3.8% 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 modificada con carbonato de magnesio al 3.8% es ideal para climas cálidos por su alta estabilidad y buena fluencia, lo que evita deformaciones. Además, soporta tráfico medio a alto, ya que cumple con los requisitos de durabilidad y resistencia del método Marshall

4.5.4 Medición de la variable

La variable de la presente investigación vendría a ser la adición del carbonato de magnesio mejora la estabilidad 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 3.8% de carbonato de magnesio 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, se realizó un cálculo estadístico inferencial para determinar los rangos de confianza de una mezcla asfáltica con filler carbonato de magnesio.

4.6 Análisis del precio de producción de la mezcla asfáltica convencional Composición de la mezcla

Para el análisis de precio unitario se lo realizara para 1 m3 de carpeta asfáltica con un espesor de 5 cm.

Base de Cálculo

• Densidad de la mezcla compactada: 2.38 g/cm³ = 2380 kg/m³

• Peso de briqueta de referencia: 1200 g

• Factor de conversión a m³: 2380 / 1.2 = 1925

•Dosificación optima de cemento asfáltico =5.35%

Tabla 4.10. Composición mezcla convencional.

Componente	**Mezcla Convencional**
Cemento Asfaltico	5.35 %
Agregado Total	94.65 %
Grava	36.00 %
Gravilla	24.00 %
Arena	35.90 %
Filler	4.10 %
TOTAL	100 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.11. Dosificación para 1 m3 mezcla asfáltica convencional.

Componente	Peso por briqueta [g]	Peso por m³ [kg]	Densidad [kg/m³]	Volumen por m³ [m³]
Cemento asfáltico	64.2	127.4	1009	0.1263
Grava	408.9	811.0	2687	0.3019
Gravilla	272.6	540.7	2703	0.2001
Arena	407.8	808.8	2641	0.3062
Filler	46.5	92.3	2651	0.0348
Total	1200.0	2380.2	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.12. Análisis de precios unitarios de una carpeta asfáltica convencional.

Descripción	**Und.**	**Rendimiento**	**Precio Productiv.**	**Costo Total**
1.- MATERIALES				
Cemento asfáltico 85-100	Kg	127.414	13.500	1 720.10
Grava triturada 3/4"	m3	0.302	136.500	41.20
Gravilla triturada 3/8"	m3	0.200	122.000	24.41
Arena	m3	0.306	120.000	36.74
Filler	m3	0.035	150.000	5.19
Diesel	L	2.000	9.800	19.60
			TOTAL, MATERIALES	**1 847.24**
2.- MANO DE OBRA				
Operador de equipo pesado	HR.	0.040	23.000	0.92
Operador de volqueta	HR.	0.030	16.500	0.50
Operador de planta	HR.	0.040	21.000	0.84
Mecánico de equipo pesado	HR.	0.030	22.500	0.68
Ayudante	HR.	0.060	15.000	0.90

BENEFICIOS SOCIALES - %			71.18%	2.73
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - %			14.94%	0.98
			TOTAL, MANO DE OBRA	**7.54**
3.- EQUIPO Y MAQUINARIA				
Planta asfáltica	HR.	0.004	3 600.000	14.40
Compactadora neumática	HR.	0.002	260.000	0.52
Compactadora de rodillo	HR.	0.005	285.000	1.43
Terminadora de asfalto	HR.	0.010	410.000	4.10
Cargador frontal 150 HP	HR.	0.003	380.000	1.14
Volqueta 6 m3	HR.	0.035	110.000	3.85
Herramientas menores	HR.	6.000	0.036	0.22
			TOTAL, EQUIPO Y MAQUINARIA	**25.65**
4.- GASTOS GENERALES				
GASTOS GENERALES - %			10.00%	184.99
			TOTAL, GASTOS GENERALES	**184.99**
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD - %			10.00%	199.51
			TOTAL, UTILIDAD	**199.51**
6.- IMPUESTOS				
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - %			3.09%	67.81
			TOTAL, IT	**67.81**
			TOTAL, PRECIO UNITARIO	**2 332.74**

Fuente: Elaboración propia.

4.7 Análisis del precio de producción de la mezcla asfáltica modificada

Base de Cálculo

• Densidad de la mezcla compactada: 2.37 g/cm³ = 2379kg/m³

• Peso de briqueta de referencia: 1200 g

• Factor de conversión a m³: 2379 / 1.2 = 1982

•Dosificación optima de cemento asfáltico =5.35%

Tabla 4.13. Composición mezcla modificada.

Componente	**Mezcla Convencional**
Cemento Asfaltico	5.35 %
Agregado Total	94.65 %
Grava	36.00 %

Gravilla	24.00 %
Arena	36.17 %
Filler	3.8 %
TOTAL	100 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14. Dosificación para 1 m3 mezcla asfáltica modificada.

Componente	Peso por briqueta [g]	Peso por m³ [kg]	Densidad [kg/m³]	Volumen por m³ [m³]
Cemento asfáltico	64.2	127.4	1009	0.1262
Grava	408.9	810.7	2687	0.3017
Gravilla	272.6	540.4	2703	0.2000
Arena	410.8	814.5	2641	0.3084
Filler	43.5	86.2	2667	0.0323
Total	1200.0	2379.2	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.15. Análisis de precios unitarios de una carpeta asfáltica modificada.

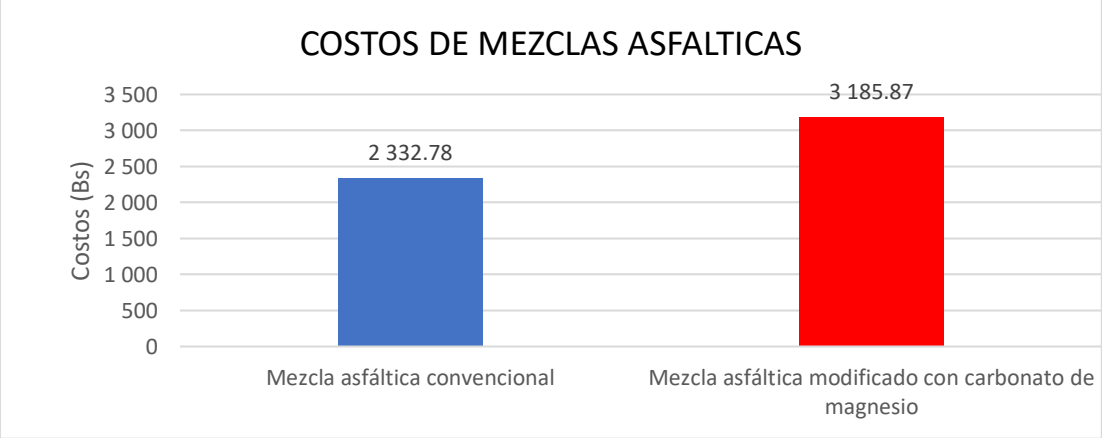
Descripción	Und.	Rendimiento	Precio Productiv.	Costo Total
1.- MATERIALES				
Cemento asfáltico 85-100	Kg	127.361	13.500	1 719.37
Grava triturada 3/4"	m3	0.302	136.500	41.19
Gravilla triturada 3/8"	m3	0.200	120.000	24.00
Arena	m3	0.308	122.000	37.62
Filler carbonato de magnesio	Kg	86.2	8.00	689.49
Diesel	L	2.000	9.800	19.60
			TOTAL, MATERIALES	**2 531.26**
2.- MANO DE OBRA				
Operador de equipo pesado	HR.	0.040	23.000	0.92
Operador de volqueta	HR.	0.030	16.500	0.50
Operador de planta	HR.	0.040	21.000	0.84
Mecánico de equipo pesado	HR.	0.030	22.500	0.68
Ayudante	HR.	0.060	15.000	0.90
BENEFICIOS SOCIALES - %			71.18%	2.73
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - %			14.94%	0.98
			TOTAL, MANO DE OBRA	**7.54**
3.- EQUIPO Y MAQUINARIA				
Planta asfáltica	HR.	0.004	3 600.000	14.40
Compactadora neumática	HR.	0.002	260.000	0.52

Compactadora de rodillo	HR.	0.005	285.000	1.43
Terminadora de asfalto	HR.	0.010	410.000	4.10
Cargador frontal 150 HP	HR.	0.003	380.000	1.14
Volqueta 6 m3	HR.	0.035	110.000	3.85
Herramientas menores	HR.	6.000	0.036	0.22
			TOTAL, EQUIPO Y MAQUINARIA	**25.65**
4.- GASTOS GENERALES				
GASTOS GENERALES - %			10.00%	253.39
			TOTAL, GASTOS GENERALES	**253.39**
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD - %			10.00%	274.67
			TOTAL, UTILIDAD	**274.67**
6.- IMPUESTOS				
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - %			3.09%	93.36
			TOTAL, IT	**93.36**
			TOTAL, PRECIO UNITARIO	**3 185.87**

Fuente: Elaboración propia.

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

Gráfico 4.10: Comparación de precio de carpeta asfáltica.



Fuente: Elaboración propia.

Aunque técnicamente el filler carbonato de magnesio mejora la estabilidad de una mezcla asfáltica levemente, económicamente como se observa en la gráfica hay una diferencia de 853.09 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 estabilidad de una mezcla asfáltica con la adición de carbonato de magnesio 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 optimo el cual fue del 3.8%, dicho porcentaje mejora esta propiedad.
- Los objetivos específicos planteados se cumplieron, se recopilo información de mezclas asfálticas modificadas con diferentes materiales el cual fueron usados como filler, el cual sirvió de respaldo de la investigación planteada.
- Se realizo la caracterización de los agregados y del objeto de investigación carbonato de magnesio, 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 asfaltico se elaboraron 18 briquetas variando el porcentaje de cemento asfaltico del cual se obtuvieron gráficas y se determinó el contenido óptimo de cemento asfaltico para un 4% de vacíos.
- Se elaboro 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 carbonato de magnesio, del cual mediante graficas se comparó el comportamiento tanto del filler convencional como el carbonato de magnesio en una mezcla asfáltica.

- La incorporación de carbonato de magnesio no mostró una mejora significativa en las propiedades Marshall de la mezcla asfáltica. Sin embargo, incrementó el costo en 853.09 Bs/m³ (36.6%), lo que no se justifica técnicamente. Por lo tanto, no se recomienda su uso, ya que aumenta el costo sin mejorar de manera importante el desempeño de la mezcla.

5.2 Recomendaciones

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

- Se recomienda mezclar bien los agregados para tener una mezcla homogénea para asegurar una distribución uniforme de cargas, una mejor adherencia entre el cemento asfaltico 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 asfaltico demasiado tiempo ya que se alteran sus propiedades físicas y químicas, esto puede resultar en una disminución de la viscosidad del cemento asfaltico, lo que afecta la capacidad de mezcla para adherirse y mantener su cohesión.
- 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 representativo.