

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES

La estabilización asfáltica mediante la incorporación de emulsiones asfálticas ha sido estudiada a nivel internacional por su potencial para optimizar la construcción de pavimentos flexibles, especialmente en condiciones de aplicación en frío. Desde principios de la década pasada, diversos investigadores han evidenciado que el uso de emulsiones de rompimiento lento permite un tiempo de manejabilidad extendido, lo que posibilita una distribución más uniforme del ligante asfáltico y, en consecuencia, una mejor cohesión de la mezcla (Sarmiento, 2012). Estas investigaciones pioneras se centraron en demostrar que el comportamiento reológico de las emulsiones, al romperse de manera controlada, favorece la adherencia entre el cemento asfáltico y los agregados, minimizando problemas de segregación y optimizando la compactación de la mezcla.

En estudios internacionales posteriores se ha profundizado en la influencia de la composición química y del tipo de emulsificante sobre la estabilidad de las emulsiones asfálticas. Estas investigaciones han demostrado que la modificación de los parámetros de formulación, como el ajuste en la concentración de emulsificantes y la selección adecuada del cemento asfáltico, resulta esencial para mejorar la interacción con los agregados, lo que a su vez reduce la formación de natas y sedimentos durante el almacenamiento y favorece una distribución más homogénea del ligante. La evidencia experimental recopilada ha confirmado que la rotura lenta de la emulsión, al permitir una liberación gradual del asfalto, es clave para obtener una película asfáltica continua y uniforme, que garantiza una adecuada adhesión sobre la superficie de los agregados (Mendoza, 2021).

A nivel nacional, la experiencia en la aplicación de estas tecnologías ha permitido adaptar y validar metodologías internacionales en contextos locales. Investigaciones realizadas en Bolivia han mostrado que la densidad de los agregados es un factor determinante en la eficiencia del proceso de estabilización asfáltica. En este sentido, estudios han demostrado que la combinación de emulsiones catiónicas de rompimiento lento con agregados de mayor densidad produce pavimentos con mejoras significativas en términos de estabilidad, resistencia mecánica y durabilidad (Bermúdez, 2019).

La integración de criterios de calidad y el análisis de los parámetros de la mezcla mediante el método Marshall han permitido establecer relaciones claras entre la densidad de los agregados y el comportamiento del ligante, evidenciando la importancia de ajustar las proporciones y condiciones de mezcla de acuerdo a las características locales del material.

La revisión de la literatura evidencia que, tanto en el ámbito internacional como nacional, se ha apostado por optimizar el desempeño de las mezclas asfálticas mediante el control de la rotura de las emulsiones asfálticas. Las investigaciones resaltan la importancia de comprender los mecanismos de interacción entre los componentes de la emulsión y los agregados, puesto que estos determinan la formación de la película asfáltica y, por ende, la capacidad del pavimento para soportar cargas y resistir fenómenos de deformación (Vargas, 2021). La relevancia de este enfoque radica en que, al lograr un mejor entendimiento de los factores que afectan la estabilidad de la mezcla, es posible desarrollar estrategias más eficientes y adaptadas a las condiciones climáticas y materiales de cada región.

Esta línea de investigación ha permitido no solo consolidar conocimientos teóricos, sino también la implementación de prácticas experimentales que evaluaron la dosificación óptima de emulsión y la selección de agregados mediante ensayos de laboratorio, utilizando como base el método Marshall modificado. Estos estudios han servido de antecedente para la aplicación de técnicas avanzadas en la caracterización de materiales y en el diseño de mezclas asfálticas, lo que ha contribuido a mejorar la calidad y durabilidad de las infraestructuras viales.

1.1. JUSTIFICACIÓN

La estabilización asfáltica es un proceso fundamental en la construcción y mantenimiento de carreteras, así como en otras infraestructuras viales. Este proceso permite mejorar la capacidad de soporte del suelo y proporciona una superficie resistente y duradera, esencial para soportar las cargas vehiculares y las condiciones climáticas adversas a las que se enfrenta la infraestructura vial. Las emulsiones asfálticas catiónicas se han convertido en una de las soluciones más empleadas en la estabilización asfáltica debido a su capacidad para mejorar las propiedades de los agregados, facilitando la adherencia y contribuyendo a la formación de una capa superficial homogénea y resistente.

Sin embargo, el uso de emulsiones catiónicas en combinación con agregados de diferente densidad plantea ciertos desafíos técnicos. Una de las preocupaciones principales radica en el potencial impacto negativo que esta combinación puede tener sobre la estabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica.

Problemas como la pérdida de cohesión, la segregación de los agregados y la falta de adherencia entre la capa asfáltica y la base subyacente pueden surgir, comprometiendo la integridad y la vida útil de la infraestructura. Estos efectos no solo afectan la calidad de la superficie vial, sino que también pueden aumentar los costos de mantenimiento y reducir la seguridad del tránsito vehicular.

La justificación de esta investigación radica en la necesidad de comprender en profundidad los efectos de la rotura lenta de emulsiones catiónicas cuando se combinan con agregados de diferente densidad. El conocimiento detallado de estos efectos es crucial para optimizar las técnicas de estabilización asfáltica y garantizar que las mezclas resultantes cumplan con los estándares de calidad y durabilidad requeridos para las infraestructuras viales.

A través de este estudio, se busca identificar las condiciones y factores que influyen en la calidad de la superficie asfáltica, lo que permitirá desarrollar estrategias efectivas para prevenir o mitigar los efectos adversos asociados con la rotura lenta de emulsiones.

1.2. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

1.2.1. Planteamiento del Problema

La estabilización asfáltica con emulsiones catiónicas de rotura lenta es una técnica ampliamente adoptada en la construcción de pavimentos flexibles, debido a su facilidad de aplicación en frío, su bajo impacto ambiental y los menores riesgos operativos que conlleva en comparación con los métodos convencionales en caliente. Sin embargo, aún no se comprende con claridad cómo la rotura lenta de las emulsiones catiónicas, al interactuar con agregados de mayor densidad, influye en las propiedades mecánicas de las mezclas utilizadas en la estabilización de pavimentos flexibles, especialmente bajo condiciones variables de carga y temperatura.

La densidad de los áridos influye de manera directa en la distribución del ligante asfáltico dentro de la mezcla. Cuando el agregado presenta baja densidad, la película de emulsión puede resultar demasiado delgada o discontinua, lo que compromete la cohesión del sistema, mientras que, en agregados de alta densidad, puede producirse una acumulación excesiva de ligante, provocando segregación y una distribución desigual. Estas condiciones generan mezclas con propiedades mecánicas inestables, que pueden manifestarse en deformaciones prematuras, fisuración o incluso el desprendimiento superficial del material con el paso del tiempo.

Las consecuencias de estas deficiencias son significativas en el contexto de la ingeniería vial, ya que afectan directamente la capacidad estructural del pavimento y su desempeño bajo carga repetitiva. Un pavimento con propiedades mecánicas deficientes requiere mayores intervenciones de mantenimiento correctivo y preventivo, lo que incrementa los costos operativos, reduce la vida útil del pavimento y disminuye la eficiencia general de las soluciones constructivas basadas en mezclas en frío.

A pesar de que existen estudios que han abordado por separado el comportamiento de emulsiones catiónicas de rotura lenta y el efecto de la densidad de los agregados en mezclas asfálticas, no se ha desarrollado un análisis integral que permita entender de forma precisa cómo interactúan estos factores cuando se combinan en un contexto real de aplicación. Esta falta de información técnica dificulta la formulación de criterios de diseño confiables y reproducibles para la estabilización asfáltica en frío.

Es por ello que se hace necesario analizar en detalle la influencia de la rotura lenta de emulsiones catiónicas combinadas con agregados de diferente densidad, con el objetivo de generar recomendaciones técnicas y criterios de formulación que orienten la elaboración de mezclas asfálticas en frío con mejores propiedades mecánicas. De esta manera, se busca promover soluciones más eficientes, sostenibles y técnicamente fundamentadas para la construcción y rehabilitación de pavimentos flexibles.

1.2.2. Problema

¿Qué efecto tiene la rotura lenta de las emulsiones asfálticas catiónicas cuando se combinan con agregados de diferente densidad en la estabilización asfáltica?

1.3. HIPÓTESIS

La combinación de emulsiones catiónicas de rotura lenta con agregados de mayor densidad incrementara significativamente las propiedades mecánicas de las mezclas en la estabilización asfáltica.

OBJETIVOS.

1.3.1. Objetivo General.

Analizar la influencia de la rotura lenta de emulsiones catiónicas combinadas con agregados de diferente densidad en la estabilidad asfáltica, mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas de las mezclas en condiciones controladas, para determinar las condiciones óptimas en la selección y aplicación de estos agregados en la estabilización asfáltica.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Caracterizar los agregados de diferente densidad.
- Caracterizar la emulsión asfáltica catiónica utilizada en la estabilización de mezclas asfálticas.
- Realizar la dosificación óptima de emulsión asfáltica y determinar el contenido adecuado de ligante, aplicando el método Marshall modificado.
- Elaborar las briquetas de diseño con el contenido óptimo de emulsión, utilizando tres gradaciones distintas de agregados.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de la estabilidad en las mezclas asfálticas con las tres gradaciones distintas de agregados.

1.4. IDENTIFICACIÓN Y CONCEPTUALIZACIÓN DE VARIABLES.

1.4.1. Variable independiente

- **Densidad de los agregados:** La densidad es una propiedad física de los agregados y está definida por la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada, lo que significa que depende directamente de las características del grano de agregado, incluyendo su composición mineralógica, tamaño, forma y porosidad, factores que influyen en su comportamiento dentro de una mezcla asfáltica.

1.4.2. Variable dependiente:

- **Resistencia de estabilidad:** La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo las cargas repetitivas.

1.4.3. Operacionalización de las variables.

Variable independiente

Tabla 1. Variable Independiente

VARIABLE	DIMENSION	INDICADOR	VALOR/ACCION
DENSIDAD DE LOS AGREGADOS	Densidad baja	Kg/m ³	Curva granulométrica
			Densidad relativa
	Densidad media	Kg/m ³	Granulometría
			Densidad relativa
	Densidad alta	Kg/m ³	Granulometría
			Densidad relativa

Fuente: Elaboración propia

Variable dependiente

Tabla 2. Variable Dependiente

VARIABLE	DIMENSION	INDICADOR	VALOR/ACCION
RESISTENCIA DE ESTABILIDAD	Estabilidad	Libra	Aparato Marshall
	Fluencia	Pulg	Aparato Marshall

Fuente: Elaboración propia

1.5. ALCANCE

El presente proyecto tiene como propósito fundamental determinar si la estabilización asfáltica en frío, mediante la aplicación de una emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento combinada con agregados de distinta densidad, es capaz de cumplir con los requisitos técnicos mínimos exigidos para pavimentos flexibles en obras civiles. Bajo el título "ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA ROTURA LENTA DE EMULSIONES CATIÓNICAS COMBINADAS CON AGREGADOS DE DIFERENTE

DENSIDAD PARA LA ESTABILIZACIÓN ASFÁLTICA", se busca explorar una técnica que contribuya al desarrollo de métodos más eficientes y sostenibles para el diseño y mejora de mezclas asfálticas en frío, ofreciendo alternativas viables para proyectos de infraestructura en aquellos lugares donde la variabilidad de los agregados puede representar un desafío para la durabilidad y estabilidad del pavimento.

El proyecto se estructura en varias fases que permiten realizar un análisis integral de la estabilización asfáltica en frío. En primer lugar, se procederá a la caracterización de los materiales empleados en el estudio. Se seleccionarán tres tipos de agregados de diferente densidad, provenientes de fuentes representativas de la región, que serán sometidos a un riguroso proceso de análisis en laboratorio conforme a la Norma Boliviana establecida en el manual de ensayos de agregados pétreos y asfaltos de la ABC. En esta fase se evaluarán propiedades tales como la granulometría, el peso específico, el peso unitario (tanto en estado suelto como compactado), el desgaste mediante el ensayo de Los Ángeles, el porcentaje de partículas fracturadas y el equivalente de arena, parámetros que permitirán determinar las características inherentes a cada tipo de agregado y su posible influencia en la estabilidad de la mezcla.

Posteriormente, se realizará la caracterización de la emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento CSS-1, la cual, a pesar de su baja utilización en el Departamento de Tarija, se selecciona por sus propiedades particulares. Esta emulsión será evaluada mediante ensayos de destilación, determinación de densidad, penetración, ductilidad, viscosidad y carga de partícula, a fin de conocer en detalle su comportamiento reológico y mecánico, y de esta manera asegurar que sus propiedades sean compatibles con las de los agregados utilizados.

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización de los materiales, se procederá a la dosificación de mezclas asfálticas en frío. Se formularán mezclas aplicando tres gradaciones diferentes (A, B y C) y se determinarán seis porcentajes distintos de emulsión, calculados en función del área superficial de los agregados. Para cada combinación se elaborarán 3 briquetas, las cuales serán sometidas al método Marshall. Este ensayo permitirá evaluar de manera precisa las propiedades mecánicas de la mezcla, tales como la estabilidad, la fluencia, la densidad y la distribución de vacíos (totales, de agregado y

ocupados por el cemento asfáltico), parámetros fundamentales para determinar el rendimiento de la estabilización.

Finalmente, tras el análisis de los datos obtenidos en los ensayos Marshall y en los estudios comparativos entre las tres gradaciones, se determinará el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica catiónica para la formulación de mezclas en frío. La producción de un total de 27 briquetas bajo este porcentaje óptimo facilitará el análisis comparativo de las propiedades mecánicas entre las diferentes gradaciones y permitirá establecer de forma rigurosa la correlación entre la densidad de los agregados y el desempeño de la mezcla. Los resultados de este estudio ofrecerán un análisis detallado sobre la viabilidad técnica de la estabilización asfáltica en frío utilizando una emulsión de rompimiento lento, proporcionando además recomendaciones que contribuyan a optimizar el diseño de pavimentos flexibles y a mejorar la durabilidad y seguridad de las infraestructuras viales.

CAPITULO II
MEZCLA ASFÁLTICA EN FRIO

CAPITULO II

MEZCLA ASFÁLTICA EN FRIO

2. MARCO CONCEPTUAL

El presente estudio se fundamentó en conceptos clave relacionados con la estabilización asfáltica y el comportamiento de las emulsiones catiónicas en combinación con agregados de distinta densidad. La estabilización de mezclas asfálticas con emulsiones constituye una técnica ampliamente utilizada en la ingeniería vial, debido a su capacidad para mejorar la cohesión y resistencia mecánica de los pavimentos.

En este capítulo se presentan las definiciones esenciales que sustentaron el desarrollo de la investigación, abordando temas como el asfalto, las emulsiones bituminosas y las propiedades físicas y químicas de los agregados. Además, se establecen las bases teóricas sobre los mecanismos de rotura y curado de las emulsiones, factores determinantes en la optimización del desempeño de las mezclas asfálticas en aplicaciones viales.

2.1. ASFALTO

El asfalto es un material con propiedades destacadas de impermeabilidad, adherencia y cohesión, lo que le permite resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo cargas permanentes (López, 2019)

En la construcción de pavimentos, el asfalto cumple varias funciones esenciales:

Impermeabilización: El asfalto sella la estructura del pavimento, haciéndolo resistente a la humedad y eficaz contra la penetración de agua proveniente de la precipitación (Sánchez, 2018).

Unión y Cohesión: Facilita una unión íntima entre los agregados, resistiendo la disgregación provocada por las cargas vehiculares (Martínez, 2021).

Capacidad Portante: Mejora la capacidad portante de la estructura del pavimento, permitiendo la reducción de su espesor (González, 2017).

Los asfaltos se dividen en dos grandes categorías según su origen: derivados del petróleo y naturales. Los asfaltos naturales son el resultado de la evaporación de fracciones volátiles del petróleo, dejando únicamente las fracciones asfálticas (Pérez, 2020). La

mayoría de los asfaltos utilizados actualmente provienen de la destilación industrial del crudo de petróleo, representando más del 90% de la producción total (Ramírez, 2016).

El asfalto derivado de ciertos crudos ricos en parafina no es adecuado para fines viales, ya que precipita a bajas temperaturas formando una fase discontinua que resulta en una pérdida de ductilidad (Gómez, 2019). Este problema no ocurre con los crudos asfálticos debido a su composición (Vargas, 2021).

El petróleo crudo se somete a un proceso de destilación para separar las fracciones livianas, como la nafta y el kerosén, de la base asfáltica mediante vaporización, fraccionamiento y condensación (Fernández, 2018). Además, el asfalto es un material bituminoso que contiene betún, un hidrocarburo soluble en bisulfuro de carbono (CS_2). A diferencia del alquitrán obtenido de la destilación destructiva de carbón graso, el asfalto moderno refinado tiene una durabilidad similar al asfalto natural, pero con la ventaja adicional de estar libre de materias orgánicas y minerales extraños.

Las propiedades del asfalto permiten que se adhiera y se integre a la superficie impermeabilizada, evitando su levantamiento debido a cambios bruscos de temperatura o dilataciones (Ortiz, 2020).

2.1.1. Emulsión Asfáltica

La emulsión asfáltica es una dispersión estable de pequeñas gotas de asfalto en agua. Dado que el asfalto y el agua son inmiscibles, se utiliza un agente emulsificante para lograr la mezcla. Las emulsiones asfálticas consisten en dos fases no miscibles: la fase continua es el agua, y la fase dispersa está formada por pequeños glóbulos de cemento asfáltico. El agente emulsificante es una molécula con una cabeza iónica polar compatible con el agua y una cadena hidrocarbonada compatible con el asfalto (Salazar, 2020).

2.1.1.1. Composición de las emulsiones asfálticas

Los componentes básicos de una emulsión asfáltica son:

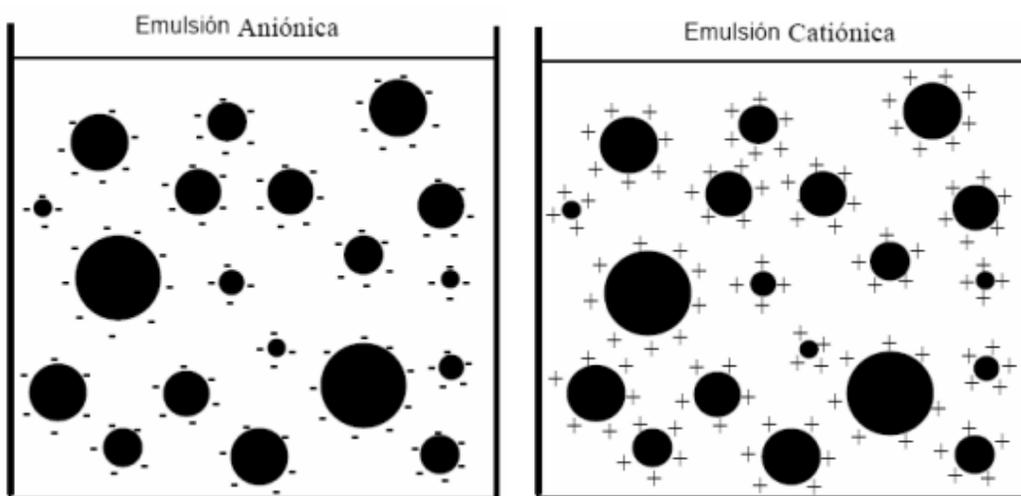
1. **Cemento Asfáltico:** Constituye entre el 55% y el 70% de la emulsión. Debe cumplir con características físico-químicas y reológicas específicas, además de ser compatible con el agente emulsificante para garantizar la estabilidad de la emulsión (Paredes, 2018).

2. **Agua:** La presencia de agua es crucial para humedecer y disolver los componentes, facilitando la producción de una emulsión adecuada. El agua debe ser pura y libre de contaminantes (Luna, 2021).
3. **Emulsificante:** Aunque es el componente en menor cantidad, su función principal es estabilizar la emulsión y evitar la coalescencia de los glóbulos de cemento asfáltico. El emulsificante cambia la tensión superficial en el área de contacto para mantener la estabilidad de la mezcla (García, 2019).

2.1.1.2. Clasificación de las emulsiones asfálticas

De acuerdo con los emulsificantes usados, se obtienen dos clasificaciones de emulsiones asfálticas (figura Emulsión y Cargas que contienen los Glóbulos):

Imagen 1. Emulsiones Aniónicas y Catiónicas



Fuente: (López, 2019)

- **Emulsiones Aniónicas:** Utilizan sales sódicas o potásicas de ácidos orgánicos de cadena compleja, con una polaridad de carga negativa. Son ideales para agregados calizos que ionizan positivamente (Castro, 2017).
- **Emulsiones Catiónicas:** Resultan de la reacción de ácidos inorgánicos fuertes con aminas grasas, presentando una polaridad de carga positiva. Son adecuadas para agregados silíceos que se ionizan negativamente (López, 2019).

De acuerdo a la estabilidad de las emulsiones asfálticas pueden clasificarse en:

- **Emulsiones de Rompimiento Rápido**

Estas tienen poca o ninguna capacidad para mezclarse con agregados, se emplean normalmente para riegos de sello, sellos de arena y tratamientos superficiales en general; para reaccionar rápidamente con el agregado y revertir al estado del asfalto.

En riegos de sello altas viscosidades de la emulsión son muy importantes, ya que se evita el fenómeno de escurrimiento, da mejor embebido del pétreo y contribuye a la adherencia (mayor espesor de película sobre la superficie del pétreo).

La razón de utilizar un asfalto relativamente blando, se fundamenta en que al colocar un espesor delgado de asfalto y al estar este expuesto a los agentes atmosféricos de forma directa, tiende a envejecerse muy rápido, perdiendo sus propiedades elásticas, rigidizándose y resultando un material demasiado frágil imposible de generar una retención adecuada del agregado pétreo.

- **Emulsiones de Rompimiento Medio**

Designadas para ser mezcladas con agregados porque NO rompen al instante de entrar en contacto con el agregado. Esta cualidad permite que la mezcla sea manejable por un periodo de tiempo determinado. Trabajan de manera adecuada con pétreos de E.A. > 75% y finos < 5%. Se utilizan para mezclas in-situ, mezclas con plantas estabilizadoras y estabilización in-situ. Sobre mezclas de gradación abierta con fines de bacheo, re nivelaciones y reciclados. La resistencia está dada por la “trabazón” entre las partículas del agregado requiriéndose de espesores mayores de película de ligante para proporcionar una durabilidad adecuada. Así mismo, la penetración del residuo asfáltico debe ser mayor a 100 dmm utilizándose aceites ligeros para hacer manejables las mezclas en almacenamientos más o menos prolongados, o en el caso de reciclados hacer que trabaje el asfalto envejecido que contenga el material recuperado.

- **Emulsiones de Rompimiento Lento**

Se diseñan para mezclarse con agregados finos, se utilizan comúnmente para carpetas asfálticas en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas. Designadas para máxima estabilidad de mezclado. Estas emulsiones tienen tiempos más largos de

manejabilidad para garantizar un buen mezclado con materiales densamente gradados. Dan buenos resultados con agregados de E.A.> 60% y finos de 5 a 12%.

Se utilizan principalmente para mezclas de gradación densa, mezclas de arena y reciclados.

Todas las emulsiones de rompimiento lento tienen baja viscosidad la cual todavía puede ser disminuida diluyendo la emulsión con agua. Cuando estas emulsiones son diluidas pueden ser utilizadas para riegos de liga, riegos negros y paliativos de polvo.

2.1.1.3. Proceso de Emulsificación

El proceso de emulsificación implica la separación mecánica del cemento asfáltico caliente en diminutos glóbulos dispersados en agua tratada con un agente emulsificante (Mendoza, 2021). Por lo tanto, el sistema queda constituido por el agua como fase continua y las micrométricas gotas de asfalto como fase dispersa.

Esta separación se logra mediante molinos coloidales, y una vez evaporada el agua, el asfalto recupera su consistencia original, actuando como cementante de los agregados pétreos. La idea del funcionamiento de las emulsiones radica en que una vez evaporada el agua, el asfalto adquiere nuevamente su consistencia original debido a que los glóbulos dispersos se vuelven a unir, quedando en condiciones de actuar como cementante de los agregados pétreos.

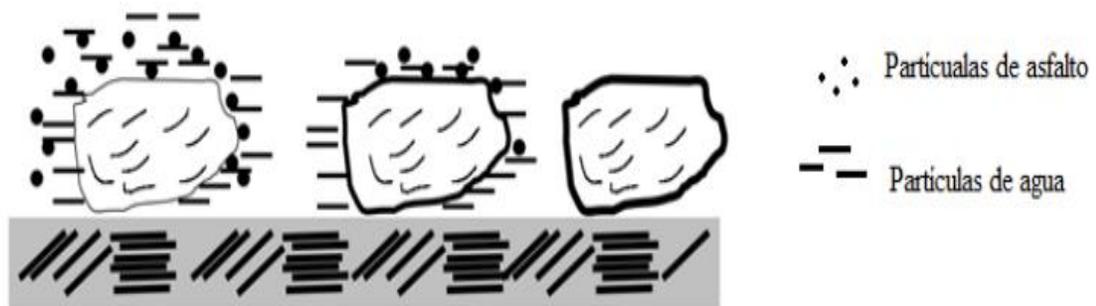
2.1.1.4. Rotura de la Emulsión

La rotura de la emulsión depende del tipo de emulsificante utilizado: las aniónicas tienen cargas negativas y las catiónicas positivas (Pérez, 2020). Los emulsificantes, que son compuestos orgánicos de alto peso molecular, se sitúan en la interfaz entre el asfalto y el agua, creando una repulsión que mantiene la emulsión estable hasta que se produce la rotura (Gómez, 2018).

Los emulsificantes catiónicos y aniónicos son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado; su parte hidrocarbonada lineal o cíclica es soluble en el asfalto. Los emulsificantes aniónicos tienen grupos ácidos y los catiónicos grupos amínicos que se encuentran saponificados; su parte polar es soluble en el agua e hidrófila.

Estos productos son los que, producida la emulsión, se sitúan en su mayor parte en la “interfase”. Su parte polar orgánica se dirige hacia el asfalto y su parte polar inorgánica hacia el agua. Con estos emulsionantes iónicos, los glóbulos adquieren cargas eléctricas del mismo signo, repeliéndose entre ellos. Influyen sobre su comportamiento, de acuerdo con su tipo y concentración, en presencia de una superficie mineral. Pasado un tiempo determinado, las emulsiones depositan sobre esa superficie una película de ligante. Este fenómeno se conoce como rotura. Previamente, la emulsión pasa por un intervalo en que se concentra su porcentaje de asfalto, convirtiéndose en una emulsión totalmente rota imposible de revivirse aun en presencia de humedad, en la figura se muestran los pasos por los que atraviesa una emulsión antes de tener la rotura completa.

Imagen 2. Rotura de Emulsión



Fuente: (Gómez, 2018)

2.1.1.5. Factores que Influyen en la Rotura de una Emulsión

La rotura de una emulsión se ve afectada por factores como la evaporación de la fase acuosa, la difusión del agua, y la absorción superficial de parte del emulsificante por el material pétreo (Bermúdez, 2019).

La absorción de componentes polares del emulsificante puede destruir la película protectora y mejorar la adherencia entre el asfalto y el agregado (Martínez, 2021).

Lo anterior sucede con casi todos los materiales. Esta absorción de la parte polar del jabón por los agregados, provoca la rotura de la emulsión haciendo que los glóbulos del asfalto se adhieran inmediatamente a las partículas del material pétreo, aun en presencia de humedad. Ese fenómeno, en la mayoría de los casos, mejora la adherencia y permite una mejor distribución de la mezcla dentro de la masa.

Las desventajas de las emulsiones asfálticas son principalmente el tiempo de fraguado que estas requieren, la complicada química y reología (estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos.) que se desarrolla en las emulsiones, pues los compuestos químicos presentes en el asfalto como los asfaltenos y maltenos son variables y de diferente naturaleza química.

Debido al mecanismo de fraguado, estas emulsiones comúnmente no logran una estabilidad aceptable con el agregado pétreo del asfalto, por ello son aplicables principalmente a caminos secundarios en los que la carga vehicular no es regular ni posee alto peso.

2.1.1.6. Propiedades de las Emulsiones Asfálticas

Las principales propiedades de las emulsiones asfálticas incluyen:

- **Estabilidad al Almacenamiento:** La viscosidad y la formación de natas o sedimentos pueden afectar la estabilidad durante el almacenamiento.
- **Estabilidad ante los Agregados Pétreos:** La rotura de la emulsión al entrar en contacto con los agregados depende de su finura y de otros factores como la humedad y el tipo de emulsificante.
- **Características Reológicas del Residuo:** La consistencia del cemento asfáltico residual influye en la durabilidad de la emulsión y en su comportamiento bajo tráfico.

2.1.1.6.1. Estabilidad al Almacenamiento

Todas las emulsiones asfálticas modifican en mayor o menor grado sus propiedades durante el manejo y almacenamiento. Una emulsión puede almacenarse durante varios meses sin producirse ningún deterioro y sin necesidad de calentarla para utilizarla. Sin embargo, es normal que para almacenamientos prolongados se presenten los siguientes fenómenos:

- **Formación de natas y sedimentos:** Durante el almacenamiento, pueden ocurrir dos fenómenos que se intensifican con el tiempo. La nata es una película que se forma en la superficie de la emulsión debido al contacto del asfalto con el aire. Para mitigar este problema, se recomienda utilizar tanques de almacenamiento con

áreas reducidas y disposición vertical. La sedimentación, por otro lado, se refiere al aumento gradual en la concentración de asfalto en la parte inferior del tanque, causado por la gravedad. Este fenómeno es reversible mediante la utilización de mezcladores, que aseguran una distribución uniforme del asfalto en la emulsión (Aranda, 2010).

- **Formación de espuma:** Los emulsificantes presentes en las emulsiones asfálticas, debido a su naturaleza química, tienden a formar espuma. Para minimizar este efecto, es crucial evitar la introducción de aire durante el proceso de mezcla o agitación. Se recomienda el uso de carros tanques equipados con sistemas de tabiques internos y llenar estos tanques utilizando una manguera flexible que se extienda hasta unos 10 a 20 cm del fondo del tanque (Gómez, 2015).

2.1.1.6.2. Estabilidad de la Emulsión ante los Agregados Pétreos

La estabilidad de la emulsión ante los agregados pétreos resulta de la rotura de esta al entrar en contacto con el agregado. Mientras más fino sea el agregado la rotura de la emulsión será más rápida. La velocidad de rotura dependerá de la humedad del agregado, clima del lugar de la obra, el tipo de emulgente, naturaleza química del cemento asfáltico y de la granulometría del agregado.

- **Adhesividad.** -La adhesividad depende del tipo y cantidad de emulgente, de la naturaleza del material bituminoso, de los aditivos incorporados al cemento asfáltico, del pH de la emulsión en donde los valores cercanos a 7 proveen una buena adherencia, pero estabilidades menores, de la mineralogía del agregado y de su velocidad de rotura.
- **Viscosidad.** -Esta propiedad depende directamente de la concentración de la emulsión (contenido de asfalto residual). Valores por encima del 65% de asfalto residual incrementa rápidamente este parámetro. La viscosidad también varía con el tipo y cantidad del emulgente y de la granulometría de la emulsión. Las emulsiones asfálticas con glóbulos de tamaño uniforme son más viscosas que con tamaños bien graduados. La granulometría depende del tipo de ligante (cemento asfáltico) y de los fluidificantes del mismo.

2.1.1.6.3. Características reológicas del residuo

La consistencia del cemento asfáltico residual influye en las propiedades de la emulsión asfáltica. Cuando se utilizan fluidificantes se facilita la envuelta de las partículas de agregado, pero se pueden generar problemas ante la acción directa del tránsito debido a un mal curado (evaporación de los solventes) produciéndose ahuellamientos y deformaciones prematuras. Los fluidificantes pueden llegar a perjudicar la adherencia dependiendo de su naturaleza, por una disminución de la viscosidad del ligante residual.

2.1.1.7. Almacenamiento de emulsiones asfálticas

La emulsión asfáltica, una dispersión de finas gotitas de cemento asfáltico en agua, tiene las ventajas y desventajas propias del medio de dispersión, el agua. Cuando se almacenan emulsiones asfálticas:

- Almacene la emulsión como almacenaría agua líquida - entre 10°C (50°F) y 85°C (185°F), dependiendo del uso buscado y del producto en cuestión.
- Almacene la emulsión a la temperatura especificada para el grado y aplicación particulares. La Tabla 2.7 muestra los rangos temperaturas normales para almacenamiento.
- No permita que la emulsión asfáltica sea calentada por encima de los 85 °C (185°F). Las temperaturas elevadas evaporan el agua, modificando las características de la emulsión asfáltica.
- No permita que la emulsión asfáltica se congele. Esto produce la rotura de la emulsión, separando el asfalto del agua. El resultado será dos capas - una de asfalto, otra de agua- en el tanque, ninguna de las cuales será adecuada para el uso deseado; además, será difícil vaciar el tanque.
- No permita que la temperatura de la superficie de calentamiento exceda los 100°C (212°F). De suceder esto, se producirá la rotura prematura de la emulsión sobre aquella.

Tabla 3. Temperatura de almacenamiento para las emulsiones asfálticas

Temperatura de Almacenamiento para Emulsiones Asfálticas		
	Temperatura, °C (°F)	
Grado	Mínimo	Máximo
RS-1	20°(70°)	60°(140°)
RS-2, CRS-1, CRS-2, HFRS-2	50°(125°)	85°(185°)
SS-1, SS-1 h, CSS-1, CSS-1 h, MS-1, HFMS-1	10°(50°)	60°(140°)
CMS-2, CMS-2h, MS-2, MS-2h, HFMS-2, HFMS-2h, HFMS-2s	50°(125°)	85°(185°)

Nota: *RS: Rotura Rápida; CRS: Catiónica de rotura rápida; HFRS: Rotura rápida de alta flotación; SS: Rotura Lenta; CSS: Catiónica de rotura lenta; MS: Rotura media; HFMS: Rotura media de alta flotación; CMS: Catiónica de rotura media.*

Fuente: Manual ASTM

2.1.1.8. Manipulación de las emulsiones asfáltica

Consideraciones a tomar en cuenta para la manipulación de emulsiones asfálticas.

- Agitar suavemente agite suavemente, durante el calentamiento, la emulsión, para eliminar o reducir la formación de piel.
- Proteja las bombas, válvulas y tuberías del congelamiento en los meses invernales.
- Vacíe las bombas y haga el mantenimiento de los equipos según las recomendaciones del fabricante.
- vacíe las cañerías y deje abiertas las salidas de drenaje cuando no están en servicio.
- Emplee bombas con apropiados pasos entre piezas para el manejo de emulsiones. Las bombas con mecanismos muy ajustados pueden atascarse y dejar de funcionar.
- Caliente la bomba hasta una temperatura de alrededor de 65°C (150°F) para facilitar el arranque.
- Verifique, al diluir la emulsión asfáltica, la compatibilidad del agua con la emulsión, haciendo una prueba sobre una pequeña cantidad.

- Emplee, de ser posible, agua caliente para la dilución, y siempre agregue el agua lentamente a la emulsión (y no la emulsión al agua).
- Evite el bombeo y la recirculación repetidos, ya que la viscosidad puede bajar y el aire puede quedar atrapado, causando la inestabilidad de la emulsión.
- Ubique las cañerías de ingreso y de retorno en el fondo de los tanques para evitar la formación de espuma.
- Bombee desde el fondo del tanque, para minimizar la contaminación por la eventual formación de piel.
- Recuerde que emulsiones designadas con el mismo grado pueden ser muy diferentes en lo que respecta a la química y al comportamiento.
- Para el transporte, utilice camiones con placas deflectoras, para evitar una excesiva agitación de la emulsión.
- Agite aquellas emulsiones que han estado almacenadas en forma prolongada. Ello puede hacerse por recirculación.
- No mezcle diferentes clases, tipos y grados de asfaltos emulsionados en tanques de almacenamiento, transportes, y distribuidores.
- No aplique excesiva temperatura a los collarines o recubrimientos de la bomba. Esta puede dañarse.
- No diluya emulsiones asfálticas de rotura rápida en agua. Las emulsiones de rotura media y lenta pueden ser diluidas, pero siempre agregando lentamente agua a la emulsión asfáltica. Nunca agregue la emulsión asfáltica al tanque de agua cuando se está diluyendo.
- No cargue emulsiones asfálticas en tanques de almacenamiento o transporte, auto-tanques, o distribuidores con residuos de materiales incompatibles.
- No exponga la emulsión asfáltica o el aire en contacto con su superficie a llamas, calor o potentes oxidantes. Se requiere adecuada ventilación.
- Evite respirar gases, vapores, etc.
- Obtenga por parte del proveedor una copia de la planilla de datos de seguridad del material. Lea dicha planilla cuidadosamente y siga sus indicaciones.

2.1.2. Agregados Pétreos

2.1.2.1. Definición

Los agregados son materiales granulares, sólidos e inertes, que son utilizados para diferentes actividades de la construcción ya sea para la construcción de edificaciones, carreteras y pavimento. Estos materiales cuentan con partículas fragmentadas o gradadas con una granulometría adecuada y constituyen parte de un pavimento flexible, se podría decir que son producto de roca o grava triturada (Cruz, 2012).

Los agregados pétreos no solo se emplean en la creación de capas de base granular, sino también en la elaboración de mezclas asfálticas. De hecho, estos materiales constituyen entre el 90 y el 95% en peso y entre el 75 y el 85% en volumen de la mayoría de las estructuras de pavimento. Por lo tanto, la calidad del agregado utilizado es crucial y tiene un impacto significativo en el comportamiento del pavimento (López, 2016).

2.1.2.2. Clasificación de los agregados pétreos

Ramos y Muñiz (2013) afirman que debido a que el rompimiento de la emulsión asfáltica se lleva a cabo por la interacción química de esta con el material pétreo, es necesario conocer el tipo de agregado pétreo que se tiene, para poder determinar el tipo de emulsión asfáltica más adecuada. Es por tal motivo que se requiere de un sistema de clasificación es decir un ordenamiento de los diferentes suelos en grupos que tienen características y propiedades similares, con propósito de facilitar al ingeniero un método para estimar las propiedades o aptitudes óptimas del mismo, para obtener un diseño óptimo (Ramos & Muñiz, 2013).

2.1.2.2.1. Según su Naturaleza

- **Agregados Calizos**

Padilla (2004) afirma que la roca caliza en los procesos de trituración es muy común, abundante y económica, se emplea generalmente en todas las capas de los firmes, exceptuándose en algunas ocasiones como agregado grueso en las capas de rodadura, debido a la facilidad que tiene de pulimentarse en condiciones de servicio, presenta por lo regular menores problemas de adhesividad, es decir, de afinidad con ligantes asfálticos (Padilla, 2004).

- **Agregados Silicios**

Estos agregados proceden de la trituración de gravas naturales y son ampliamente utilizados para capas de firmes. Se encuentran en yacimientos granulares de donde son extraídos en partículas de mayor tamaño para luego ser separadas por cribado y a partir de ellas por trituración constante obtener partículas de menor tamaño, con una angulosidad mayor cuantas más caras de fractura contenga.

Pueden no aportar una suficiente adhesividad con ligantes asfálticos, sin embargo, si el material obtenido cuenta con un elevado contenido de sílice y de cara de fractura, sus características mecánicas y su rozamiento interno proporcionan un esqueleto mineral bueno incluso para ser utilizado en mezclas asfálticas sometidas a la acción directa del tráfico.

- **Agregados Ígneos y Metamórficos**

Padilla (2004) describe que son materiales que por sus características resultan muy adecuados para ser utilizados como agregado grueso en las capas de rodadura (Padilla, 2004).

En este grupo se incluyen los pórfidos, granitos, cuarcitas, basaltos, gabros, etc. Sus cualidades para resistir al pulimento los hacen idóneos para garantizar durante un período de tiempo que la textura superficial sea necesaria inclusive cuando el tráfico es muy intenso.

Padilla (2004) señala que en este grupo tan amplio, los agregados de naturaleza más ácida pueden presentar una deficiente adhesividad con los ligantes asfálticos, pero en la mayor parte de estos casos el problema se soluciona con la utilización de sustancias que tiene la misión específica de mejorar la adhesividad con los ligantes o también se resuelven utilizando emulsiones adecuadas y en el caso de mezclas asfálticas, con el empleo de finos de naturaleza básica y un polvo mineral adecuado (Padilla, 2004).

2.1.2.2.2. Según el tamaño de sus partículas.

Otra forma en que los agregados pueden ser clasificados, sean estos naturales o procesados. Sería de acuerdo a su tamaño, ya que se dividirían en gravas y arenas.

Agregado grueso: El Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz N° 4 (Padilla, 2004).

Agregado fino: El Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz N° 4 y queda retenido en el tamiz N° 200 (Padilla, 2004).

Polvo mineral (Filler): El Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz N° 200 (Padilla, 2004).

2.1.2.3. Propiedades de los agregados pétreos

Las propiedades de los agregados pétreos, tanto físicas como mecánicas, están sujetas a variaciones debido a factores como la gradación, el contenido de humedad, la posición vertical respecto a la superficie y la localización geográfica. Para ser considerados adecuados para una mezcla asfáltica, los agregados pétreos deben cumplir con ciertas propiedades específicas (Guevara, et al., 2010).

2.1.2.3.1. Gradación y tamaño máximo de partículas

Para las mezclas asfálticas, es necesario que las partículas de los agregados se encuentren dentro de un rango específico de tamaños y que cada tamaño esté presente en proporciones determinadas. Las propiedades físicas y mecánicas de los agregados están directamente relacionadas con su granulometría, y esta determinación es crucial para evaluar su comportamiento mecánico, especialmente cuando se someten a cargas directas (Guevara, et al., 2010).

- **Granulometría densa.** - Se considera de esta manera al agregado que luego de ser compactado alcance un menor contenido de vacíos. Es por tal motivo que las mezclas con granulometría densa tienen un gran número de partículas que se encuentran en contacto entre sí, que les puede dar una mayor resistencia a la fricción y reducir la posibilidad de trituración.

Así como las mezclas en frío, las densas cuentan con una clasificación en su granulometría.

Tabla 4. Granulometría Densa

Tamiz		porcentaje que pasa		
Normal	Alternativo	MDF-38	MDF-25	MDF-19
37,5 mm	1 1/2"	100	-	-
25,0 mm	1"	80-95	100	-
19,0 mm	3/4"	-	80-95	100
12,5 mm	1/2"	62-77	-	80-95
9,5 mm	3/8"	-	60-75	-
4,75 mm	N°4	45-60	47-62	50-65
2,36 mm	N° 8	35-50	35-50	35-50
0,300 mm	N°50	13-23	13-23	13-23
0,075 mm	N°200	3-8	3-8	3-8

Fuente: Manual ASTM

- **Granulometría abierta.** - se considera de esta forma a los materiales cuya gradación es incompleta, es decir que contienen menos finos que los de granulometría densa y por lo cual sus partículas tienen menor puntos de contacto siendo así que el esfuerzo entre partículas sea mayor.

Tabla 5. Granulometría Abierta

Tamiz		porcentaje que pasa		
Normal	Alternativo	MAF-38	MAF-25	MAF-19
37,5 mm	1 1/2"	100	-	-
25,0 mm	1"	70-95	100	-
19,0 mm	3/4"	-	70-95	100
12,5 mm	1/2"	25-55	-	70-95
9,5 mm	3/8"	-	20-45	-
4,75 mm	N°4	0-15	0-20	10-30
2,36 mm	N° 8	0-5	0-10	0-10
0,075 mm	N°200	0-2	0-2	0-2

Fuente: Manual ASTM

- **Granulometría discontinua.** - estos agregados presentan irregularidad o vacíos en su gradación.
- **Granulometría Uniforme.** - son agregados que habitualmente tienen el mismo tamaño, estos materiales son utilizados principalmente para tratamientos superficiales y sellos.

2.1.2.3.2. Limpieza

Los agregados existen materiales indeseables que le restan propiedades y afectan desfavorablemente el comportamiento del pavimento. Dentro de estos se tienen vegetación, arcilla esquistosa, terrones de arcilla, materia orgánica, etc.

2.1.2.3.3. Durabilidad y Resistencia

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla y las exigencias durante la vida de servicio del pavimento. El ensayo que se utiliza es para medir la resistencia a la degradación de los agregados frente a problemas generados por la abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles.

2.1.2.3.4. Forma de la partícula

La forma de la partícula de los agregados tiene un impacto significativo en la trabajabilidad de la mezcla asfáltica, la cantidad de fuerza requerida para su compactación y la resistencia de la estructura del pavimento. Las partículas con formas irregulares y angulares suelen proporcionar las mejores características en términos de interlocking (entrecruzamiento), lo que contribuye a una mayor estabilidad y resistencia del pavimento. Por el contrario, partículas redondeadas pueden llevar a una menor capacidad de interlocking, reduciendo así la resistencia de la mezcla (Guevara, et al., 2010).

2.1.2.3.5. Textura de la superficie

La textura superficial de los agregados es un factor crítico que afecta la trabajabilidad de la mezcla, la resistencia final del pavimento y la resistencia al deslizamiento de la superficie. Los agregados pueden tener texturas rugosas o lisas, y cada una de estas texturas influye de manera distinta en el comportamiento del pavimento.

Agregados con una textura rugosa generalmente mejoran la resistencia al deslizamiento y la adherencia, mientras que los agregados con superficies lisas pueden contribuir a una menor resistencia al deslizamiento (Guevara, et al., 2010).

2.1.2.3.6. Capacidad de absorción

La capacidad de absorción de agua o asfalto de un agregado pétreo es una propiedad esencial que afecta la cantidad de material ligante necesario para la mezcla. Los agregados porosos, que tienen una alta capacidad de absorción, requieren mayores cantidades de asfalto para saturarse completamente en comparación con agregados menos porosos. Esta característica debe ser considerada para ajustar las proporciones de asfalto y asegurar la calidad y durabilidad de la mezcla asfáltica (Guevara, et al., 2010).

2.1.2.3.7. Afinidad con el cemento asfáltico

La afinidad de un agregado pétreo con el cemento asfáltico se refiere a la capacidad del agregado para aceptar y retener una capa de asfalto. Esta propiedad es fundamental para garantizar una buena adhesión entre el agregado y el asfalto, lo que contribuye a la durabilidad y el desempeño del pavimento. Un agregado con alta afinidad se adhiere mejor al asfalto, mejorando la cohesión de la mezcla (Guevara, et al., 2010).

2.1.3. Mezclas Asfálticas

2.1.3.1. Definición

Las mezclas asfálticas son combinaciones de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado que se producen en centrales de asfalto fijas o móviles, se transportan a la obra y se extienden y compactan allí.

Estas mezclas son utilizadas en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales y en las capas inferiores de pavimentos para tráfico pesado. Están compuestas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos, tanto gruesos como finos, un 5% de polvo mineral (filler) y un 5% de ligante asfáltico.

La calidad de estos componentes es crucial para el funcionamiento adecuado del pavimento, ya que cualquier deficiencia en alguno de ellos puede afectar el rendimiento global. En el ámbito local, el método de diseño más comúnmente utilizado es el Método

Marshall, aunque no existe un método universalmente aceptado para mezclas con asfaltos diluidos o emulsionados (Gómez, 2015).

2.1.3.2. Características y comportamiento de la mezcla

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

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

A continuación de hablar de cada una de las características:

2.1.3.2.1. Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. En las pruebas y el análisis de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/ft^3). La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m^3 o 62.416 lb/ft^3).

La densidad obtenida en el laboratorio se utiliza como referencia para evaluar si la densidad del pavimento terminado es adecuada. Las especificaciones suelen requerir que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad de laboratorio, ya que es raro alcanzar las densidades de laboratorio en la compactación in-situ (López, 2016).

2.1.3.2.2. Vacíos de aire (o simplemente vacíos)

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna

compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional.

La durabilidad de un pavimento asfáltico está en función del contenido de vacíos. La razón de esto es que cuando 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 inversamente relacionados; una mayor densidad suele implicar un menor porcentaje de vacíos en la mezcla y viceversa (Aranda, 2010).

2.1.3.2.3. Vacíos en el agregado mineral

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.

2.1.3.3. Propiedades consideradas en las mezclas Asfálticas

Las buenas mezclas asfálticas 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 asfálticas. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclas es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades.

2.1.3.3.1. Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y su

lisura bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamiento (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

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

2.1.3.3.2. Durabilidad

La durabilidad de un pavimento asfáltico 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 películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada de tres formas. Primero: usando la mayor cantidad posible de asfalto; segundo, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación y tercero, 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 (López, 2016).

Una graduación densa de agregado 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 la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las

cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos o rellenos minerales como la cal hidratada.

2.1.3.3.3. Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento asfáltico es la resistencia al paso de aire y 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 (Aranda, 2010).

Aunque la impermeabilidad 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. Esto es aceptable siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

2.1.3.3.4. Trabajabilidad

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

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

Un contenido demasiado alto de relleno mineral también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación. La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillado, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares.

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, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de 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.

2.1.3.3.5. Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante, sin agrietarse. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo). Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada 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 (López, 2016).

2.1.3.3.6. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo cargas de tránsito. Investigaciones han demostrado 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 disminuye. En este caso, el período de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga será menor. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga. La capacidad de soporte de la subrasante y las características de resistencia y espesor de un pavimento, tienen mucho que ver con su vida útil y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito.

Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto por la acción de las cargas como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles (Martínez, 2018).

2.1.3.3.7. Resistencia al deslizamiento

Es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está 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 la resistencia al deslizamiento se mide en el terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento y a una velocidad de 65 km/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 9.5mm (3/8 pulgada) a 12.5mm (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.

2.1.3.4. Mezclas con emulsión asfáltica

Hay 3 tipos de mezclas de emulsión asfáltica y agregados: de granulometría cerrada, con arena, y de granulometría abierta.

- a) **Las mezclas de granulometría cerrada.** - están compuestas de agregados graduados desde el máximo tamaño hasta, inclusive, material pasante el tamiz 75 mm (N° 200). Incluyen una amplia variedad de tipos y granulometrías de agregados, y pueden ser empleadas para todos los tipos de aplicaciones en pavimentos. Las 58 mezclas emulsión se elaboran, con emulsiones asfálticas, arenas de río, arenas y gravas pobremente graduadas y arenas de dunas.
- b) **Las mezclas con arena.** - están generalmente limitadas a arenas finas limpias y arenas limosas con bajo contenido de arcilla. Elaboradas con los adecuados grados de emulsiones las mezclas con arena han tenido un buen comportamiento como subbases y bases, para estas mezclas, las emulsiones típicamente empleadas son de rotura lenta y de rotura media de alta micro flotación, preferentemente con grados de mayor dureza.
- c) **Con granulometría abierta.** - elaboramos mezclas de alto porcentaje de vacíos a través de los cuales drena el agua. Estas mezclas han sido utilizadas muy exitosamente tanto para bases como para carpeta de rodamiento debido a la relativa sencillez del equipo de planta necesario y a los altos volúmenes de producción posible, estas mezclas son económicamente atractivas cuando se requiere una mezcla de alta calidad para tráfico pesado.

2.1.3.5. Diseño de mezclas

Para el diseño de mezclas asfálticas con emulsión, es crucial realizar pruebas de laboratorio para establecer el grado y porcentaje óptimo de emulsión, así como para evaluar las propiedades de trabajabilidad, estabilidad y resistencia del sistema. También es importante determinar la susceptibilidad de la mezcla con emulsión al agua, para anticipar su comportamiento en condiciones húmedas.

En la selección del tipo y grado de emulsión, se deben considerar no solo las características del agregado, sino también el tipo de residuo de asfalto (base dura o blanda), el contenido de solvente, las modificaciones con polímeros y la velocidad de curado de la emulsión, ya

sea media o lenta. Estos factores son determinantes para asegurar la calidad y durabilidad de la mezcla asfáltica final (Torres, 2019)

2.1.4. Pavimento

Un pavimento es una estructura compuesta por una serie de capas superpuestas y relativamente horizontales, diseñadas y construidas con materiales adecuados y compactados correctamente. Estas capas estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía, la cual se forma a través del movimiento de tierras durante la etapa de construcción. El pavimento debe ser capaz de resistir los esfuerzos inducidos por las cargas repetidas del tránsito a lo largo del período de vida útil para el cual fue diseñado (Harrison, 2014).

2.1.4.1. Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles se componen de una capa superficial bituminosa que se apoya sobre capas no rígidas, como la base y la subbase. Aunque en algunos casos se puede omitir alguna de estas capas, la estructura básica incluye estas capas para garantizar el rendimiento adecuado del pavimento. La capa superficial proporciona la resistencia al tránsito, mientras que las capas inferiores sirven para distribuir las cargas y proteger la subrasante (Gómez, 2015).

2.1.4.2. Funciones de las capas de un pavimento flexible

2.1.4.2.1. La subbase granular

Se dividen en las siguientes funciones:

- **Función económica:** Una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia, puede ser construido con materiales de alta calidad.

Sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad la cual es frecuentemente la más barata. Esta solución puede traer consigo un aumento en el espesor total del pavimento y no obstante, resultar más económica.

- **Capa de transición:** La sub base bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y por otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad.
- **Disminución de las deformaciones:** Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse con la capa subbase, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.
- **Resistencia:** La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidas a un nivel adecuado a la subrasante.
- **Drenaje:** En muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar.

2.1.4.2.2. La base granular

Para la base granular tenemos:

- **Resistencia:** La función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase ya la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.
- **Función económica:** Respecto a la carpeta asfáltica, la base tiene una función económica análoga a la que tiene la subbase respecto a la base.

2.1.4.2.3. Carpeta asfáltica

- **Superficie de Rodamiento:** La carpeta debe ofrecer una superficie uniforme y estable para el tránsito, con una textura y color adecuados, y debe resistir los efectos abrasivos del tráfico (Gómez, 2015).
- **Impermeabilidad:** Debe minimizar el paso de agua al interior del pavimento para proteger las capas inferiores y la subrasante de los daños por humedad (Aranda, 2010).

- **Resistencia:** La carpeta debe tener una resistencia adecuada a la tensión para complementar la capacidad estructural del pavimento y prolongar su vida útil (Harrison, 2014).

2.1.5. Método Marshall

El método Marshall es un procedimiento de diseño y evaluación de mezclas asfálticas ampliamente utilizado en la construcción de pavimentos flexibles. Fue desarrollado por Bruce Marshall en la década de 1930 y se ha consolidado como una técnica esencial para medir las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, contribuyendo a la mejora de la calidad y durabilidad de las carreteras (Huang, 2004).

El método se centra en evaluar dos propiedades fundamentales de las mezclas asfálticas: la estabilidad, que es la capacidad de resistir deformaciones bajo carga, y la fluencia, que representa la deformación total que experimenta la muestra bajo la carga aplicada.

2.1.5.1. Principios del Método Marshall

El método Marshall se basa en la aplicación de una carga estática a una muestra cilíndrica compactada de mezcla asfáltica para evaluar su resistencia y capacidad de deformación. La estabilidad de la mezcla se refiere a su resistencia a la deformación y desplazamiento bajo las cargas del tráfico, mientras que la fluencia indica la deformación plástica que ocurre durante el ensayo. El equilibrio entre estas propiedades es crucial para garantizar que el pavimento sea lo suficientemente rígido para soportar las cargas de tráfico, pero también lo suficientemente flexible para adaptarse a las tensiones sin agrietarse (Asociación Española de la Carretera, 2008).

2.1.5.2. Equipo Marshall

El equipo Marshall es un conjunto de dispositivos utilizados para evaluar la calidad y el desempeño de las mezclas asfálticas en la construcción de pavimentos. Permite medir dos propiedades fundamentales: la estabilidad, que es la capacidad de la mezcla para resistir las deformaciones bajo carga, y la fluencia, que indica la deformación total que la muestra experimenta bajo la carga aplicada. A través de la aplicación de una carga estática a una muestra compactada, el equipo Marshall proporciona datos esenciales para el diseño y la optimización de las mezclas asfálticas, asegurando que cumplan con los estándares de

resistencia y durabilidad necesarios para su uso en carreteras y otras infraestructuras viales (Asociación Española de la Carretera, 2008).

2.1.5.2.1. Componentes del Equipo

El equipo Marshall consta de varios componentes clave:

- **Prensa de carga:** Aplicada a una velocidad constante para inducir la deformación de la muestra. Esta prensa permite aplicar una carga de compresión gradual y controlada hasta que se produce la falla de la muestra, registrando la carga máxima soportada.
- **Moldes:** Cilindros metálicos utilizados para compactar la mezcla asfáltica en especímenes estándar. Garantizan la consistencia en el tamaño y forma de las muestras, lo que es esencial para obtener resultados reproducibles.
- **Termómetro:** Asegura que la muestra se somete a la prueba a una temperatura controlada, generalmente entre 60°C y 70°C, ya que la viscosidad del ligante asfáltico y, por lo tanto, el comportamiento de la mezcla, dependen de la temperatura.
- **Baño de agua:** Utilizado para acondicionar las muestras a la temperatura de ensayo antes de la aplicación de la carga.

2.1.5.2.2. Preparación del Equipo

La preparación del equipo Marshall es un paso crítico para garantizar la precisión y reproducibilidad de los resultados. Esto incluye la calibración y ajuste de la prensa, la verificación de la temperatura del baño de agua, y la configuración adecuada de los moldes y pistones.

La muestra se coloca en un molde cilíndrico y se compacta mediante golpes de un martillo de peso y altura estándar, siguiendo las normativas ASTM D6927 y AASHTO T245 (ASTM International, 2018).

2.1.5.2.3. Especificaciones Técnicas

El equipo Marshall opera bajo condiciones específicas establecidas por normativas internacionales. Según la ASTM D6927, la velocidad de carga debe ser de 50.8 mm/min (2 pulgadas/minuto), y la prueba se realiza a una temperatura de 60°C (140°F). La muestra

debe ser compactada con 50 golpes por cada cara para garantizar una densidad uniforme y representativa de las condiciones de campo.

2.1.5.3. Procedimiento de Ensayo con el Equipo Marshall

El procedimiento que se utiliza para el manejo del ensayo con el equipo Marshall es el siguiente:

2.1.5.3.1. Preparación de la Muestra

La preparación de la muestra es fundamental para el éxito del ensayo. Consiste en calentar la mezcla asfáltica a la temperatura de compactación y luego colocarla en el molde cilíndrico para ser compactada. La compactación se realiza aplicando golpes uniformes con un martillo, lo que simula el proceso de compactación en campo. Una vez compactada, la muestra se acondiciona en un baño de agua a 60°C por 30 a 40 minutos para asegurar una distribución uniforme de la temperatura antes del ensayo (Roberts, et al., 1996).

2.1.5.3.2. Realización del Ensayo

La muestra acondicionada se coloca en el equipo Marshall y se somete a una carga de compresión a una velocidad constante hasta que ocurre la falla. Durante el ensayo, se registra la carga máxima soportada por la muestra, que se utiliza para calcular la estabilidad Marshall. La deformación total de la muestra se mide para obtener el valor de fluencia. Los resultados obtenidos permiten evaluar la idoneidad de la mezcla asfáltica para su uso en pavimentos.

2.1.5.4. Mezclas Asfálticas en Frío y el Método Marshall

Las mezclas en frío son una alternativa a las mezclas en caliente, especialmente útiles en condiciones climáticas adversas o en lugares donde no es posible utilizar equipos de calentamiento. En el método Marshall, las mezclas en frío se preparan utilizando emulsiones asfálticas que actúan como ligante. La ventaja de las mezclas en frío es que pueden ser trabajadas y compactadas a temperatura ambiente, lo que facilita su aplicación y reduce los riesgos asociados al manejo de mezclas calientes (Jiménez del Barco, 2002).

El método Marshall se puede adaptar para evaluar la estabilidad y fluencia de las mezclas en frío, aunque los parámetros de ensayo y las condiciones de curado pueden variar respecto a las mezclas en caliente.

La estabilidad de las mezclas en frío tiende a ser inferior a la de las mezclas en caliente, pero es adecuada para aplicaciones en pavimentos de bajo tráfico y reparaciones temporales (Leonardi & Varoli, 2001).

2.1.5.5. Parámetros Clave en el Método Marshall

Los parámetros que se deben tomar en cuenta como claves para el método Marshall son los siguientes:

2.1.5.5.1. Estabilidad Marshall

La estabilidad Marshall se define como la carga máxima que una muestra de mezcla asfáltica puede soportar antes de la falla. Este parámetro es crucial para evaluar la resistencia de la mezcla a las deformaciones bajo la acción de las cargas vehiculares.

La estabilidad se expresa en unidades de fuerza (kN o lbf) y se determina durante el ensayo a medida que se aplica carga sobre la muestra. Un valor alto de estabilidad indica que la mezcla puede soportar mayores cargas sin deformarse, lo que es fundamental para pavimentos con tráfico pesado (Brown, et al., 2009).

2.1.5.5.2. Fluencia Marshall

La fluencia es una medida de la deformación plástica que sufre la mezcla bajo la carga aplicada en el ensayo. Se expresa en milímetros y representa la capacidad de la mezcla para adaptarse a las tensiones sin romperse.

Un valor adecuado de fluencia indica que la mezcla tiene suficiente flexibilidad para acomodar pequeñas deformaciones sin agrietarse, lo que es esencial para pavimentos expuestos a condiciones de carga y temperatura variables (Roberts, et al., 1996).

2.1.5.6. Criterios de Diseño de Mezclas Asfálticas usando el Método Marshall

Los criterios de diseño para el método Marshall con mezclas asfálticas son los siguientes:

2.1.5.6.1. Contenido Óptimo de Asfalto

El contenido óptimo de asfalto en una mezcla es aquel que proporciona un equilibrio adecuado entre estabilidad, fluencia, densidad y contenido de vacíos. Durante el proceso de diseño, se preparan varias muestras con diferentes porcentajes de asfalto y se evalúan sus propiedades utilizando el ensayo Marshall.

El contenido óptimo se determina como el valor que cumple con los criterios de estabilidad y fluencia establecidos por las normas, así como con el porcentaje adecuado de vacíos en la mezcla (Asociación Española de la Carretera, 2008).

2.1.5.6.2. Relación Aire-Vacíos

El porcentaje de vacíos en la mezcla compactada es otro factor clave en el diseño de mezclas asfálticas. Una mezcla con un porcentaje de vacíos demasiado bajo puede provocar problemas de exudación y reducir la vida útil del pavimento.

Por otro lado, un porcentaje de vacíos demasiado alto puede llevar a una mayor permeabilidad y, en consecuencia, a la penetración de agua y aire, lo que acelera el deterioro del pavimento. El método Marshall permite evaluar y ajustar el contenido de vacíos para asegurar la durabilidad de la mezcla (Huang, 2004).

2.1.5.7. Factores que Afectan los Resultados del Ensayo Marshall

Los factores que afectan los resultados del ensayo Marshall son los siguientes:

2.1.5.7.1. Temperatura de Ensayo

La temperatura a la que se realiza el ensayo Marshall afecta significativamente los resultados de estabilidad y fluencia. Las mezclas asfálticas son sensibles a las variaciones de temperatura; a temperaturas más altas, el ligante asfáltico se ablanda, reduciendo la estabilidad y aumentando la fluencia. Por lo tanto, es fundamental realizar el ensayo a la temperatura especificada (generalmente 60°C) para obtener resultados representativos y comparables (ASTM International, 2018).

2.1.5.7.2. Compactación de la Muestra

La densidad y la compactación de la muestra son factores críticos que influyen en los resultados del ensayo. Una compactación insuficiente puede resultar en una mayor cantidad de vacíos, lo que afecta negativamente la estabilidad.

Por otro lado, una compactación excesiva puede reducir el contenido de vacíos a un nivel que puede llevar a problemas de exudación y agrietamiento prematuro. El método Marshall incluye procedimientos estandarizados para compactar las muestras, asegurando la consistencia y la reproducibilidad de los resultados (Leonardi & Varoli, 2001).

2.1.5.8. Aplicaciones del Método Marshall en Mezclas en Frío

El método Marshall tiene diferentes aplicaciones como son las siguientes:

2.1.5.8.1. Adaptación del Ensayo para Mezclas en Frío

El método Marshall puede adaptarse para evaluar mezclas en frío, aunque los procedimientos de ensayo y los parámetros de evaluación pueden diferir de los utilizados para mezclas en caliente.

En las mezclas en frío, el ligante asfáltico se presenta en forma de emulsión o espuma, lo que afecta las propiedades de la mezcla y su comportamiento durante el ensayo. Es necesario acondicionar las muestras de mezclas en frío adecuadamente para obtener resultados fiables (Jiménez del Barco, 2002).

2.1.5.8.2. Ventajas y Limitaciones del Método Marshall en Mezclas en Frío

Las mezclas en frío presentan ventajas como la facilidad de aplicación a temperatura ambiente y la reducción de emisiones durante su fabricación y aplicación. Sin embargo, su estabilidad es generalmente menor que la de las mezclas en caliente, lo que las limita a usos en pavimentos de bajo tráfico o para reparaciones temporales. El método Marshall proporciona una base para evaluar la viabilidad de las mezclas en frío en aplicaciones específicas, considerando sus propiedades mecánicas y comportamiento bajo carga.

2.2. NORATIVA

El presente estudio se fundamenta en diversas normativas y reglamentos que establecen los criterios técnicos y metodológicos para el análisis de emulsiones asfálticas y la

construcción de pavimentos flexibles. A continuación, se presentan las principales normativas y regulaciones que rigen este trabajo:

2.2.1. Manual de Carreteras de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC)

El Manual de Carreteras de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) es uno de los documentos regulatorios más relevantes para la construcción de infraestructuras viales en Bolivia. En este manual, se establecen los lineamientos para el uso de emulsiones asfálticas en mezclas en frío, especialmente en pavimentos flexibles que requieren una combinación de resistencia y durabilidad frente a las condiciones climáticas y el tráfico vehicular.

De acuerdo con el manual, las emulsiones asfálticas utilizadas en la estabilización de pavimentos deben cumplir con requisitos de composición y manipulación para garantizar que los agregados, cuando combinados con las emulsiones, formen una estructura sólida y resistente a la deformación. El manual especifica, además, que se debe prestar atención especial a la rotura de la emulsión, la cual influye directamente en la adherencia y cohesión de la mezcla. Las emulsiones de rotura lenta, como las estudiadas en este proyecto, son valoradas por su capacidad de generar mezclas homogéneas y duraderas (ABC, 2020).

2.2.2. Reglamento Nacional de Transporte y Vialidad

El Reglamento Nacional de Transporte y Vialidad, emitido por el Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda, regula los estándares técnicos para la construcción y mantenimiento de carreteras en Bolivia. Este reglamento se enfoca en la necesidad de utilizar materiales que cumplan con criterios estrictos de calidad, y establece directrices específicas para el uso de emulsiones asfálticas en frío.

El reglamento enfatiza que las emulsiones asfálticas deben ser sometidas a un riguroso control de calidad, asegurando que su comportamiento mecánico sea adecuado para las condiciones del pavimento.

Las mezclas deben ser evaluadas mediante ensayos como el método Marshall, que permite determinar la estabilidad de la mezcla y su resistencia a la deformación bajo condiciones de carga.

Las emulsiones catiónicas de rotura lenta, combinadas con agregados de diferentes densidades, deben ser evaluadas en términos de cohesión y adhesión, factores críticos para garantizar la vida útil del pavimento (Ministerio de Obras Públicas, 2019).

2.2.3. Normas ASTM (American Society for Testing and Materials)

Las normas de la ASTM son ampliamente reconocidas a nivel internacional por su rigurosidad en el control de calidad de materiales de construcción. En el ámbito de las emulsiones asfálticas, las normas ASTM D977 y ASTM D6930 establecen los criterios que deben cumplir las emulsiones catiónicas utilizadas en mezclas asfálticas en frío.

La norma ASTM D977 define los requisitos para la composición de las emulsiones asfálticas, regulando aspectos como la viscosidad, el contenido de asfalto residual y el comportamiento de la emulsión durante el almacenamiento.

La norma ASTM D6930 regula el método de ensayo para evaluar la estabilidad de las emulsiones en frío, lo cual es fundamental para asegurar que las emulsiones de rotura lenta mantengan su cohesión cuando se combinan con agregados de diferentes densidades. La correcta aplicación de estos estándares es esencial para garantizar la durabilidad del pavimento (ASTM, 2021).

2.2.4. Caracterización de Agregados Pétreos

El agregado debe ser tratado y realizar los siguientes ensayos de laboratorio para obtener sus parámetros para la dosificación adecuada de una mezcla asfáltica:

2.2.4.1. Método para el cuarteo de muestras (ASTM C702)

Este método basado en la normativa ASTM C702 establece los procedimientos para dividir una muestra representativa de agregados en porciones más pequeñas sin alterar su composición. El cuarteo es esencial para garantizar la homogeneidad en los ensayos, ya que cualquier variación en la muestra original puede alterar los resultados de los análisis subsecuentes. Este método se emplea en combinación con otros ensayos para asegurar que las muestras obtenidas sean representativas del material total. Además, el ASTM C702 describe el uso de equipos específicos como la tabla divisora y la técnica de cuarteo manual, lo que garantiza la precisión y evita la segregación de las partículas finas y gruesas (ASTM, 2020).

Esto es fundamental en pavimentos donde la calidad y uniformidad de los agregados afectan directamente el desempeño a largo plazo de la estructura.

2.2.4.2. Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E11)

La granulometría de los agregados basado en la normativa ASTM E11, es una propiedad clave que influye en la densidad y la capacidad de soporte de las mezclas asfálticas. El ensayo de tamizado es utilizado para determinar la distribución de tamaños de las partículas de los agregados, lo que permite elaborar curvas granulométricas.

Estas curvas son fundamentales para garantizar una mezcla balanceada que ofrezca buenas propiedades de trabajabilidad, estabilidad y resistencia. La normativa ASTM E11 especifican los requisitos para los tamices y las técnicas de tamizado que deben ser seguidas rigurosamente.

Los agregados con una adecuada distribución granulométrica proporcionan mezclas densamente compactadas con mínimos vacíos, lo cual es esencial para la durabilidad y resistencia a la deformación de los pavimentos bajo cargas de tránsito (AASHTO, 2000).

2.2.4.3. Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D2419)

Este método basado en la normativa ASTM D2419, mide la proporción de partículas finas y arcillas presentes en los agregados finos, las cuales pueden afectar negativamente la adhesión entre el ligante asfáltico y los agregados. Las partículas de arcilla tienden a retener agua y pueden reducir la resistencia de la mezcla, ya que actúan como una barrera entre el ligante y el agregado.

El equivalente de arena proporciona un valor que refleja la limpieza de los agregados finos. Un valor bajo indica la presencia de contaminantes, lo cual podría comprometer la estabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica. Este ensayo es crucial, especialmente en regiones con climas húmedos, donde la capacidad de los agregados para mantener la cohesión con el asfalto puede ser reducida debido a la presencia de agua y arcillas (ASTM, 2016).

2.2.4.4. Método para determinar el desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM C131)

Este ensayo basado en la normativa ASTM C131, evalúa la resistencia de los agregados al desgaste y a la abrasión, simulando las condiciones de tráfico en un pavimento. El método emplea una máquina de Los Ángeles, donde los agregados se someten a impactos repetidos y fricción con bolas de acero.

La resistencia al desgaste es una propiedad crítica para los agregados que se utilizan en capas de rodadura, ya que estos están directamente expuestos a las cargas vehiculares. Los resultados de este ensayo determinan la aptitud de los agregados para ser utilizados en mezclas asfálticas, especialmente en zonas con altos volúmenes de tráfico. Agregados con alta resistencia al desgaste prolongan la vida útil del pavimento, reduciendo la necesidad de mantenimiento (AASHTO, 1999).

2.2.4.5. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM C127)

Este ensayo basado en la normativa ASTM C127, mide la densidad específica y la absorción de los agregados gruesos. La densidad específica es un parámetro importante en el diseño de mezclas, ya que permite calcular la proporción de agregados y ligante asfáltico necesaria.

Una alta absorción de agua indica que el agregado puede retener más ligante asfáltico, lo que afecta las propiedades de la mezcla. La densidad de los agregados también influye en el peso volumétrico de la mezcla y su capacidad de soportar cargas. Este método es esencial para garantizar que los agregados utilizados en la mezcla asfáltica cumplan con las especificaciones requeridas, asegurando la resistencia mecánica de la estructura (ASTM, 2013).

2.2.4.6. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM C128)

Similar al método para áridos gruesos, este ensayo basado en la normativa ASTM C128, se aplica a los agregados finos. La densidad y la absorción de los áridos finos son propiedades que afectan la dosificación del ligante asfáltico.

La capacidad de absorción de los áridos finos debe controlarse adecuadamente para evitar un exceso de ligante en la mezcla, lo que podría afectar la trabajabilidad y la durabilidad del pavimento. Los áridos finos con alta absorción pueden requerir ajustes en la cantidad de emulsión o asfalto, ya que la falta de control puede derivar en mezclas que sean más susceptibles a deformaciones o fallos prematuros (ASTM, 2013).

2.2.4.7. Determinación del peso unitario de los agregados (ASTM C29)

Este ensayo basado en la normativa ASTM C29, establece la metodología para medir el peso volumétrico de los agregados en estado suelto o compactado. El peso unitario de los agregados afecta directamente el cálculo de las proporciones de materiales en la mezcla asfáltica. Una medición precisa de esta propiedad permite calcular la cantidad de agregados y ligante necesaria para obtener la compactación adecuada en el pavimento. Una correcta compactación es fundamental para asegurar que la mezcla asfáltica tenga una buena resistencia al tráfico y a las condiciones ambientales adversas (ASTM, 2009).

2.2.5. Caracterización de Emulsiones Asfálticas

2.2.5.1. Método de residuo por destilación (ASTM D6997)

Este método basado en la normativa ASTM D6997, evalúa la cantidad de asfalto residual que queda después de evaporar los componentes volátiles de la emulsión asfáltica. El contenido de asfalto residual es un indicador clave de la calidad de la emulsión y su capacidad para actuar como ligante en la mezcla asfáltica.

El procedimiento implica destilar la emulsión a temperaturas controladas, separando el agua y los componentes volátiles del asfalto. Un porcentaje adecuado de residuo asegura una buena adherencia y cohesión en la mezcla, lo que es crucial para la estabilidad del pavimento (ASTM, 2004).

2.2.5.2. Método de carga de partícula de emulsión asfáltica (ASTM D244)

El ensayo de carga de partículas basado en la normativa ASTM D244, se utiliza para determinar si la emulsión asfáltica es catiónica o aniónica, lo cual afecta su comportamiento en contacto con diferentes tipos de agregados. Las emulsiones catiónicas son más adecuadas para agregados silíceos, que tienen carga negativa. Este método es crucial para garantizar la compatibilidad entre la emulsión y el tipo de agregado utilizado

en el proyecto, lo que afecta directamente la capacidad de la mezcla para mantener su cohesión y estabilidad durante su vida útil (AASHTO, 1997).

2.2.5.3. Ensayo de viscosidad (ASTM D244)

La viscosidad de una emulsión asfáltica determina su trabajabilidad y facilidad de aplicación. Un asfalto con una viscosidad inadecuada puede resultar en dificultades durante la mezcla y la aplicación en campo. Este ensayo que se basa en la normativa ASTM D244, mide la resistencia al flujo de la emulsión, asegurando que tenga las propiedades necesarias para su manipulación. Un valor óptimo de viscosidad permite una correcta cobertura de los agregados y evita problemas como el deslizamiento o segregación en la mezcla (ASTM, 2004).

2.2.5.4. Método de ensayo de penetración (ASTM D5, AASHTO T49-97)

La penetración es una medida de la consistencia del asfalto residual de la emulsión. Este ensayo basado en la normativa internacional ASTM D5, se realiza para determinar la dureza del asfalto, lo que influye en la resistencia a la deformación y al agrietamiento del pavimento. Un mayor valor de penetración indica un asfalto más blando, que puede ser adecuado para climas fríos, mientras que un valor bajo es preferible para climas cálidos donde el asfalto necesita resistir temperaturas elevadas sin deformarse (AASHTO, 1997).

2.2.5.5. Método para determinar la densidad (ASTM D71-94)

La densidad del asfalto residual es fundamental para calcular la cantidad de emulsión necesaria en la mezcla. Este ensayo basado en la normativa internacional ASTM D71-94, garantiza que la emulsión asfáltica cumpla con los requisitos de densidad especificados para obtener un pavimento resistente y duradero. La densidad del ligante afecta la proporción de mezclado y la resistencia final de la estructura del pavimento (ASTM, 1994).

2.2.6. Método de diseño de mezclas asfálticas en frío con emulsión

El diseño de mezclas asfálticas en frío implica la selección adecuada de agregados y emulsión, garantizando propiedades como estabilidad, resistencia al agua y trabajabilidad. Este método basado en el manual de carreteras de la ABC establece las directrices para

determinar la cantidad óptima de emulsión en la mezcla, evaluando propiedades como la cohesión, la resistencia a la tracción indirecta y el contenido de vacíos.

El diseño adecuado asegura que la mezcla sea capaz de soportar las condiciones de tráfico y clima en la zona de aplicación, prolongando la vida útil del pavimento y reduciendo los costos de mantenimiento (Manual de Carreteras ABC, 2018).

CAPITULO III

APLICACIÓN METODOLÓGICA DEL

ESTUDIO

CAPITULO III

APLICACIÓN METODOLÓGICA DEL ESTUDIO

3.1. TIPO DE MEZCLA DEL TRABAJO

Para el desarrollo de esta investigación se seleccionó una mezcla asfáltica con emulsión de rotura lenta combinada con agregados de diferente graduación, diseñada para procesos de estabilización en frío. Este tipo de mezcla es comúnmente utilizado en pavimentos flexibles debido a sus propiedades de resistencia, durabilidad y su óptimo rendimiento en condiciones de tráfico vehicular moderado.

El criterio de selección de esta mezcla se basa en la capacidad de las emulsiones asfálticas de rotura lenta para proporcionar una adhesión superior en agregados de densidades variadas, lo cual optimiza la estabilidad y cohesión de la estructura asfáltica. La combinación específica de materiales permite una distribución uniforme y reduce la susceptibilidad a problemas de cohesión que pueden presentarse en entornos de alta humedad o variaciones térmicas.

Se llevó a cabo un análisis comparativo entre las mezclas de diferentes graduaciones (A, B y C) compuesta por materiales y ligantes convencionales, permitiendo identificar las propiedades mecánicas y de durabilidad de la mezcla asfáltica de rotura lenta.

3.2. MATERIALES UTILIZADOS PARA EL ESTUDIO

Para la elaboración de las mezclas asfálticas en estudio, se emplearon materiales que cumplen con las especificaciones establecidas en las normativas ASTM y ABC. Estos materiales fueron seleccionados y caracterizados de acuerdo a sus propiedades específicas, asegurando su idoneidad para el tipo de pavimento asfáltico que se pretende desarrollar.

El agregado pétreo se obtuvo de la cantera de la localidad de La Victoria, cuyas coordenadas geográficas son 21°30'22,4"S y 64°46'48,6"W, con coordenadas UTM de Este (X): 315592,86 m, Norte (Y): 7620778,61 m, y una elevación de 1988 metros. Este material fue procesado mediante trituración en la planta chancadora La Victoria y seleccionado para cumplir con los requisitos granulométricos necesarios.

Imagen 3. Planta Chancadora la Victoria



Fuente: Google Earth

Imagen 4. Material Chancado



Fuente: Elaboración Propia

El cemento asfáltico fue suministrado por la empresa Quimitec, ubicada en la ciudad de Santa Cruz, Bolivia, en las coordenadas geográficas de $17^{\circ}32'33,7''S$ y $63^{\circ}08'04,4''W$, con coordenadas UTM de Este (X): 485719,32 m, Norte (Y): 8060402,73 m. La ficha técnica del cemento asfáltico, que incluye sus propiedades fisicoquímicas y reológicas, se encuentra en el Anexo 8 y fue proporcionada por la empresa.

Imagen 5. Ubicación de la Empresa Quimitec



Fuente: Google Earth

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La caracterización de los materiales empleados en este estudio incluyó ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas tanto del agregado como del cemento asfáltico. Estas pruebas permiten definir los rangos óptimos de cada componente, asegurando la viabilidad técnica de la mezcla en condiciones de uso.

3.3.1. Caracterización de agregados

La caracterización de los agregados para la mezcla asfáltica se realizó en el laboratorio de Hormigones y Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, siguiendo los lineamientos establecidos en el “Manual de ensayos y materiales asfálticos” de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC). Los ensayos aplicados fueron los siguientes:

- Granulometría: Ensayos de granulometría de agregado grueso para muestras de 1”, $\frac{3}{4}$ y $\frac{3}{8}$, y de agregado fino (arena).
- Peso específico: Determinación del peso específico de los agregados gruesos en tamaños de 1”, $\frac{3}{4}$ y $\frac{3}{8}$, así como del agregado fino (arena).
- Peso unitario: Ensayo del peso unitario del agregado grueso (1”, $\frac{3}{4}$ y $\frac{3}{8}$) y del agregado fino (arena).

- Ensayo de desgaste de los Ángeles (ASTM C-131): Evaluación del coeficiente de desgaste para agregados gruesos de 1", $\frac{3}{4}$ y $\frac{3}{8}$, empleando la máquina de los Ángeles.
- Ensayo de equivalente de arena (ASTM D-2419): Determinación de la proporción relativa de material fino o arcilloso en muestras de agregado fino.
- Densidad de los agregados: Evaluación de la densidad en estado suelto y compactado para cada tipo de agregado.

Los resultados de los ensayos de caracterización de agregados se presentan en el Anexo I y cumplen con los criterios necesarios para la elaboración de mezclas asfálticas.

El proceso de ensayos de laboratorio se inicia con el cuarteo con cuarteadores que consiste en dividir una muestra granular en partes iguales mediante compartimientos y canales que distribuyen el material de forma homogénea. Al seleccionar y repetir el proceso con una de las mitades, se obtiene una muestra representativa, asegurando que los ensayos reflejen con precisión las características del material original.

Imagen 6. Cuarteo del agregado



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.1. Granulometría de Agregado Grueso y Fino

El ensayo de granulometría, tanto para agregados gruesos como finos, se realiza de acuerdo con la norma ASTM C136, la cual permite determinar la distribución de tamaño de las partículas en una muestra. Para el agregado grueso, se prepara una muestra, la cual se coloca en una serie de tamices con aberturas progresivamente menores que van desde 1" (25 mm) hasta el tamiz N° 200 (0,075 mm).

La muestra se somete a un proceso de agitación durante 10 minutos, lo cual facilita la separación de las partículas según su tamaño. Cada tamiz retiene una fracción específica del material, la cual es luego pesada para calcular el porcentaje acumulado de retención.

Los resultados permiten verificar la proporción de partículas en cada tamaño, lo cual es crucial para determinar si el agregado cumple con las especificaciones requeridas para una mezcla asfáltica densa.

Imagen 7. Granulometría del agregado



Fuente: Elaboración Propia

Para el análisis de la granulometría de los materiales utilizados en este estudio, se realizaron un total de tres ensayos por cada granulometría. Los valores obtenidos en cada uno de los ensayos fueron registrados de forma independiente y se utilizó el promedio de los tres resultados como base para el análisis final.

3.3.1.1.1. Granulometría de Agregado Grueso para una Muestra de 1”

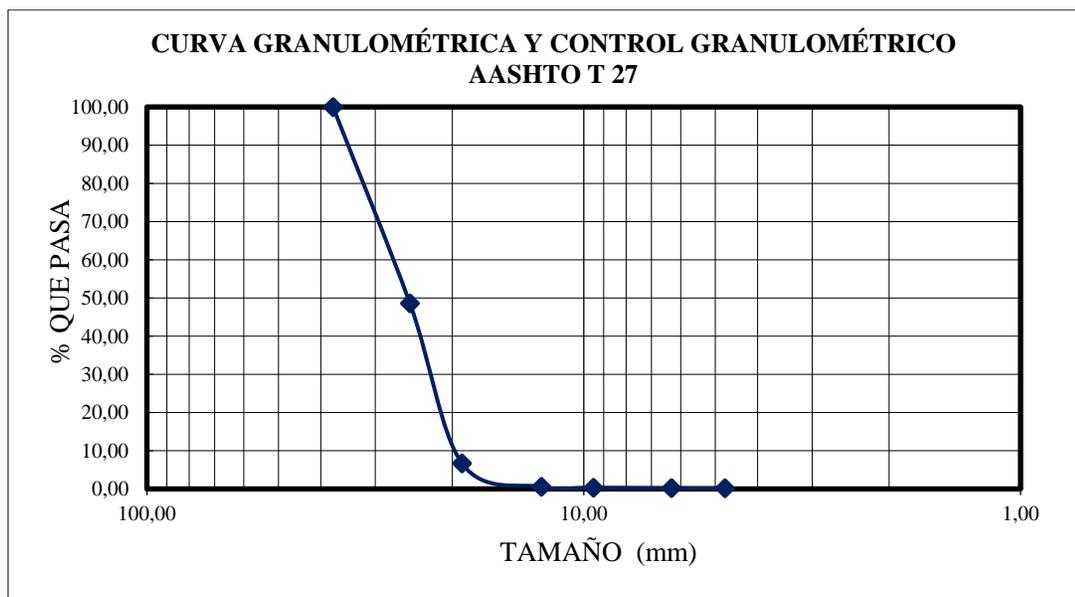
El análisis de la granulometría para el material de 1”:

Tabla 6. Granulometría de agregado grueso para una muestra de 1”

PROMEDIO						
Tamices	Tamaño	%Que pasa	%Que pasa	%Que pasa	% acum.	% Que pasa
	(mm)	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	ret. Prom.	del total
2 1/2"	63,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
2	50,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
1 1/2	37,50	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
1	25,00	45,35	53,02	47,40	51,41	48,59
¾	19,00	5,60	7,88	6,66	93,28	6,72
½	12,50	0,43	0,69	0,58	99,43	0,57
3/8	9,50	0,24	0,41	0,37	99,66	0,34
¼	6,30	0,22	0,26	0,23	99,77	0,23
Nº4	4,75	0,21	0,25	0,22	99,78	0,22
BASE	0,00	0,00	0,00	0,00	100,0	0,00
TAMAÑO MAX = 1 1/2"						

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 1. Curva Granulometría - muestra de 1”



Fuente: Elaboración Propia

La granulometría obtenida refleja los valores promedio de tres ensayos realizados sobre la muestra. El análisis indica que:

- El 100% del material pasa por los tamices de 2 1/2", 2", y 1 1/2", lo que confirma que el tamaño máximo nominal del agregado es de 1 1/2".
- En el tamiz de 1", el 48,59% del material pasa al siguiente tamiz, mientras que el 51,41% queda retenido, cumpliendo con los requisitos para pavimentos asfálticos.
- La mayor parte del material, un 93,28%, pasa por el tamiz de 3/4", con una mínima cantidad retenida en los tamices inferiores.

Estos resultados cumplen con los límites establecidos por la norma ASTM C136 y aseguran una adecuada distribución granulométrica que favorece una mezcla densa y estable. Esto optimiza la adherencia del ligante asfáltico y garantiza una buena resistencia al tráfico vehicular pesado.

3.3.1.1.2. Granulometría de Agregado Grueso para una Muestra de 3/4"

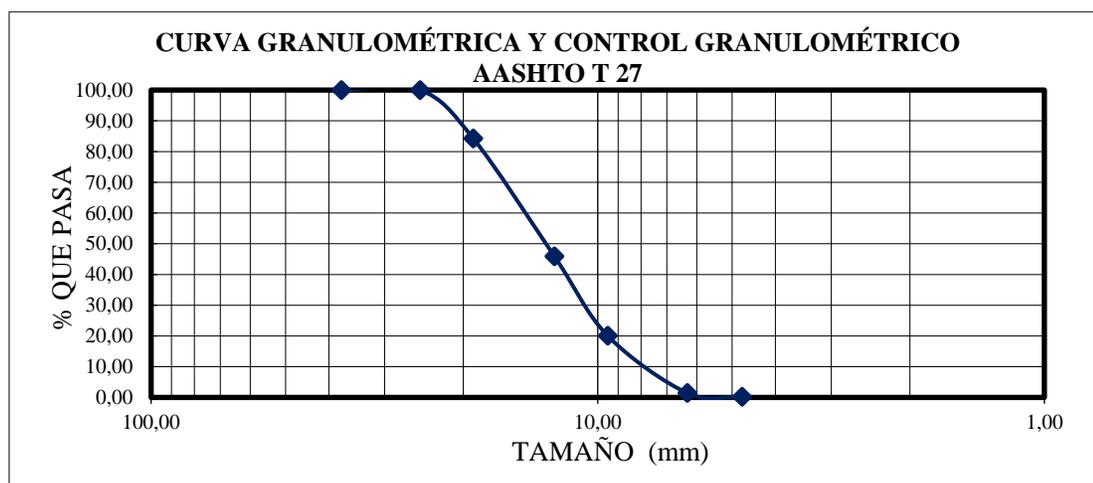
El análisis de la granulometría para el material de 3/4":

Tabla 7. Granulometría de agregado grueso para una muestra de 3/4"

PROMEDIO						
Tamices	Tamaño (mm)	%Que pasa Ensayo 1	%Que pasa Ensayo 2	%Que pasa Ensayo 3	% acum. ret. Prom.	% Que pasa del total
2 1/2"	63,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
2	50,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
1 1/2	37,50	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
1	25,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
3/4	19,00	84,69	84,37	83,74	15,73	84,27
1/2	12,50	48,10	45,03	44,60	54,09	45,91
3/8	9,50	20,35	19,04	20,80	79,94	20,06
1/4	6,30	1,38	1,33	1,57	98,57	1,43
Nº4	4,75	0,26	0,18	0,25	99,77	0,23
BASE	0,00	0,00	0,00	0,00	100	0,00
TAMAÑO MAX = 1 "						

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 2. Curva Granulométría - muestra de 3/4"



Para el agregado de 3/4", el 84,27% del material pasa al siguiente tamiz, mientras que el 15,73% queda retenido. En el tamiz de 1/2", el 45,91% pasa, mientras que el 54,09% es retenido, indicando que una cantidad significativa de material se encuentra en las fracciones mayores. Los finos, representados por el porcentaje de material que pasa el tamiz de 4,75 mm (Nº4), son limitados, alcanzando un 0,23%.

3.3.1.1.3. Granulometría de Agregado Grueso para una Muestra de 3/8"

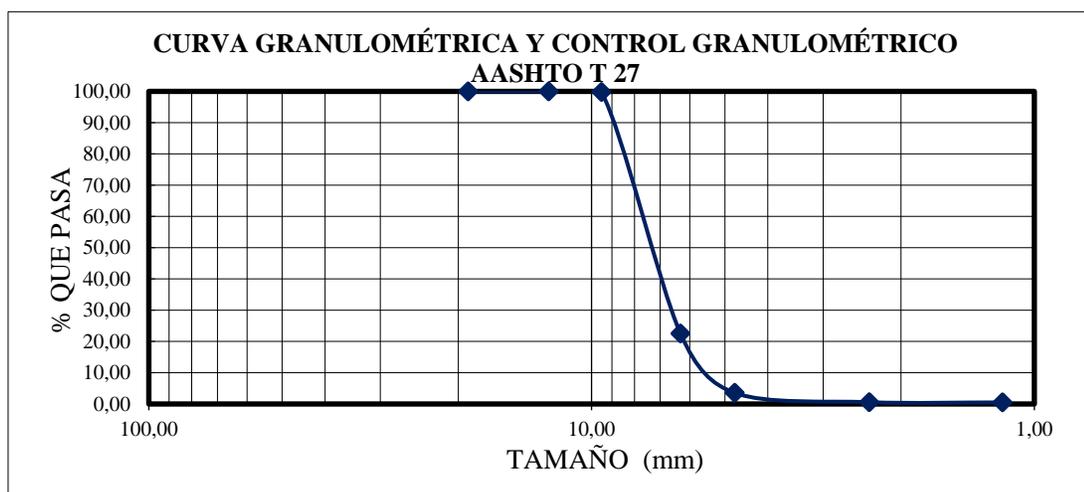
El análisis de la granulometría para el material de 3/8":

Tabla 8. Granulometría de agregado grueso para una muestra de 3/8"

PROMEDIO						
Tamices	Tamaño	%Que pasa	%Que pasa	%Que pasa	% acum.	% Que pasa
	(mm)	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	ret. Prom.	del total
1 1/2"	75,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
1	25,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
3/4	19,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
1/2	12,50	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
3/8	9,50	99,75	99,93	99,74	0,19	99,81
1/4	6,30	22,68	22,81	22,20	77,44	22,56
Nº4	4,75	3,63	3,76	3,26	96,45	3,55
Nº8	2,36	0,48	0,81	0,40	99,44	0,56
Nº16	1,18	0,43	0,72	0,35	99,50	0,50
BASE	0,00	0,00	0,00	0,00	99,94	0,00
TAMAÑO MAX = 1/2 "						

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 3. Curva Granulométrica - muestra de 3/8"



Fuente: Elaboración Propia

En la muestra de 3/8", los resultados muestran que el 99,81% del material pasa el tamiz de 3/8", mientras que el 0,19% queda retenido. En el tamiz de 1/4", el 22,56% pasa, mientras que el 77,44% se retiene, indicando que una fracción importante de material está en las fracciones mayores. Los finos, representados por el porcentaje de material que pasa el tamiz de 4,75 mm (N°4), son bajos, alcanzando un 3,55%.

3.3.1.1.4. Granulometría del Agregado Fino (Arena)

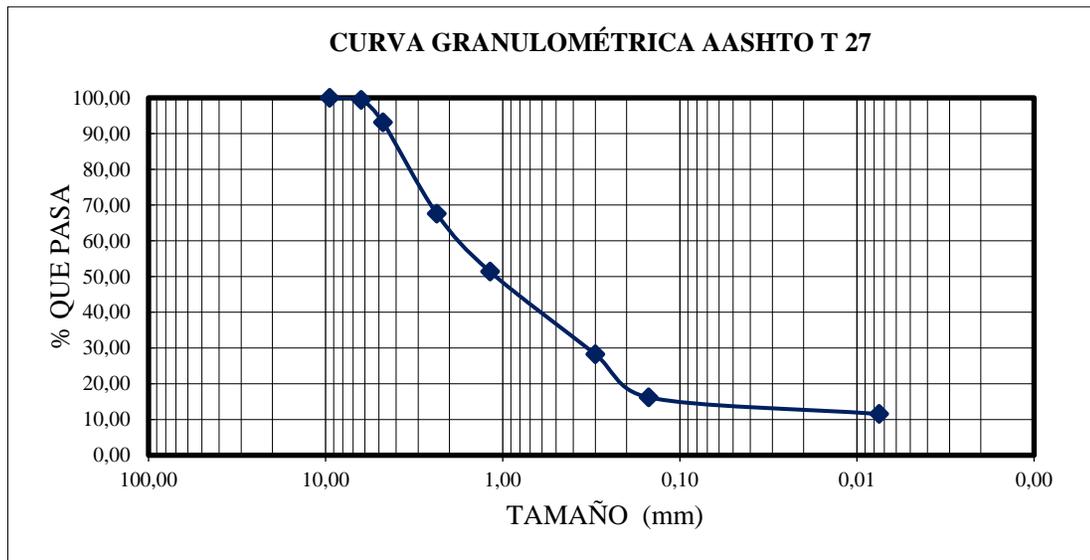
El análisis de la granulometría para la arena:

Tabla 9. Granulometría de agregado grueso para una muestra de arena

PROMEDIO						
Tamices	Tamaño	%Que pasa	%Que pasa	%Que pasa	% acum.	% Que pasa
	(mm)	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	ret. Prom.	del total
3/8	9,50	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
¼	6,30	99,40	99,53	99,26	0,60	99,40
N°4	4,75	93,21	92,38	93,79	6,87	93,13
N°8	2,36	67,74	67,31	67,76	32,40	67,60
N°16	1,18	50,93	59,75	43,44	48,63	51,37
N°50	0,30	28,41	28,96	27,41	71,74	28,26
N°100	0,15	16,32	16,56	15,70	83,81	16,19
N°200	0,01	11,55	10,84	12,23	88,46	11,54
BASE	0,00	0,00	0,00	0,00	99,14	0,00

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 4. Curva Granulometría - muestra de arena



Fuente: Elaboración Propia

En la tabla se puede observar que los resultados promedio de las tres muestras son los siguientes:

- El 100% del material pasa por los tamices de 3/8" y 1/4".
- En el tamiz N°4, el material que pasa es aproximadamente 93,13%.
- En los tamices más finos (N°8, N°16, N°50, N°100 y N°200), la proporción de material que pasa va disminuyendo gradualmente, alcanzando un 11,54% que pasa a través del tamiz N°200.

El comportamiento mostrado indica que la arena tiene una buena distribución granulométrica, con la mayoría de las partículas retenidas en los tamices más gruesos y un porcentaje razonable de finos que pasan a través del tamiz N°200, cumpliendo así con los requisitos establecidos para agregados finos utilizados en mezclas asfálticas.

Este tipo de distribución ayuda a garantizar la cohesión de la mezcla sin comprometer su permeabilidad. El contenido de partículas finas que pasa por el tamiz N°200 es adecuado para cumplir con las especificaciones para pavimentos y concreto, según lo establecido en la norma ASTM.

3.3.1.2. Peso Específico del Agregado Grueso

El ensayo de peso específico del agregado grueso se lleva a cabo según la norma ASTM C127. Este procedimiento evalúa la densidad relativa del agregado en relación con el agua y es fundamental para determinar la proporción de ligante asfáltico que el material puede retener.

Se toma una muestra, que es primero secada en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Luego, se sumerge en agua durante 24 ± 4 horas a temperatura ambiente para garantizar su saturación.

Posteriormente, se toman tres mediciones: el peso en estado seco (al salir del horno), el peso sumergido en agua y el peso en estado saturado y superficialmente seco. A partir de estos datos, se calcula el peso específico seco, el peso específico saturado y seco, y el peso específico aparente.

Imagen 8. Peso específico del agregado grueso



Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.2.1. Peso Específico del Agregado Grueso de 1”

El análisis del peso específico del agregado de 1”:

Tabla 10. Peso específico muestra de 1”

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABS.
1	4930,50	5004,00	3084,00	2,57	2,61	2,67	1,49
2	4937,00	5005,30	3087,00	2,57	2,61	2,67	1,38
3	4933,40	5007,00	3081,00	2,56	2,60	2,66	1,49
PROMEDIO				2,57	2,61	2,67	1,44

Fuente: Elaboración Propia

El peso específico promedio del agregado grueso de 1” es de 2,57 g/cm³ en seco y 2,61 g/cm³ en saturado, con una absorción del 1,44%. Estos valores indican que el agregado tiene una densidad y una capacidad de absorción adecuadas para mantener la adherencia con el ligante asfáltico, asegurando una buena estabilidad y resistencia de la mezcla bajo cargas de tráfico.

3.3.1.2.2. Peso Específico del Agregado Grueso de ¾”

El análisis del peso específico del agregado de ¾” son:

Tabla 11. Peso específico muestra de ¾”

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABS.
1	4955,10	5000,10	3095,00	2,60	2,62	2,66	0,91
2	4947,90	5000,10	3090,00	2,59	2,62	2,66	1,05
3	4948,20	5000,10	3093,00	2,59	2,62	2,67	1,05
PROMEDIO				2,60	2,62	2,66	0,98

Fuente: Elaboración Propia

Para el agregado de 3/4", el peso específico promedio es de 2,60 g/cm³ en seco y 2,62 g/cm³ en saturado, con una absorción de 0,98%.

Esta baja absorción favorece la estabilidad de la mezcla asfáltica al reducir el riesgo de desintegración por exceso de agua, permitiendo un rendimiento adecuado en el pavimento y contribuyendo a su durabilidad en condiciones de uso.

3.3.1.2.3. Peso Específico del Agregado Grueso de 3/8"

El análisis del peso específico del agregado de 3/8" son:

Tabla 12. Peso específico muestra de 3/8"

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABS.
1	4934,60	5000,20	3097,00	2,59	2,63	2,69	1,33
2	4932,90	5000,50	3096,00	2,59	2,63	2,69	1,37
3	4936,90	5000,60	3096,00	2,59	2,63	2,68	1,29
PROMEDIO				2,59	2,63	2,69	1,35

Fuente: Elaboración Propia

El agregado de 3/8" presenta un peso específico promedio de 2,59 g/cm³ en seco y 2,63 g/cm³ en saturado, con una absorción de 1,35%.

Estos valores cumplen con los estándares, indicando que el agregado tiene buena densidad y baja absorción, lo cual asegura una buena adherencia del asfalto y estabilidad en la estructura de la mezcla, favoreciendo la durabilidad del pavimento.

3.3.1.3. Peso Específico del Agregado Fino (Muestra de Arena)

Este ensayo se realiza bajo la norma ASTM C128, que establece el procedimiento para determinar el peso específico del agregado fino, fundamental para analizar su capacidad de retención y adherencia del ligante en la mezcla asfáltica.

Primero la muestra de arena se sumerge en agua durante 24 ± 4 horas para asegurar su saturación total. Luego de este periodo, se elimina el exceso de agua hasta llevar la muestra a su condición superficialmente seca.

Para verificar que la arena esté en su punto de saturación con superficie seca, se introduce en un molde cónico y se compacta con 25 golpes de un pistón, dejándolo caer desde una altura de 1 cm.

Si la arena no se desmorona al retirar el molde, se considera que ha alcanzado el estado adecuado. Luego, se toma una muestra de 500 gramos, que se coloca en un picnómetro y se llena con agua a 20°C hasta alcanzar los 250 cm^3 .

Posteriormente, se realiza una serie de pesajes en el picnómetro, obteniendo así datos para calcular el peso específico seco, el peso específico saturado y el peso específico aparente.

Imagen 9. Peso Específico del Agregado Fino



Fuente: Elaboración Propia

El análisis del peso específico de la arena:

Tabla 13. Peso específico muestra de 3/4"

MTRA. N°	PESO MTRA. (gr)	PESO MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRAZ + AGUA (gr)	AGUA AGREG. AL MATRÁZ "W" (ml) ó (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOL. DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRANEL (gr/cm ³)	P. E. SAT. CON SUP. SECA (gr/cm ³)	P. E. APARENT E (gr/cm ³)	% DE ABSORC.
1	500,20	236,80	1032,50	295,50	493,60	500,00	2,41	2,44	2,49	1,32
2	500,20	166,90	1001,30	334,20	493,90	500,00	2,98	3,02	3,09	1,26
3	500,20	196,00	987,20	291,00	493,80	500,00	2,36	2,39	2,43	1,28
PROMEDIO							2,59	2,62	2,67	1,29

Fuente: Elaboración Propia

El peso específico promedio de la arena es de 2,59 g/cm³ en seco y 2,62 g/cm³ en estado saturado, con una absorción del 1,29%. Estos valores cumplen con los requisitos de densidad y absorción para mezclas asfálticas, ya que se considera adecuado un peso específico seco entre 2,55 y 2,65 g/cm³ y en estado saturado entre 2,60 y 2,70 g/cm³. La absorción debe idealmente ser menor al 2%.

Dentro de este rango, la arena aporta la cohesión y densidad necesarias para mejorar la estabilidad de la mezcla asfáltica, reduciendo vacíos y el riesgo de separación en la capa de pavimento. Su composición favorece la adherencia con el ligante, minimizando problemas de compactación y asegurando un pavimento durable y resistente a cargas vehiculares.

3.3.1.4. Peso Unitario del Agregado

El ensayo de peso unitario se realiza conforme a la norma ASTM C29, la cual permite determinar el volumen ocupado por el agregado en estado suelto o compactado. Este procedimiento es esencial para definir el volumen de material necesario para una mezcla específica. En este ensayo, se toma una muestra de agregado grueso o fino. La muestra se coloca en un recipiente de volumen conocido y se mide su peso en dos condiciones: suelta y compactada.

Para obtener el peso unitario suelto, se llena el recipiente sin compactar el material, para el peso unitario compactado, se realiza una compactación ligera en tres capas mediante golpes de varilla. Los valores obtenidos indican la densidad de empaque del agregado en condiciones similares a las que se encontrará en el pavimento, y permiten ajustar la dosificación del ligante asfáltico y la cantidad de material en la mezcla.

Imagen 10. Peso Unitario del Agregado



Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.4.1. Peso Unitario del Agregado Grueso de 1” (Suelto y Compactado)

El análisis del peso unitario del agregado de 1”:

Tabla 14. Peso unitario suelto del agregado de 1”

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	5845,00	9848,40	18520,00	12675,00	1,29
2	5845,00	9848,40	18515,00	12670,00	1,29
3	5845,00	9848,40	18532,00	12687,00	1,29
PROMEDIO					1,29

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15. Peso unitario compactado del agregado de 1”

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm ³)
1	5845,00	9848,40	20365,00	14520,00	1,47
2	5845,00	9848,40	20410,00	14565,00	1,48
3	5845,00	9848,40	20320,00	14475,00	1,47
PROMEDIO					1,47

Fuente: Elaboración Propia

El peso unitario suelto promedio del agregado de 1” es de 1,29 g/cm³, mientras que el peso unitario compactado es de 1,47 g/cm³.

Esta diferencia indica que el agregado tiene buena capacidad de compactación, lo cual es esencial para alcanzar la densidad requerida en la mezcla asfáltica, aumentando su resistencia a la carga y durabilidad en uso.

3.3.1.4.2. Peso Unitario del Agregado Grueso de ¾” (Suelto y Compactado)

El análisis del peso unitario del agregado de ¾”:

Tabla 16. Peso unitario suelto del agregado de ¾”

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	5715,00	9883,70	18990,00	13275,00	1,34
2	5715,00	9883,70	19070,00	13355,00	1,35
3	5715,00	9883,70	19120,00	13405,00	1,36
PROMEDIO					1,35

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 17. Peso unitario compactado del agregado de ¾”

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm ³)
1	5715,00	9883,70	20620,00	14905,00	1,51
2	5715,00	9883,70	20545,00	14830,00	1,50
3	5715,00	9883,70	20645,00	14930,00	1,51
PROMEDIO					1,51

Fuente: Elaboración Propia

Para el agregado de ¾”, el peso unitario promedio suelto es de 1,35 g/cm³ y el compactado es de 1,51 g/cm³. Esta compactibilidad garantiza una estructura estable y de alta densidad en la mezcla asfáltica, mejorando la capacidad de soporte del pavimento bajo condiciones de tráfico moderado y evitando deformaciones.

3.3.1.4.3. Peso Unitario del Agregado Grueso de 3/8" (Suelto y Compactado)

El análisis del peso unitario del agregado de 3/8":

Tabla 18. Peso unitario suelto del agregado de 3/8"

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	5715,00	9883,70	18075,00	12360,00	1,25
2	5715,00	9883,70	18110,00	12395,00	1,25
3	5715,00	9883,70	18070,00	12355,00	1,25
PROMEDIO					1,25

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19. Peso unitario compactado del agregado de 3/8"

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm ³)
1	5715,00	9883,70	19650,00	13935,00	1,41
2	5715,00	9883,70	19580,00	13865,00	1,40
3	5715,00	9883,70	19705,00	13990,00	1,42
PROMEDIO					1,41

Fuente: Elaboración Propia

El agregado de 3/8" tiene un peso unitario suelto promedio de 1,25 g/cm³ y compactado de 1,41 g/cm³. Estos resultados sugieren una buena capacidad de compactación, lo cual permite que la mezcla asfáltica logre la densidad necesaria para soportar esfuerzos mecánicos y asegura la estabilidad estructural en aplicaciones de pavimento.

3.3.1.4.4. Peso Unitario del Agregado Fino Arena (Suelto y Compactado)

El análisis del peso unitario de la arena:

Tabla 20. Peso unitario suelto del agregado de 3/8"

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	2605,00	3033,59	7200,00	4595,00	1,51
2	2605,00	3033,59	7275,00	4670,00	1,54
3	2605,00	3033,59	7295,00	4690,00	1,55
PROMEDIO					1,53

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 21. Peso unitario compactado del agregado de 3/8"

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	2605,00	3033,59	7905,00	5300,00	1,75
2	2605,00	3033,59	7890,00	5285,00	1,74
3	2605,00	3033,59	7870,00	5265,00	1,74
PROMEDIO					1,74

Fuente: Elaboración Propia

La arena presenta un peso unitario suelto promedio de 1,53 g/cm³ y compactado de 1.74 g/cm³. Esta capacidad de compactación es esencial para asegurar la densidad adecuada en la mezcla, promoviendo una buena cohesión con el asfalto y una distribución uniforme de la carga, reduciendo el riesgo de fisuras en el pavimento.

3.3.1.5. Ensayo del Desgaste de los Ángeles (ASTM C131)

El ensayo del desgaste de los Ángeles, basado en la norma ASTM C131, evalúa la resistencia al desgaste y abrasión de los agregados gruesos, lo cual es crucial para asegurar su durabilidad en condiciones de tráfico. Este ensayo consiste en someter una muestra de

aproximadamente 5000 gramos a abrasión en la máquina de los Ángeles, que contiene entre 10 y 12 bolas de acero de un diámetro aproximado de 46,8 mm y una masa de 390 a 445 gramos.

La muestra y las bolas se introducen en un tambor giratorio que, rota a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto, completando 500 revoluciones. Al finalizar el proceso, se retiran los agregados y se tamizan para determinar el porcentaje de material que se ha desgastado.

Un desgaste aceptable para agregados de pavimentos suele estar por debajo del 40%, eso indica que el agregado tiene la resistencia suficiente para soportar las cargas de tránsito sin fragmentarse, siendo adecuado para su uso en mezclas asfálticas.

Imagen 11. Ensayo del desgaste de los Ángeles



Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.5.1. Ensayo del Desgaste de los Ángeles para Grava de 1”

El análisis del peso unitario del agregado de 1”:

Tabla 22. Desgaste de los ángeles para muestra de 1”

METODO		A	B	C	D
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr)			
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
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N°DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		30	15	15	15

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 23. Desgaste de los ángeles para muestra de 1”

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE
A	5000,00	3580,30	28,39

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24. Separación de piedra pizarra para muestra de 1”

PESO DE LA MUESTRA	PESO DE LA PIEDRA PIZARRA	PESO FINAL
5000,00	1419,70	3580,30

Fuente: Elaboración Propia

El porcentaje de desgaste obtenido para la grava de 1” es de 28,39%, lo cual está dentro del límite máximo permitido por la norma ASTM C131. Esto indica que el material tiene buena resistencia a la abrasión, característica que es clave para mantener la durabilidad del pavimento ante el tránsito vehicular y la acción de factores climáticos.

3.3.1.5.2. Ensayo del Desgaste de los Ángeles para Grava de 3/4"

El análisis del peso unitario del agregado de 3/4":

Tabla 25. Desgaste de los ángeles para muestra de 3/4"

METODO		A	B	C	D
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL AEMPLEAR (gr)			
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
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N°DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		30	15	15	15

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26. Desgaste de los ángeles para muestra de 3/4"

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE
B	5000,00	3675,10	26,50

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27. Separación de piedra pizarra para muestra de 3/4"

PESO DE LA MUESTRA	PESO DE LA PIEDRA PIZARRA	PESO FINAL
5000,00	1324,90	3675,10

Fuente: Elaboración Propia

La grava de 3/4" presenta un porcentaje de desgaste de 26,50%, cumpliendo con los requisitos normativos. Este resultado indica que el agregado es resistente al desgaste y adecuado para aplicaciones en pavimento asfáltico, garantizando una buena vida útil y resistencia a la abrasión por tráfico.

3.3.1.5.3. Ensayo del Desgaste de los Ángulos para Grava de 3/8"

El análisis del peso unitario del agregado de 3/8":

Tabla 28. Desgaste de los ángulos para muestra de 3/4"

METODO		A	B	C	D
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL AEMPLEAR (gr)			
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
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N°DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		30	15	15	15

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 29. Desgaste de los ángulos para muestra de 3/4"

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE
C	5000,00	3702,90	25,94

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 30. Separación de piedra pizarra para muestra de 3/4"

PESO DE LA MUESTRA	PESO DE LA PIEDRA PIZARRA	PESO FINAL
5000,00	1297,10	3702,90

Fuente: Elaboración Propia

El ensayo de desgaste para la grava de 3/8" dio como resultado un porcentaje de desgaste de 25,94%. Este bajo valor cumple con los estándares requeridos, mostrando que el agregado tiene alta resistencia a la abrasión, ideal para su uso en mezclas asfálticas destinadas a soportar tráfico constante sin degradación rápida.

3.3.1.6. Ensayo de Equivalente de Arena (ASTM D2419)

El ensayo de equivalente de arena, conforme a la norma ASTM D2419, es un método de campo que determina la proporción relativa de material arcilloso o polvillo fino en agregados finos. Este ensayo es fundamental para evaluar la limpieza del agregado y su capacidad para integrarse adecuadamente en la mezcla asfáltica. Se toma una muestra de 100 gramos de suelo o agregado fino, y se mezcla con una solución floculante en un cilindro de plástico graduado.

Tras agitar la muestra en la solución, se añaden más de esta solución para que el material arcilloso quede en suspensión sobre la arena. Después de un período de sedimentación de 20 minutos, se mide la altura de la arcilla suspendida y la altura de la arena. La relación entre estas alturas se expresa como el equivalente de arena en porcentaje. Un equivalente de arena de 80% indica un bajo contenido de partículas arcillosas, asegurando así que el agregado es adecuado para la mezcla asfáltica, mientras que valores inferiores al 70% pueden indicar un alto contenido de arcillas que podría afectar la cohesión y durabilidad de la mezcla.

El análisis del ensayo de equivalente de arena:

Tabla 31. Equivalente de Arena %

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	8,56	9,26	92,44
2	8,59	9,19	93,47
3	8,55	9,15	93,44
		Promedio	93,12

Fuente: Elaboración Propia

El ensayo de equivalente de arena arroja un promedio de 93,12%, indicando un bajo contenido de partículas finas o arcillosas en la muestra. Este alto porcentaje es favorable para mezclas asfálticas, ya que asegura la limpieza del agregado y mejora la cohesión de la mezcla, reduciendo el riesgo de problemas de estabilidad en el pavimento.

3.3.1.7. Densidad de los Agregados

La determinación de la densidad de los agregados se lleva a cabo para evaluar su capacidad de compactación y ocupación de volumen en la mezcla asfáltica.

Este procedimiento implica el uso de un recipiente de volumen conocido y la realización de pesajes tanto en estado suelto como compactado. Se llenan recipientes de 943.30 cm³ con la muestra, calculando su densidad en tres condiciones: suelta, compactada manualmente y compactada mecánicamente.

El análisis de la densidad de los agregados:

Tabla 32. Densidad del agregado para la muestra A

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	4170,80	943,30	5975,78	1804,98	1,91
2	4170,80	943,30	5971,76	1800,96	1,91
3	4170,80	943,30	5977,79	1806,99	1,92
PROMEDIO					1,91

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 33. Densidad del agregado para la muestra A

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	4170,80	943,30	5956,00	1785,20	1,89
2	4170,80	943,30	5952,00	1781,20	1,89
3	4170,80	943,30	5958,00	1787,20	1,89
PROMEDIO					1,89

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 34. Densidad del agregado para la muestra A

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	4170,80	943,30	5857,00	1686,20	1,79
2	4170,80	943,30	5878,60	1707,80	1,81
3	4170,80	943,30	5899,20	1728,40	1,83
PROMEDIO					1,81

Fuente: Elaboración Propia

La densidad promedio en estado suelto para las tres muestras muestra una ligera variación, con la gradación A alcanzando 1,91 g/cm³, la gradación B 1,89 g/cm³, y la gradación C 1,81 g/cm³. Aunque la muestra A presenta la mayor densidad, todas las muestras están dentro de un rango adecuado para aplicaciones asfálticas. La variación en la densidad de las muestras refleja diferencias en la estructura del agregado, lo cual puede influir en la capacidad de compactación y en la ocupación de volumen dentro de la mezcla. Estas densidades son adecuadas para la fabricación de mezclas asfálticas, ya que proporcionan una estructura compacta y estable, permitiendo una buena distribución de cargas y ayudando a evitar deformaciones en la capa de rodadura del pavimento.

3.3.2. Caracterización de la Emulsión Asfáltica

La caracterización de la emulsión asfáltica se realizó en el Laboratorio de Hormigones y Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, siguiendo el "Manual de Ensayos y Materiales Asfálticos" de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC). Los ensayos aplicados para evaluar las propiedades de la emulsión asfáltica fueron los siguientes:

- Método de Residuo por Destilación (ASTM D6997, AASHTO T59-97)
- Método de Carga de Partícula de Emulsión Asfáltica (ASTM D244, AASHTO T59-97)
- Método para Determinar la Densidad (ASTM D71-94, AASHTO T229-97)
- Ensayo de Penetración
- Método para Determinar la Ductilidad

- Ensayo de Viscosidad (ASTM D244, AASHTO T59-97)
- Método para Determinar el Equivalente de Arena

Los resultados detallados de cada ensayo se encuentran en el Anexo II.

3.3.2.1. Método de Residuo por Destilación (ASTM D6997, AASHTO T59-97)

El método de residuo por destilación permite evaluar la cantidad de asfalto presente en la emulsión mediante la evaporación de componentes volátiles. En este ensayo, la emulsión se somete a destilación, y el porcentaje de residuo resultante representa la concentración de material asfáltico. Este parámetro es esencial, ya que indica la cantidad de asfalto activo que puede formar una capa protectora en el pavimento. Para emulsiones asfálticas de calidad, se espera un residuo entre 60% y 65%, lo cual asegura una buena cobertura y resistencia en la aplicación final.

Tabla 35. Prueba de destilación

Nro. Ensayos	Residuo %	Promedio %
1	63,6	63,77
2	63,9	
3	63,8	

Fuente: Elaboración Propia

En el análisis de esta emulsión, se obtuvo un residuo promedio de 63,77%, lo cual se encuentra dentro del rango recomendado. Este valor sugiere que la emulsión tiene una cantidad suficiente de asfalto, garantizando que la mezcla asfáltica será estable y duradera al aplicar esta emulsión en pavimentos.

3.3.2.2. Método de Carga de Partícula de Emulsión Asfáltica (ASTM D244, AASHTO T59-97)

El método de carga de partícula mide la polaridad de las partículas de asfalto en la emulsión, indicando si la carga es positiva o negativa. Las emulsiones catiónicas (carga positiva) son las más utilizadas en pavimentos, ya que esta carga favorece la adhesión de la emulsión con los agregados, mejorando la cohesión de la mezcla asfáltica. Este ensayo permite seleccionar emulsiones con cargas adecuadas para su uso con diferentes tipos de agregados, optimizando la resistencia del pavimento.

Tabla 36. Ensayo de la Carga de Partícula

TIPO DE GARGA:	POSITIVA
-----------------------	-----------------

Fuente: Elaboración Propia

En este ensayo, se determinó que la carga de la emulsión es positiva, lo que cumple con los requisitos técnicos para emulsiones catiónicas. La carga positiva de las partículas asegura una mejor adherencia a los agregados minerales, lo que es ideal para aplicaciones en pavimentos.

3.3.2.3. Método para Determinar la Densidad (ASTM D71-94, AASHTO T229-97)

El método para determinar la densidad de la emulsión asfáltica mide la relación entre su masa y volumen, un parámetro esencial para diseñar mezclas de pavimento. Este ensayo se realiza utilizando un picnómetro que permite medir con precisión la densidad del material. Una densidad adecuada, entre 0,97 y 1,02 g/cm³, asegura que la emulsión sea homogénea y favorece su capacidad de compactación, proporcionando una mezcla uniforme y bien integrada en el pavimento. La densidad promedio obtenida fue de 1,001 g/cm³, dentro del rango óptimo, lo cual garantiza que la emulsión tiene la consistencia adecuada para lograr una mezcla estable y cohesiva en el pavimento. Esta densidad contribuye a una aplicación controlada y a la correcta adherencia en el material asfáltico.

Tabla 37. Ensayo de densidad

	1	2	3
Peso del picnómetro (gr) (A):	34,2	34	34,3
Peso del picnómetro + agua destilada (gr) (B):	86	87,2	89,4
Peso del picnómetro + cemento asfáltico (gr) (C):	65,7	65,5	65,5
Peso del picnómetro + agua destilada + cemento asfáltico (gr) (D):	86,1	87,3	89,3
Densidad (kg/m³):	1,0032	1,0032	0,997
Densidad promedio (kg/m³):	1,001		

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.4. Ensayo de Penetración

El ensayo de penetración mide la consistencia de la emulsión asfáltica y su capacidad para deformarse bajo una carga. Este ensayo, en el que una aguja penetra la muestra bajo condiciones controladas, indica la dureza de la emulsión; para pavimentos de tráfico moderado, los valores ideales de penetración oscilan entre 100 y 150 décimas de milímetro, reflejando una emulsión con buena consistencia.

Tabla 38. Ensayo de Penetración

	Temperatura	Carga	Tiempo
Condiciones:	5 segundos	100 gr	25 °C
	1	2	3
Lecturas:	140	149	135
	126	130	122
	115	155	120
Penetración Promedio:	127	145	126
Penetración final:	132		

Fuente: Elaboración Propia

En este caso, se obtuvo un valor de penetración promedio de 132 décimas de milímetro, adecuado para soportar deformaciones sin fisurarse

Imagen 12. Ensayo de Penetración



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 13. Muestra del Ensayo de Penetración



Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.5. Método para Determinar la Ductilidad

El ensayo de ductilidad mide la capacidad de la emulsión asfáltica para estirarse antes de romperse, un indicador importante para prevenir grietas en el pavimento. En este ensayo, la emulsión se estira a una velocidad constante hasta romperse, y se mide su elongación en centímetros. Un valor superior a 40 cm es deseable para asegurar la flexibilidad y evitar fisuras bajo cargas.

Tabla 39. Ensayo de Ductilidad

	1	2	3
Elongación (cm):	89,6	99	103
Promedio (cm):	97		

Fuente: Elaboración Propia

El valor de ductilidad promedio obtenido fue de 97 cm, superior al valor estándar recomendado. Este valor indica que la emulsión aún presenta una buena capacidad de elongación, lo cual ayuda a prevenir fisuras en condiciones normales.

Imagen 14. Ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 15. Muestras del Ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.6. Ensayo de Viscosidad (ASTM D244, AASHTO T59-97)

El ensayo de viscosidad mide la resistencia de la emulsión asfáltica al flujo, determinando su facilidad de aplicación. Este ensayo se realiza mediante un viscosímetro estándar, y para aplicaciones asfálticas, la viscosidad ideal debe estar entre 20 y 100 segundos. Una emulsión con la viscosidad adecuada fluye lo suficiente para cubrir de forma homogénea, pero es lo bastante densa para formar una capa estable.

Tabla 40. Ensayo de Viscosidad

Temperatura del Ensayo °C	Viscosidad s	Promedio s
25	25	26,67
25	28	
25	27	

Fuente: Elaboración Propia

En este ensayo, la emulsión obtuvo una viscosidad promedio de 26,67 segundos, dentro del rango ideal. Este valor sugiere que la emulsión es fluida para ser aplicada uniformemente, pero con la consistencia suficiente para crear una capa adherente y compacta.

3.3.2.7. Método para Determinar el Equivalente de Arena

El método de equivalente de arena mide la proporción de material fino, como arcillas y limos, en la emulsión asfáltica, un parámetro crucial para evitar impurezas que afecten la cohesión de la mezcla. En este ensayo, un equivalente de arena mayor al 85% indica que la emulsión tiene suficiente limpieza para garantizar una buena cohesión en el pavimento.

Tabla 41. Ensayo de equivalencia de arena

N° de muestra	H1 (cm)	H2 (cm)	Equivalente de arena (%)
1	8,56	9,26	92,44
2	8,59	9,19	93,47
3	8,55	9,15	93,44
		Promedio	93,12

Fuente: Elaboración Propia

El resultado promedio del equivalente de arena fue de 93.12%, lo cual supera el umbral mínimo, confirmando que la emulsión está libre de impurezas significativas. Este valor garantiza que la emulsión proporcionará una buena cohesión y estabilidad en la mezcla asfáltica, contribuyendo a la durabilidad y resistencia del pavimento, evitando problemas de adherencia en la estructura final.

3.4. DISEÑO MÉTODO MARSHALL POR GRADACIONES

El método Marshall es una herramienta esencial en el diseño de mezclas asfálticas, permitiendo establecer parámetros clave que garantizan el rendimiento óptimo de los pavimentos flexibles. En esta sección, se presenta un análisis detallado del diseño de mezclas correspondiente a tres gradaciones específicas (A, B y C).

Para cada gradación, se seguirán procedimientos técnicos rigurosos que incluyen la determinación de la combinación granulométrica, el contenido inicial de emulsión asfáltica y los contenidos de ligante óptimos en función de la granulometría. Estas etapas culminan con la aplicación del método Marshall, que evalúa la estabilidad, el flujo y las propiedades volumétricas de las mezclas diseñadas, asegurando su adecuación a las exigencias de las normativas vigentes y a las condiciones de servicio específicas.

3.4.1. Gradación A

El análisis para la gradación A se centra en determinar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica necesario para garantizar el desempeño estructural y funcional de la mezcla diseñada. En esta etapa, la combinación granulométrica asegura una adecuada distribución de tamaños de partículas, mientras que el contenido inicial de emulsión asfáltica se selecciona de forma preliminar, en función de las características del agregado y la granulometría.

Posteriormente, mediante los ensayos Marshall, se evalúan parámetros críticos como la estabilidad, el flujo y la densidad. Estos resultados permiten identificar el contenido de ligante que maximiza la cohesión interna de la mezcla y optimiza su durabilidad bajo condiciones específicas de servicio, obteniendo así el valor de emulsión asfáltica que será empleado en el diseño fina, los resultados de todos los ensayos de la gradación A se encuentran en el Anexo III.

3.4.1.1. Faja granulométrica para la gradación A

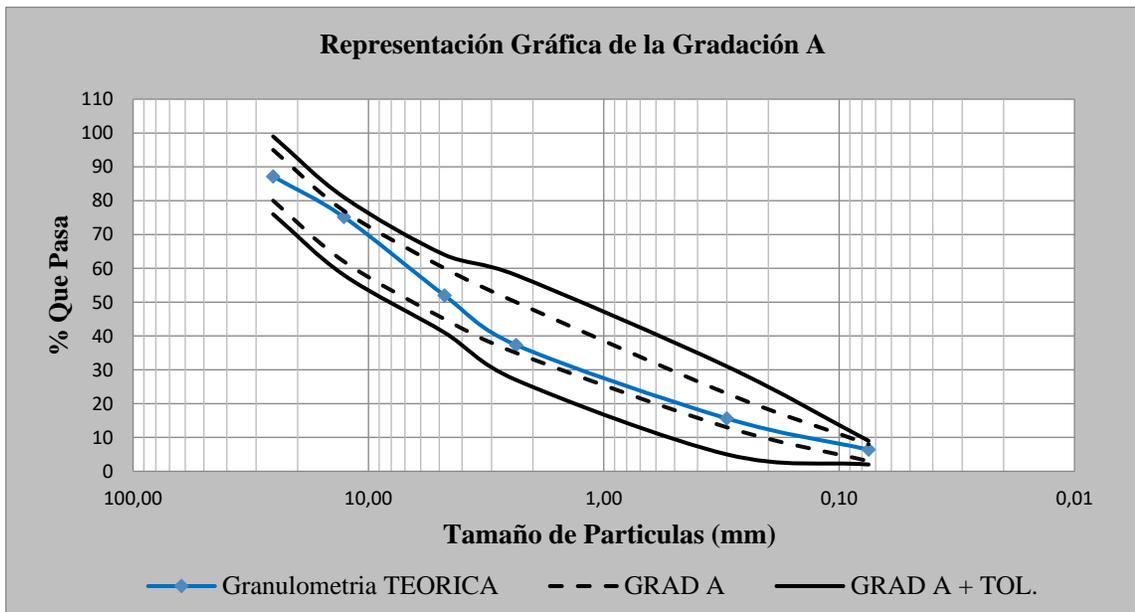
La combinación granulométrica para la gradación A define la distribución porcentual de los tamaños de partículas, evaluando los porcentajes retenidos y pasantes a través de cada tamiz. Los resultados de la faja granulométrica para la gradación A es la siguiente:

Tabla 42. Tabla resumen de la granulometría de gradación A

GRANULOMETRIA GRADACION "A"			
Tamiz	% retenido	% Ret Acum.	% Que pasa
1"	12,85	12,85	87,15
3/4"	10,47	23,32	76,68
1/2"	1,54	24,86	75,14
3/8"	0,10	24,95	75,05
N°4	23,06	48,01	51,99
N° 8	14,64	62,66	37,34
N°50	21,73	84,39	15,61
N°200	9,22	93,60	6,40
BASE	6,40	100,00	0,00

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 5. Faja granulométrica de la gradación A



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados granulométricos muestran que los valores de la gradación A se encuentran dentro de los rangos establecidos. El porcentaje retenido por el tamiz N°8 es de 14,64%, dentro del rango esperado, mientras que para el tamiz N°200 el porcentaje es 6,40%. Estos valores garantizan una adecuada distribución de partículas finas y gruesas, optimizando la resistencia y el desempeño mecánico de la mezcla bajo carga.

3.4.1.2. Contenido Inicial de Emulsión Asfáltica Combinación Granulométrica para la gradación A

El contenido inicial de emulsión asfáltica para la gradación A se calcula considerando los porcentajes retenidos y pasantes en los tamices clave (N°8, N°200) y un factor de ponderación para ajustar la proporción de ligante necesario en la mezcla. Este valor inicial servirá como base para determinar el contenido óptimo de emulsión mediante ensayos posteriores.

$$\%E = [(0,05 * A) + (0,1 * B) + (0,5 * C)] * 0,7$$

Tabla 43. Tabla resumen contenido inicial de emulsión asfáltica de gradación A

A=	14,64	%	Porcentaje retenido en la malla N°8
B=	46,56	%	porcentaje pasante por la malla N°8 y retenido N°200
C=	6,40	%	porcentaje pasante por la malla N°200
%E=	6,0	%	

Fuente: Elaboración Propia

El contenido inicial de emulsión asfáltica calculado es de 6,0%. Este valor resulta de la fórmula utilizada, en la que el porcentaje retenido en el tamiz N°8 (14,64%), el porcentaje pasante entre los tamices N°8 y N°200 (46,56%) y el porcentaje pasante en el tamiz N°200 (6,40%) fueron ponderados adecuadamente. Este contenido inicial proporciona una referencia técnica para garantizar la adherencia del ligante al agregado.

3.4.1.3. Contenido de Ligante Según la Granulometría Combinación Granulométrica para la gradación A

La determinación del contenido de ligante se realiza considerando el peso total de la briqueta y los porcentajes de grava, gravilla y arena. Este cálculo permite identificar el

porcentaje de emulsión residual necesario para garantizar una mezcla uniforme, resistente y duradera.

Tabla 44. Datos para el contenido de ligante de la gradación A

Peso Total de Briqueta (gr)	1200
Ponderación de Grava	0,25
Ponderación de Gravilla	0,20
Ponderación de Arena	0,55
Porcentaje de Briqueta	100%
Residuo de Emulsión por Destilación	63,8%
Porcentaje de Emulsión Residual en la mezcla	X%
Porcentaje de Emulsión Asfáltica	$Y=X*100/63,8$
Porcentaje de Agregado	100 - Y %
Porcentaje de agua adicional	3%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 45. Porcentaje de emulsión residual en la mezcla de la gradación A

	PORCENTAJE DE EMULSIÓN RESIDUAL EN LA MEZCLA					
	3,8%	4,5%	5,1%	5,7%	6,4%	7,0%
Porcentaje de Emulsión (%)	6,0%	7,0%	8,0%	9,0%	10,0%	11,0%
Porcentaje de Agregado (%)	94,0%	93,0%	92,0%	91,0%	90,0%	89,0%
Peso de la Emulsión (gr)	72,00	84,00	96,00	108,00	120,00	132,00
Peso de Grava (gr)	282,00	279,00	276,00	273,00	270,00	267,00
Peso de Gravilla (gr)	225,60	223,20	220,80	218,40	216,00	213,60
Peso de Arena (gr)	620,40	613,80	607,20	600,60	594,00	587,40
Peso del agua adicional (gr)	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración Propia

La tabla muestra cómo el incremento en el porcentaje de emulsión residual, que varía entre 3,8% y 7,0%, afecta directamente la composición de la mezcla, manteniendo un peso total constante de 1200 g. A medida que la emulsión aumenta, su peso se incrementa de 72,00 g a 132,00 g, mientras que los porcentajes de agregado disminuyen de 94,0% a 89,0%, reflejándose en la reducción de los pesos de grava (282,00 g a 267,00 g), gravilla (225,60 g a 213,60 g) y arena (620,40 g a 587,40 g).

Este ajuste asegura un equilibrio adecuado en la mezcla, optimizando la relación ligante-agregado para garantizar una mayor cohesión interna y mejor desempeño estructural. El agua adicional se mantiene constante en 36,00 g, asegurando uniformidad en el proceso.

3.4.1.4. Diseño Método Marshall Combinación Granulométrica para la gradación

A

El diseño Marshall para la gradación A permite determinar los valores óptimos de estabilidad, densidad, vacíos y flujo de la mezcla, considerando diferentes porcentajes de emulsión residual. Este procedimiento garantiza que la mezcla cumpla con los requisitos mecánicos y volumétricos para un pavimento duradero.

Tabla 46. Datos para el diseño método Marshall de la gradación A

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregado
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,67	52,04
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,67	47,96
Peso Específico Total	2,67	100
Número de Golpes		75
Residuo de Destilación (%)		63,78
Agua Adicional (%)		3
Peso Específico del Ligante (gr/cm ³)		1,001
DOSIFICACIÓN		
Agregado	P.E.	%
Grava	2,66	32
Gravilla	2,69	13
Arena	2,67	55
Filler	0	0

Fuente: Elaboración Propia

3.4.2. Gradación B

El diseño de la mezcla correspondiente a la gradación B tiene como finalidad determinar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica que garantice la estabilidad y durabilidad del pavimento. La combinación granulométrica para esta gradación busca minimizar los vacíos entre partículas, logrando una mezcla más densa y resistente. Con base en las propiedades del agregado, se establece un contenido inicial de emulsión, el cual es posteriormente sometido a validación mediante ensayos Marshall.

Este procedimiento técnico permite evaluar parámetros como la estabilidad y el flujo de la mezcla, generando un resultado que define con precisión el porcentaje de emulsión asfáltica más adecuado para alcanzar el rendimiento esperado, lo cual será clave para el diseño final. Los resultados de todos los ensayos de la gradación A se encuentran en el Anexo IV.

3.4.2.1. Combinación Granulométrica para la gradación B

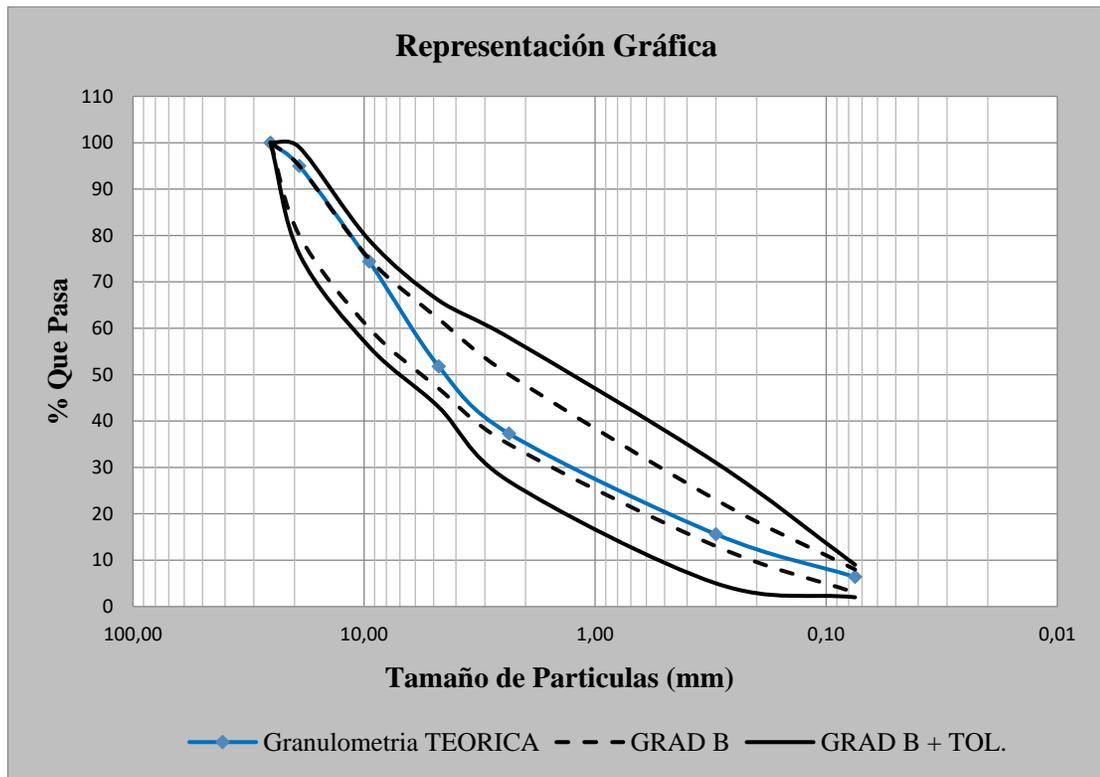
La combinación granulométrica para la gradación B evalúa la distribución de los tamaños de partículas en los agregados. Este análisis es crucial para verificar que la mezcla cumple con los requisitos técnicos que garantizan su estabilidad, compacidad y durabilidad en el diseño asfáltico. Los resultados de la faja granulométrica para la gradación B es la siguiente:

Tabla 47. Tabla resumen de la granulometría de gradación B

GRANULOMETRIA GRADACION "B"			
Tamiz	% retenido	% Ret Acum.	% Que pasa
1"	0	0	100,00
3/4"	5,0336	5,0336	94,97
1/2"	10,9792	16,0128	83,99
3/8"	9,5927	25,6055	74,39
N°4	22,6379	48,2434	51,76
N° 8	14,4718	62,7152	37,28
N°50	21,6968	84,412	15,59
N°200	9,209	93,621	6,38
BASE	6,379	100	0,00

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 6. Faja granulométrica de la gradación B



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados granulométricos entran dentro de la faja granulométrica como se observa en el gráfico y muestran que el porcentaje que pasa por el tamiz N°8 es de 37,28%, dentro del rango esperado, y el porcentaje que pasa por el tamiz N°200 es 6,38%, dentro del rango. Estos valores reflejan una adecuada proporción entre partículas finas y gruesas, asegurando la cohesión interna de la mezcla y su resistencia estructural bajo carga.

3.4.2.2. Contenido Inicial de Emulsión Asfáltica Combinación Granulométrica para la gradación B

El contenido inicial de emulsión asfáltica se determina considerando la granulometría de los agregados de la gradación B. Este valor preliminar permite establecer un punto de partida para ajustar la proporción óptima de emulsión en función de los ensayos posteriores.

$$\%E = [(0,05 * A) + (0,1 * B) + (0,5 * C)] * 0,7$$

Tabla 48. Tabla resumen contenido inicial de emulsión asfáltica de gradación B

A=	14,472	%	Porcentaje retenido en la malla N°8
B=	46,494	%	porcentaje pasante por la malla N°8 y retenido N°200
C=	6,379	%	porcentaje pasante por la malla N°200
%E=	6	%	

Fuente: Elaboración Propia

El contenido inicial de emulsión asfáltica calculado para la gradación B es de 6,0%, basado en los porcentajes retenidos y pasantes en los tamices clave (N°8: 14,47%, N°200: 6,38%). Este valor asegura una cobertura uniforme del ligante en los agregados y una mezcla bien integrada.

3.4.2.3. Contenido de Ligante Según la Granulometría Combinación Granulométrica para la gradación B

El contenido de ligante para la gradación B se calcula considerando los pesos específicos de los agregados y su proporción en la mezcla. Este análisis asegura una distribución adecuada de ligante asfáltico en la mezcla para optimizar su desempeño.

Tabla 49. Datos para el contenido de ligante de la gradación B

Peso Total de Briqueta (gr)	1200
Ponderación de Grava	0,32
Ponderación de Gravilla	0,13
Ponderación de Arena	0,55
Porcentaje de Briqueta	100%
Residuo de Emulsión por Destilación	63,8%
Porcentaje de Emulsión Residual en la mezcla	X%
Porcentaje de Emulsión Asfáltica	$Y=X*100/63,8$
Porcentaje de Agregado	100 - Y %
Porcentaje de agua adicional	3%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 50. Porcentaje de emulsión residual en la mezcla de 1ª gradación B

	PORCENTAJE DE EMULSIÓN RESIDUAL EN LA MEZCLA					
	3,8%	4,5%	5,1%	5,7%	6,4%	7,0%
Porcentaje de Emulsión (%)	6,0%	7,0%	8,0%	9,0%	10,0%	11,0%
Porcentaje de Agregado (%)	94,0%	93,0%	92,0%	91,0%	90,0%	89,0%
Peso de la Emulsión (gr)	72,00	84,00	96,00	108,00	120,00	132,00
Peso de Grava (gr)	360,96	357,12	353,28	349,44	345,60	341,76
Peso de Gravilla (gr)	146,64	145,08	143,52	141,96	140,40	138,84
Peso de Arena (gr)	620,40	613,80	607,20	600,60	594,00	587,40
Peso del agua adicional (gr)	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración Propia

La tabla refleja cómo el contenido de ligante en la gradación B se ajusta al variar el porcentaje de emulsión residual entre 3,8% y 7,0%, manteniendo un peso total de briqueta constante en 1200 g. El peso de la emulsión incrementa progresivamente de 72,00 g a 132,00 g, mientras que el porcentaje de agregado disminuye de 94,0% a 89,0%, afectando las proporciones de los componentes. El peso de la grava se reduce de 360,96 g a 341,76 g, el de la gravilla de 146,64 g a 138,84 g, y el de la arena de 620,40 g a 587,40 g, lo que asegura un balance adecuado en la mezcla.

El agua adicional permanece constante en 36,00 g, contribuyendo a la uniformidad del proceso. Estos ajustes garantizan que la mezcla logre la cohesión interna requerida para cumplir con los parámetros de diseño.

3.4.2.4. Diseño Método Marshall Combinación Granulométrica para la gradación B

El diseño Marshall para la gradación B permite determinar los parámetros óptimos de estabilidad, densidad y vacíos para diferentes porcentajes de emulsión residual. Este análisis es clave para garantizar la calidad y durabilidad de la mezcla asfáltica.

Tabla 51. Datos para el diseño método Marshall de la gradación B

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregado
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,67	48,17
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,67	51,83
Peso Específico Total	2,67	100
Número de Golpes		75
Resíduo de Destilación (%)		63,78
Agua Adicional (%)		3
Peso Específico del Ligante (gr/cm ³)		1,001
DOSIFICACIÓN		
Agregado	P.E.	%
Grava	2,66	32
Gravilla	2,69	13
Arena	2,67	55
Filler	0	0

Fuente: Elaboración Propia

3.4.3. Gradación C

El diseño de la mezcla asfáltica para la gradación C se enfoca en determinar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica, fundamental para el éxito del diseño final. Mediante la combinación granulométrica, se garantiza que los agregados presenten una distribución que maximice la estabilidad mecánica de la mezcla.

A partir de un contenido inicial de emulsión asfáltica seleccionado según las características específicas del agregado, se realizan ensayos Marshall para medir parámetros como la estabilidad, el flujo y la densidad aparente.

Estos resultados permiten identificar el porcentaje de emulsión que optimiza la cohesión y resistencia de la mezcla, asegurando su desempeño adecuado en condiciones de tráfico y clima determinadas. Los resultados de todos los ensayos de la gradación A se encuentran en el Anexo V.

3.4.3.1. Combinación Granulométrica para la gradación C

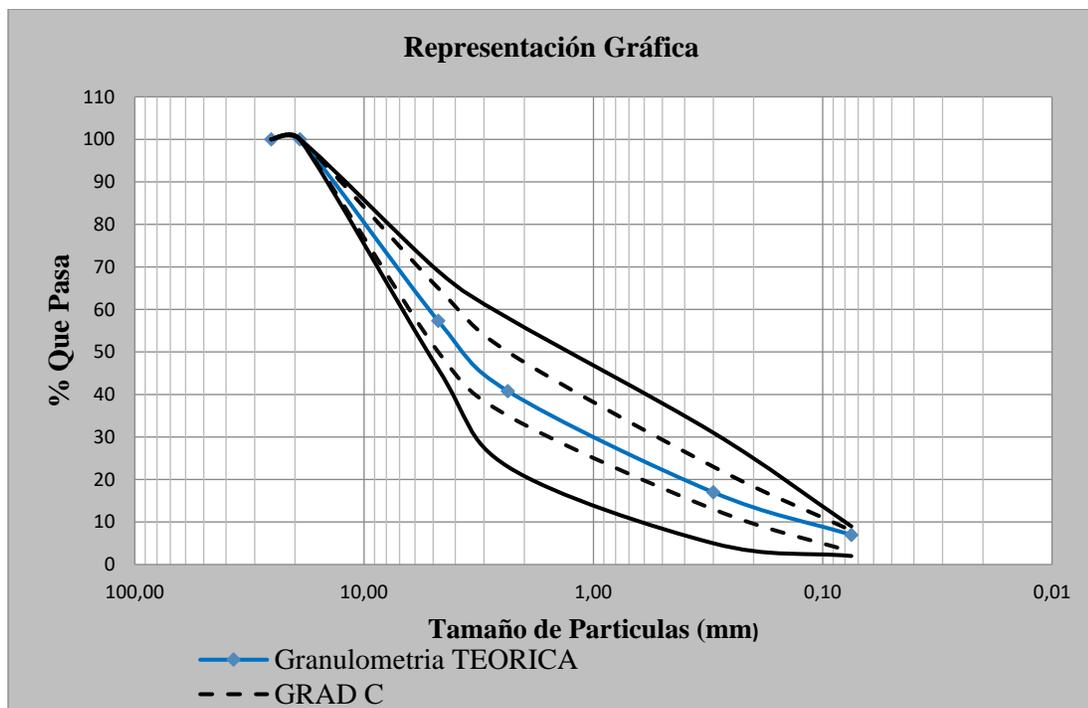
El análisis granulométrico para la gradación C evalúa la distribución de tamaños de partículas en los agregados. Este estudio permite garantizar que los materiales cumplen con los criterios necesarios para la estabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica. Los resultados de la faja granulométrica para la gradación C es la siguiente:

Tabla 52. Tabla resumen de la granulometría de gradación C

GRANULOMETRIA GRADACION "A"			
Tamiz	% retenido	% Ret Acum.	% Que pasa
1"	0,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	0,00	100,00
1/2"	0,00	0,00	100,00
3/8"	0,08	0,08	99,92
N°4	42,63	42,70	57,30
N° 8	16,51	59,22	40,78
N°50	23,80	83,01	16,99
N°200	10,02	93,04	6,96
BASE	6,96	100,00	0,00

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 7. Faja granulométrica de la gradación C



Fuente: Elaboración Propia

El porcentaje que pasa por el tamiz N°8 es de 40,78%, dentro del rango permitido, y el porcentaje que pasa por el tamiz N°200 es 6,96%, cumpliendo con el rango.

La mezcla presenta una adecuada proporción entre partículas finas y gruesas, optimizando la resistencia de la mezcla.

3.4.3.2. Contenido Inicial de Emulsión Asfáltica Combinación Granulométrica para la gradación C

El contenido inicial de emulsión para la gradación C se determina considerando la granulometría y las características de los agregados. Este valor inicial establece un marco para ajustar la proporción óptima de ligante en el diseño final.

$$\%E = [(0,05 * A) + (0,1 * B) + (0,5 * C)] * 0,7$$

Tabla 53. Tabla resumen contenido inicial de emulsión asfáltica de gradación C

A=	16,51	%	Porcentaje retenido en la malla N°8
B=	50,81	%	porcentaje pasante por la malla N°8 y retenido N°200
C=	6,96	%	porcentaje pasante por la malla N°200
%E=	6,6	%	

Fuente: Elaboración Propia

El contenido inicial de emulsión asfáltica determinado para la mezcla es del 6,6%, calculado en función de los porcentajes retenidos en los tamices N°8 (16,51%) y N°200 (6,96%). Este valor garantiza una cobertura uniforme del ligante sobre la superficie de los agregados, lo que contribuye a mejorar la cohesión y estabilidad de la mezcla.

La correcta dosificación de la emulsión es fundamental para lograr una adecuada adhesión entre los agregados y evitar posibles fallas prematuras en la estructura del pavimento. Además, este contenido permite una distribución homogénea del ligante, asegurando una mejor resistencia al tráfico y a las condiciones climáticas adversas. Por ello, la selección del 6,6% se realizó considerando las características granulométricas de los agregados y las propiedades reológicas de la emulsión asfáltica utilizada.

3.4.3.3. Contenido de Ligante Según la Granulometría Combinación Granulométrica para la gradación C

El cálculo del contenido de ligante según la granulometría en la gradación C considera los pesos específicos de los agregados y su proporción en la mezcla. Este análisis asegura que la cantidad de emulsión residual sea adecuada para el diseño final.

Tabla 54. Datos para el contenido de ligante de la gradación C

Peso Total de Briqueta (gr)	1200
Ponderación de Grava	0,00
Ponderación de Gravilla	0,40
Ponderación de Arena	0,60
Porcentaje de Briqueta	100%
Residuo de Emulsión por Destilación	63,8%
Porcentaje de Emulsión Residual en la mezcla	X%
Porcentaje de Emulsión Asfáltica	$Y=X*100/63,8$
Porcentaje de Agregado	100 - Y %
Porcentaje de agua adicional	3%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 55. Porcentaje de emulsión residual en la mezcla de la gradación C

	PORCENTAJE DE EMULSIÓN RESIDUAL EN LA MEZCLA					
	4,2%	4,8%	5,5%	6,1%	6,8%	7,4%
Porcentaje de Emulsión (%)	6,6%	7,6%	8,6%	9,6%	10,6%	11,6%
Porcentaje de Agregado (%)	93,4%	92,4%	91,4%	90,4%	89,4%	88,4%
Peso de la Emulsión (gr)	79,20	91,20	103,20	115,20	127,20	139,20
Peso de Grava (gr)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Peso de Gravilla (gr)	448,32	443,52	438,72	433,92	429,12	424,32

PORCENTAJE DE EMULSIÓN RESIDUAL EN LA MEZCLA						
	4,2%	4,8%	5,5%	6,1%	6,8%	7,4%
Peso de Arena (gr)	672,48	665,28	658,08	650,88	643,68	636,48
Peso del agua adicional (gr)	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración Propia

Se observo cómo varían las proporciones de los componentes de la mezcla de la gradación C en función del contenido de emulsión residual, manteniendo un peso total constante de 1200 g. El porcentaje de emulsión residual varía de 4,2% a 7,4%, lo que aumenta el peso de la emulsión de 79,20 g a 139,20 g. Simultáneamente, el porcentaje de agregado disminuye de 93,4% a 88,4%, reflejando una reducción en las proporciones de gravilla y arena.

El peso de la gravilla decrece de 448,32 g a 424,32 g, mientras que el peso de la arena disminuye de 672,48 g a 636,48 g, destacando una redistribución de materiales para compensar el incremento del contenido de emulsión. Cabe notar que no se emplea grava en esta gradación, lo que se traduce en una mezcla más fina, favoreciendo una mayor cohesión.

El agua adicional permanece constante en 36,00 g, lo que asegura homogeneidad en la humedad de la mezcla. Estos ajustes garantizan un equilibrio entre el contenido de emulsión y los agregados, optimizando la adhesión del ligante y proporcionando una mezcla con características técnicas adecuadas para resistir las condiciones de carga y tráfico específicas

3.4.3.4. Diseño Método Marshall Combinación Granulométrica para la gradación

C

El diseño Marshall para la gradación C evalúa los parámetros de estabilidad, flujo y densidad para determinar el porcentaje óptimo de emulsión residual.

Tabla 56. Datos para el diseño método Marshall de la gradación C parte 1

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregado
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,69	42,62
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,67	57,38
Peso Específico Total	2,68	100
Número de Golpes		75
Residuo de Destilación (%)		63,78
Agua Adicional (%)		3
Peso Específico del Ligante (gr/cm ³)		1,001

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 57. Datos para el diseño método Marshall de la gradación C parte 2

DOSIFICACIÓN		
Agregado	P.E.	%
Grava	2,66	0
Gravilla	2,69	40
Arena	2,67	60
Filler	0	0

Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO IV
ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. DISEÑO DEL MÉTODO MARSHAL

En esta sección se presenta el diseño del método Marshall aplicado a las mezclas asfálticas evaluadas. Se detallan los resultados obtenidos para cada gradación de agregados (A, B y C), así como el diseño del ligante óptimo y su impacto en las propiedades mecánicas de las mezclas.

Tabla 58. Tabla resumen del diseño método Marshall de la gradación A

CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)
3,8	2,34	6,82	15,70	56,55	6122,71	14,67
4,5	2,36	4,87	15,48	68,57	6779,39	16,67
5,1	2,38	3,25	15,37	78,85	6531,72	20,33
5,7	2,36	3,27	16,70	80,39	6281,61	40,33
6,4	2,34	3,16	18,09	82,52	5563,76	53,33

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 59. Tabla resumen del diseño método Marshall de la gradación B

CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	DENS. PROM. (gr/cm ³)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	ESTAB. (libra)	FLUENCIA (pulg)
3,8	2,33	7,21	16,05	55,09	3394,58	28,33
4,5	2,34	5,61	16,15	65,23	4463,34	35,33
5,1	2,37	3,73	15,79	76,38	5796,88	35,67
5,7	2,37	2,75	16,25	83,06	5444,08	38,00
6,4	2,36	2,06	17,16	88,00	5116,21	50,67
7,0	2,34	2,23	18,57	87,98	4570,36	60,00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 60. Tabla resumen del diseño método Marshall de la gradación C

CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÓN VACIOS) (%)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)
4,2	2,30	8,01	17,67	54,64	4073,76	21,33
4,8	2,32	6,58	17,68	62,78	4366,60	30,33
5,5	2,34	4,58	17,43	73,75	4514,72	31,67
6,1	2,35	3,47	17,76	80,47	4605,90	51,33
6,8	2,32	3,33	19,11	82,59	4690,86	60,33
7,4	2,29	3,84	20,78	81,51	4454,65	68,33

Fuente: Elaboración Propia

4.2. DISEÑO MÉTODO MARSHALL PARA EL LIGANTE ÓPTIMO

El diseño del método Marshall para el ligante óptimo se centra en evaluar las propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas asfálticas utilizando el contenido de ligante que proporciona el mejor equilibrio entre estabilidad, flexibilidad y durabilidad. Este análisis se realizará de forma diferenciada para las gradaciones A, B y C, garantizando que cada una cumpla con los estándares de calidad establecidos.

En este contexto, se determinarán los parámetros óptimos de estabilidad y flujo, así como el porcentaje de vacíos en el agregado mineral y en la mezcla total. Además, se llevará a cabo una síntesis de los resultados obtenidos mediante una tabla resumen, permitiendo comparar las propiedades de las mezclas y evaluar su idoneidad para aplicaciones específicas. Este apartado constituye una etapa clave en el desarrollo de mezclas asfálticas eficientes y sostenibles para infraestructuras viales.

4.2.1. Contenido de Ligante Óptimo según la Granulometría

Este apartado establece los contenidos de ligante óptimos determinados para las gradaciones A, B y C. Estos valores resultan del análisis Marshall, considerando parámetros críticos como densidad máxima, estabilidad, vacíos de mezcla y relación

betún-vacíos, con el objetivo de garantizar una mezcla asfáltica que cumpla con los estándares de calidad y durabilidad.

Tabla 61. Tabla de resumen del contenido de ligante

Tipo de gradación	GRADACIÓN A	GRADACIÓN B	GRADACIÓN C
Peso Total de Briqueta (gr)	1200	1200	1200
Ponderación de Grava	0,25	0,32	0,00
Ponderación de Gravilla	0,20	0,13	0,40
Ponderación de Arena	0,55	0,55	0,60
porcentaje óptimo de Emulsión residual (%)	4,91%	5,42%	5,98%
Porcentaje de Emulsión (%)	7,7%	8,5%	9,4%
Porcentaje de Agregado (%)	92,3%	91,5%	90,6%
Peso de la Emulsión (gr)	92,38	101,98	112,51
Peso de Grava (gr)	276,90	351,37	0,00
Peso de Gravilla (gr)	221,52	142,74	435,00
Peso de Arena (gr)	609,19	603,91	652,49
Peso del agua adicional (gr)	36,00	36,00	36,00
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración Propia

La tabla presenta los valores relacionados con los porcentajes óptimos de emulsión residual y las proporciones de materiales para las gradaciones A, B y C.

El porcentaje óptimo de emulsión residual varía de 4,91% para la gradación A a 5,98% para la gradación C, reflejando un mayor requerimiento de ligante en mezclas con granulometrías más finas, como la gradación C. En términos del porcentaje de emulsión total, se observa un incremento de 7,7% a 9,4% para las mismas gradaciones, mientras que el porcentaje de agregado disminuye proporcionalmente de 92,3% en la gradación A a 90,6% en la C, ajustándose al mayor contenido de ligante necesario para cohesionar las partículas más pequeñas. Los pesos específicos también reflejan estas variaciones.

En la gradación A, el peso de la grava es de 276,90 g, disminuyendo en la gradación B a 351,37 g, mientras que en la gradación C no se utiliza grava, lo que se compensa con un

mayor peso de gravilla (435,00 g) y arena (652,49 g). Esto evidencia el ajuste necesario para obtener una mezcla bien equilibrada según la granulometría. El peso de la emulsión también aumenta, siendo de 92,38 g en la gradación A y alcanzando 112,51 g en la gradación C, asegurando una cobertura adecuada del agregado.

El peso total de las briquetas se mantiene constante en 1200 g, al igual que el peso del agua adicional, fijado en 36,00 g para todas las gradaciones. Esto garantiza la uniformidad del proceso y permite realizar comparaciones consistentes entre las diferentes mezclas.

En conjunto, estos datos reflejan cómo las propiedades granulométricas influyen en los requerimientos de ligante y en la distribución de los materiales dentro de la mezcla, optimizando su cohesión y resistencia.

4.2.2. Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo Combinación Granulométrica para la gradación A

Este punto analiza el desempeño de la mezcla correspondiente a la gradación A utilizando el contenido óptimo de ligante determinado en ensayos previos, En la siguiente tabla se resumen los principales resultados del diseño Marshall. Para más detalles, la tabla completa se encuentra en el Anexo VII.

Tabla 62. Tabla Resumen del Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo para la gradación A

GRADACION	A
CONTENIDO OPTIMO DE LIGANTE (%)	4,91
ESTABILIDAD (kg)	2801,30
FLUENCIA (pulg) al 0,01"	26,71
DENSIDAD (gr/cm ³)	2,38
VACIOS DE LA MEZCLA (%)	3,89
RELACIÓN BETÚN VACIOS (%)	74,97
VACIOS DEL AGREGADO MINERAL (%)	15,54

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del análisis Marshall para la gradación A, diseñada con un contenido óptimo de ligante del 4.91%. La mezcla se evaluó mediante probetas compactadas con 75 golpes, garantizando condiciones uniformes durante las pruebas.

La dosificación de los materiales incluye un 25% de grava, un 20% de gravilla y un 55% de arena. El peso específico del ligante es de 1,001 g/cm³ y el residuo de destilación se establece en 63.78%, asegurando la calidad del material asfáltico utilizado. Además, se añadió un 3% de agua adicional, manteniendo la homogeneidad en la preparación de las briquetas.

En términos de densidad, la mezcla alcanzó un valor promedio de 2,38 g/cm³, muy cercano al peso específico máximo teórico de 2,47 g/cm³, lo que evidencia una alta compactación de la mezcla. Los vacíos totales en la mezcla se calcularon en 3,89%, dentro del rango especificado de 3% a 5%, mientras que los vacíos del agregado mineral (VAM) fueron de 15,54%, garantizando suficiente espacio para albergar el ligante.

La relación betún-vacíos (RBV) alcanzó un valor del 74,97%, destacando una excelente cohesión y distribución del ligante en la mezcla. Respecto a las propiedades mecánicas, la mezcla obtuvo una estabilidad promedio corregida de 2801.30 kg, muy superior al mínimo requerido de 817 kg, lo que confirma una alta capacidad para soportar cargas vehiculares.

La fluencia promedio fue de 26,71 pulg, dentro del rango admisible de deformación bajo carga, lo que garantiza que la mezcla pueda resistir el tránsito sin deformarse excesivamente. Estos resultados validan la efectividad del diseño Marshall con el contenido óptimo de ligante para la gradación A, cumpliendo con los estándares técnicos exigidos para pavimentos de alto desempeño.

4.2.3. Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo Combinación Granulométrica para la gradación B

Este apartado evalúa el comportamiento de la mezcla para la gradación B utilizando su contenido óptimo de ligante, verificando parámetros como estabilidad, densidad y fluencia, para garantizar que la mezcla cumpla con los requisitos técnicos y normativos, En la siguiente tabla se resumen los principales resultados del diseño Marshall. Para más detalles, la tabla completa se encuentra en el Anexo VII.

Tabla 63. Tabla resumen del Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo para la gradación B

GRADACION	B
CONTENIDO OPTIMO DE LIGANTE (%)	5,42
ESTABILIDAD (kg)	2539,73
FLUENCIA (pulg) al 0,01"	27,29
DENSIDAD (gr/cm ³)	2,35
VACIOS DE LA MEZCLA (%)	3,84
RELACIÓN BETÚN VACIOS (%)	76,85
VACIOS DEL AGREGADO MINERAL (%)	16,59

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del diseño Marshall para la gradación B, con un contenido óptimo de emulsión del 5,42%, proporciona detalles técnicos esenciales para evaluar la calidad de la mezcla asfáltica diseñada. La dosificación de la mezcla está compuesta por 32% de grava, 13% de gravilla, y 55% de arena. El residuo de destilación del ligante es 63,78%, y se añade un 3% de agua adicional durante el proceso de preparación de las probetas. El peso específico del ligante es de 1,001 g/cm³, lo que garantiza una adecuada fluidez y adhesión entre los componentes.

En cuanto a los resultados del ensayo Marshall, las probetas fueron sometidas a 75 golpes, lo que asegura una compactación consistente. En la primera probeta, el contenido de emulsión fue del 5,42%, resultando en un peso de briqueta de 1157,4 g. El volumen de la probeta fue de 491,2 cm³, y su densidad promedio alcanzó 2,35 g/c m³, con una densidad máxima teórica de 2,45 g/cm³. La mezcla presenta un porcentaje de vacíos de la mezcla total (VMT) de 3,84%, lo que está dentro del rango óptimo (generalmente entre el 3% y el 5%), lo que indica una buena compactación. El porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM) fue de 16,59%, lo que asegura suficiente espacio para el ligante, favoreciendo la adherencia entre los componentes.

La estabilidad Marshall de la mezcla fue de 2539,73 Kg, que supera el mínimo requerido de 817 Kg, lo que demuestra que la mezcla tiene una excelente capacidad para resistir

cargas dinámicas. Además, la fluencia promedio fue de 27,29 pulg, un valor que indica una deformación moderada, que está dentro de los límites establecidos para asegurar que la mezcla no se deforme excesivamente bajo carga.

A medida que se aumentó la emulsión, como se observa en la segunda probeta (con una emulsión de 6,84%), el comportamiento de la mezcla se mantuvo estable en términos de densidad, vacíos y estabilidad, con un incremento progresivo en la estabilidad hasta alcanzar 3109,52 kg en la sexta probeta. Este análisis demuestra que, en general, la gradación B con el contenido óptimo de emulsión es adecuada para su uso en pavimentos de alto desempeño, con propiedades mecánicas y volumétricas que cumplen con los estándares de calidad.

4.2.4. Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo Combinación Granulométrica para la gradación C

Se analiza el desempeño de la mezcla para la gradación C utilizando el contenido óptimo de ligante. Este diseño evalúa parámetros volumétricos y mecánicos clave para determinar su idoneidad en condiciones de carga y tráfico, En la siguiente tabla se resumen los principales resultados del diseño Marshall. Para más detalles, la tabla completa se encuentra en el Anexo VII.

Tabla 64. Tabla resumen del Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo para la gradación C

GRADACION	C
CONTENIDO OPTIMO DE LIGANTE (%)	5,98
ESTABILIDAD (kg)	2390,30
FLUENCIA (pulg) al 0,01"	28,57
DENSIDAD (gr/cm ³)	2,34
VACIOS DE LA MEZCLA (%)	3,81
RELACIÓN BETÚN VACIOS (%)	78,63
VACIOS DEL AGREGADO MINERAL (%)	17,81

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del diseño Marshall para la gradación C, con un contenido óptimo de emulsión residual del 5,98%, muestra un análisis detallado de la mezcla asfáltica, evaluando su comportamiento en relación con parámetros de densidad, vacíos, estabilidad y fluencia, que son fundamentales para determinar su desempeño en condiciones de tráfico y clima. La dosificación de la mezcla está compuesta por 40% de gravilla, 60% de arena y sin grava, lo que resulta en una mezcla más fina. El peso específico total de la mezcla es 2,68 g/cm³, y el peso específico del ligante es de 1,001 g/cm³. El residuo de destilación del ligante es 63,78%, lo que asegura que la mezcla mantenga sus propiedades adhesivas y de cohesión. Además, se añade un 3% de agua adicional, lo que ayuda a mantener la homogeneidad durante la preparación de las briquetas.

En cuanto a los resultados del ensayo Marshall, la primera probeta tiene un contenido de emulsión del 5,98%, con un peso de briketa de 1152,7 g y un volumen de 494,5 cm³. La densidad promedio obtenida es de 2,34 g/cm³, cercana a la densidad máxima teórica de 2,44 g/cm³, lo que indica un alto nivel de compactación.

La mezcla tiene un porcentaje de vacíos de la mezcla total (VMT) de 3,81%, lo que está dentro del rango óptimo (3%-5%) para garantizar la durabilidad y resistencia de la mezcla. Además, los vacíos del agregado mineral (VAM) son del 17,81%, lo que permite una buena distribución del ligante en la mezcla.

La estabilidad Marshall de la mezcla es de 2390,30 Kg, lo que supera el mínimo requerido de 817 Kg, demostrando que la mezcla tiene una excelente capacidad para resistir las cargas dinámicas del tráfico. En cuanto a la fluencia, se observó un valor de 28,57 pulgadas, que se encuentra dentro de los límites establecidos, lo que indica que la mezcla tiene un comportamiento estructural estable y no presenta una deformación excesiva bajo carga. En las siguientes probetas, la estabilidad se mantuvo alta, y la fluencia continuó en un rango aceptable, con valores cercanos a las 30 pulgadas.

Estos resultados demuestran que la gradación C con el contenido óptimo de emulsión cumple con los requisitos técnicos para aplicaciones en pavimentos flexibles, con propiedades mecánicas y volumétricas que garantizan un desempeño duradero y resistente.

4.2.5. RESUMEN DE DISEÑO

Tabla 65. Resumen del Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo

GRADACION	A	B	C
CONTENIDO OPTIMO DE LIGANTE (%)	4,91	5,42	5,98
ESTABILIDAD (kg)	2801,30	2539,73	2390,30
FLUENCIA (pulg) al 0,01"	26,71	27,29	28,57
DENSIDAD (gr/cm ³)	2,38	2,35	2,34
VACIOS DE LA MEZCLA (%)	3,89	3,84	3,81
RELACIÓN BETÚN VACIOS (%)	74,97	76,85	78,63
VACIOS DEL AGREGADO MINERAL (%)	15,54	16,59	17,81

Fuente: Elaboración Propia

La comparación de los parámetros clave obtenidos a partir del diseño Marshall para las gradaciones A, B y C. El contenido óptimo de ligante varía entre 4,91% para la gradación A, 5,42% para la gradación B, y 5,98% para la gradación C, reflejando la mayor necesidad de ligante en las mezclas con granulometrías más finas, como es el caso de la gradación C. Estos contenidos aseguran una adecuada cohesión y resistencia en las mezclas.

En cuanto a la estabilidad, la gradación A muestra la mayor capacidad de resistencia a cargas dinámicas, con 2801,30 kg, seguida por la gradación B con 2539,73 kg y la C con 2390,30 kg. A pesar de la disminución en la estabilidad con la gradación C, todas las mezclas superan el mínimo exigido para pavimentos flexibles. La fluencia, que indica la deformación bajo carga, aumenta gradualmente desde 26,71 pulg en la gradación A hasta 28,57 pulg en la C, lo que refleja un comportamiento más plástico a medida que el contenido de emulsión aumenta.

Respecto a las propiedades volumétricas, la densidad es ligeramente mayor en la gradación A (2,38 g/cm³) y disminuye en la B (2,35 g/cm³) y C (2,34 g/cm³), lo que es esperable dada la mayor cantidad de ligante en las mezclas con mayor contenido de emulsión. Los vacíos de la mezcla son similares en todas las gradaciones, con valores de 3,89%, 3,84% y 3,81%, indicando una buena compactación.

La relación betún-vacíos (RBV) aumenta de 74,97% en la gradación A a 78,63% en la gradación C, lo que refleja una mejor adherencia del ligante a medida que se aumenta el contenido de emulsión. Finalmente, los vacíos del agregado mineral (VAM) también incrementan, alcanzando 15,54%, 16,59%, y 17,81%, respectivamente, lo que es coherente con la necesidad de espacio adicional para el ligante a medida que disminuye el tamaño de las partículas del agregado.

4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis realizado mediante el diseño Marshall para determinar el contenido óptimo de ligante asfáltico para cada gradación.

Se analizarán las tres gradaciones utilizadas, con el fin de comprender cómo el contenido de ligante influye en las propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas asfálticas, como la estabilidad, la fluencia y la densidad. Estos resultados nos permitirán verificar si el contenido óptimo de ligante alcanzado cumple con los requisitos establecidos en las normativas para realizar el diseño Marshall con los contenidos óptimos.

4.3.1. Análisis del diseño Marshall para gradación A

Los resultados obtenidos para la gradación A son los siguientes:

Tabla 66. Tabla resumen del diseño método Marshall gradación A

CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)
3,8	2,34	6,82	15,70	56,55	6122,71	14,67
4,5	2,36	4,87	15,48	68,57	6779,39	16,67
5,1	2,38	3,25	15,37	78,85	6531,72	20,33
5,7	2,36	3,27	16,70	80,39	6281,61	40,33
6,4	2,34	3,16	18,09	82,52	5563,76	53,33

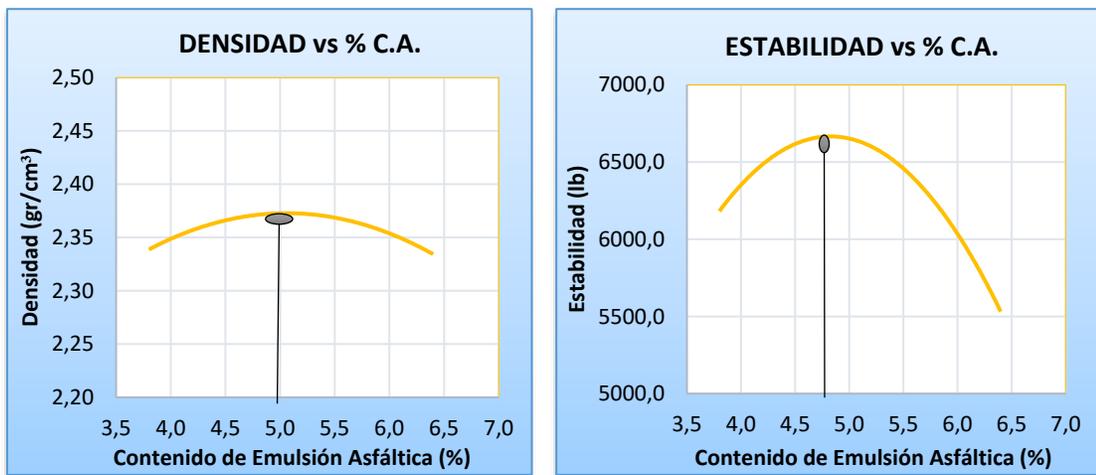
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 67. Resumen del Diseño Método Marshall gradación A

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFÁLTO RESIDUAL	Ensayo	Valor de Diseño	% de Emulsión
	Estabilidad Marshall (Lb)	6665,826	4,827
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,373	5,065
	Vacíos de la mezcla (%)	4,000	4,829
	% Porcentaje óptimo	Promedio =	4,91

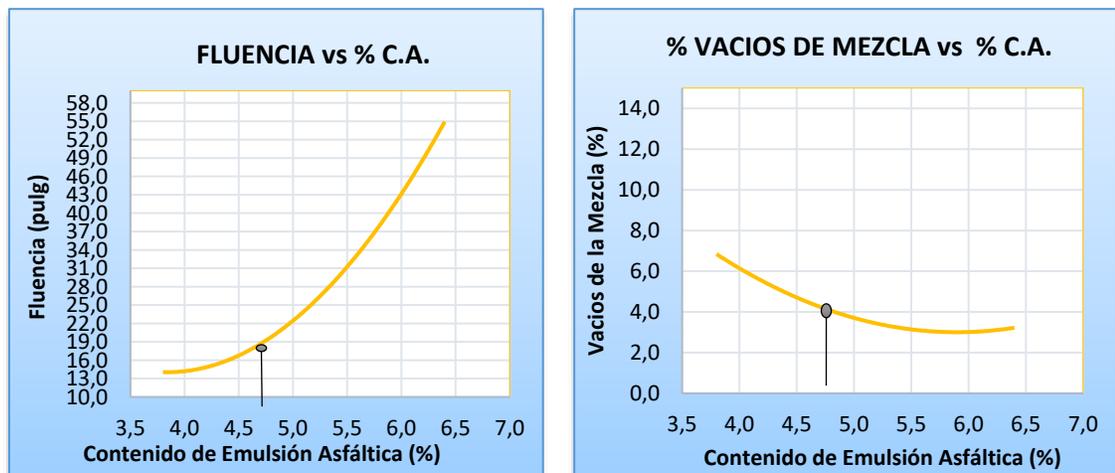
Fuente: Elaboración Propia

Grafica 8. Graficas del diseño Marshall gradación A parte 1



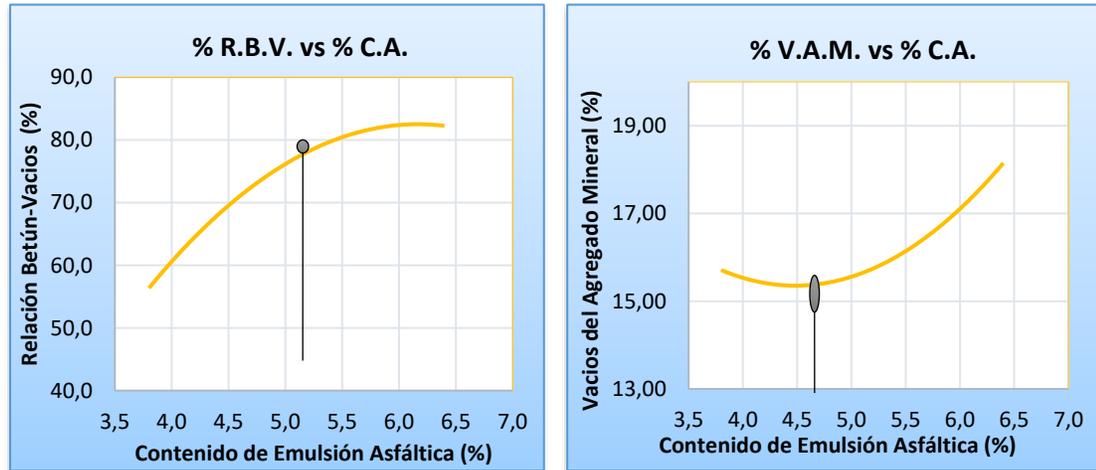
Fuente: Elaboración Propia

Grafica 9. Graficas del diseño Marshall gradación A parte 2



Fuente: Elaboración Propia

Grafica 10. Graficas del diseño Marshall gradación A parte 3



Fuente: Elaboración Propia

El análisis para la gradación A determinó un contenido óptimo de emulsión residual del 4,91%, logrado mediante la media de valores críticos de estabilidad máxima (6665,83 lb), densidad máxima (2,373 g/cm³) y vacíos en la mezcla total (4,00%).

Este contenido asegura un equilibrio adecuado entre cohesión, resistencia y densidad de la mezcla. Los ensayos se realizaron según la ASTM D6926 y D6927, cumpliendo con normativas internacionales que regulan el diseño de mezclas asfálticas.

La densidad promedio, alcanzando 2,38 g/cm³, indica una compactación óptima al estar muy cerca de la densidad máxima teórica. El porcentaje de vacíos en la mezcla total (VMT), de 3,89%, se encuentra dentro del rango especificado entre 3% y 5%, establecido por criterios técnicos del Instituto del Asfalto y estándares de la AASHTO.

Los vacíos del agregado mineral (VAM) alcanzaron 15,54%, lo que asegura suficiente espacio para incorporar el ligante sin exceder los límites. Además, la relación betún-vacíos (RBV), de 74,97%, refleja una buena adherencia del ligante al agregado, asegurando cohesión y estabilidad estructural.

La estabilidad promedio corregida, de 6665,83 lb, supera ampliamente el mínimo de 817 lb, garantizando la capacidad de soportar tráfico pesado.

La fluencia, que indica la deformación bajo carga, fue variable dependiendo del contenido de emulsión, iniciando 14,67 pulgadas al 3,8%, alcanzando un máximo de 53,33 pulgadas

al 6,4%, mientras que el valor de 20,33 pulgadas al contenido óptimo muestra un equilibrio adecuado entre rigidez y deformación.

El contenido óptimo de 4,91% es el mejor encontrado para esta gradación, proporcionando la máxima estabilidad y buena compactación. La mezcla diseñada cumple con los parámetros establecidos y es adecuada para pavimentos de tráfico pesado.

Este análisis valida la efectividad del diseño y la pertinencia de los ensayos realizados.

4.3.2. Análisis del diseño Marshall para gradación b

Los resultados obtenidos para la gradación B son los siguientes:

Tabla 68. Tabla resumen del diseño método Marshall gradación B

CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)
3,8	2,33	7,21	16,05	55,09	3394,58	28,33
4,5	2,34	5,61	16,15	65,23	4463,34	35,33
5,1	2,37	3,73	15,79	76,38	5796,88	35,67
5,7	2,37	2,75	16,25	83,06	5444,08	38,00
6,4	2,36	2,06	17,16	88,00	5116,21	50,67
7,0	2,34	2,23	18,57	87,98	4570,36	60,00

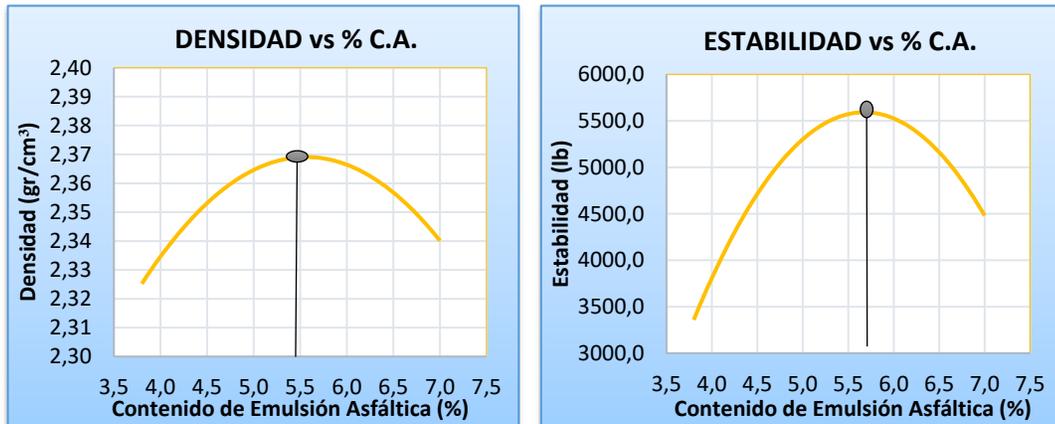
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 69. Resumen del Diseño Método Marshall gradación B

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFÁLTO RESIDUAL	Ensayo	Valor de Diseño	% de Emulsión
	Estabilidad Marshall (Lb)	5591,875	5,676
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,369	5,560
	Vacios de la mezcla (%)	4,000	5,014
	% Porcentaje óptimo	Promedio =	5,42

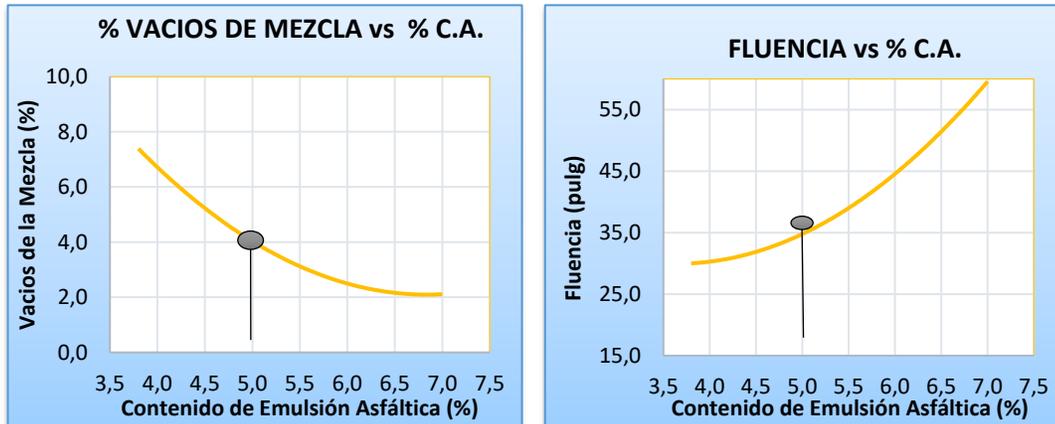
Fuente: Elaboración Propia

Grafica 11. Graficas del diseño Marshall gradación B parte 1



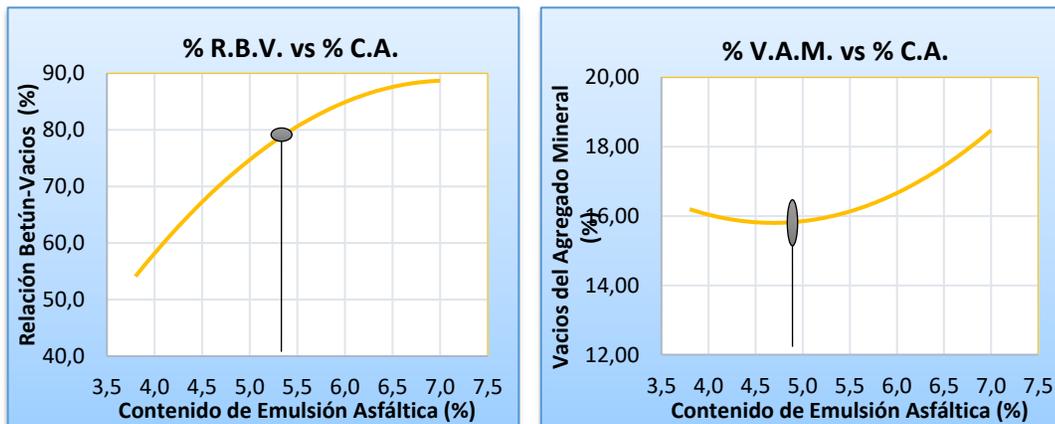
Fuente: Elaboración Propia

Grafica 12. Graficas del diseño Marshall gradación B parte 2



Fuente: Elaboración Propia

Grafica 13. Graficas del diseño Marshall gradación B parte 3



Fuente: Elaboración Propia

El diseño Marshall para la gradación B determinó un contenido óptimo de emulsión residual del 5,42%, basado en la media de los valores críticos de estabilidad máxima (5591,88 lb), densidad máxima (2,369 g/cm³) y vacíos en la mezcla total (4,00%). Este contenido fue seleccionado tras analizar los resultados obtenidos bajo las normativas ASTM, y permite un equilibrio adecuado entre resistencia y cohesión en la mezcla.

La densidad promedio de 2,37 g/cm³ es consistente con la densidad máxima teórica, reflejando una compactación adecuada. El VMT alcanzó 3,84%, dentro del rango especificado de 3%-5%, conforme a los criterios de la AASHTO. Los VAM, de 16,59%, son mayores que en la gradación A, reflejando la mayor necesidad de espacio para ligante debido a la granulometría más gruesa. La RBV, de 76,85%, es superior a la gradación A, lo que demuestra una mejor adherencia del ligante a los agregados en esta mezcla.

La estabilidad máxima, de 5796,88 lb con un contenido de emulsión del 5,1%, evidencia una alta capacidad para resistir cargas dinámicas. Sin embargo, al aumentar el contenido de emulsión más allá del óptimo, la estabilidad disminuyó progresivamente hasta 4570,36 lb al 7,0%, evidenciando el impacto de un exceso de ligante en la estructura. La fluencia promedio, de 27,29 pulgadas, es ligeramente superior a la de la gradación A, mostrando una mayor deformación bajo carga.

4.3.3. Análisis del diseño Marshall para gradación C

Los resultados obtenidos para la gradación C son los siguientes:

Tabla 70. Tabla resumen del diseño método Marshall gradación C

CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)
4,2	2,30	8,01	17,67	54,64	4073,76	21,33
4,8	2,32	6,58	17,68	62,78	4366,60	30,33
5,5	2,34	4,58	17,43	73,75	4514,72	31,67
6,1	2,35	3,47	17,76	80,47	4605,90	51,33
6,8	2,32	3,33	19,11	82,59	4690,86	60,33
7,4	2,29	3,84	20,78	81,51	4454,65	68,33

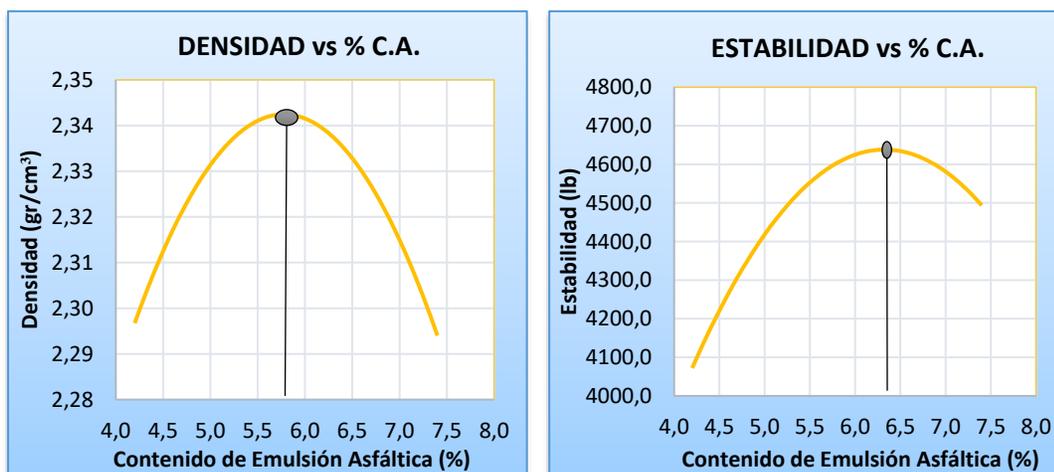
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 71. Resumen del Diseño Método Marshall gradación C

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFÁLTO RESIDUAL	Ensayo	Valor de Diseño	% de Emulsión
	Estabilidad Marshall (Lb)	4638,233	6,326
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,342	5,772
	Vacios de la mezcla (%)	4,000	5,834
	% Porcentaje óptimo	Promedio =	5,98

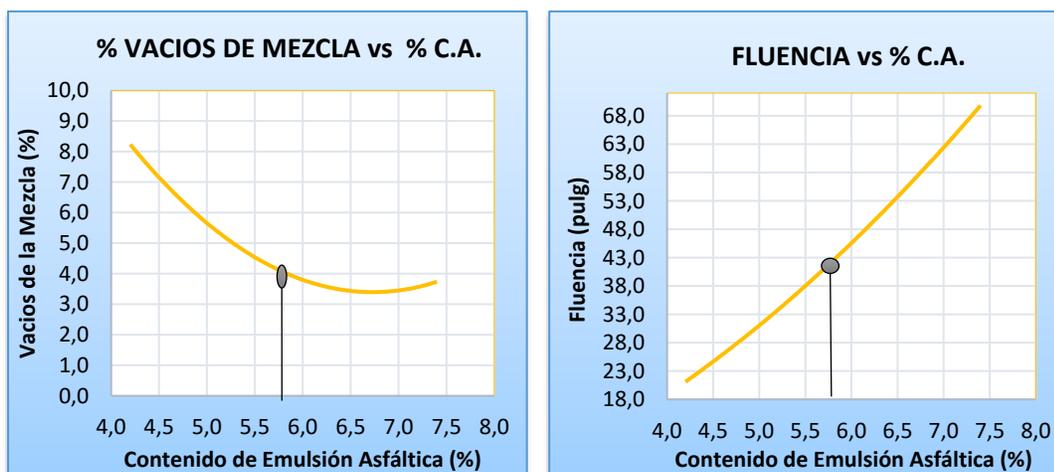
Fuente: Elaboración Propia

Grafica 14. Graficas del diseño Marshall gradación C parte 1



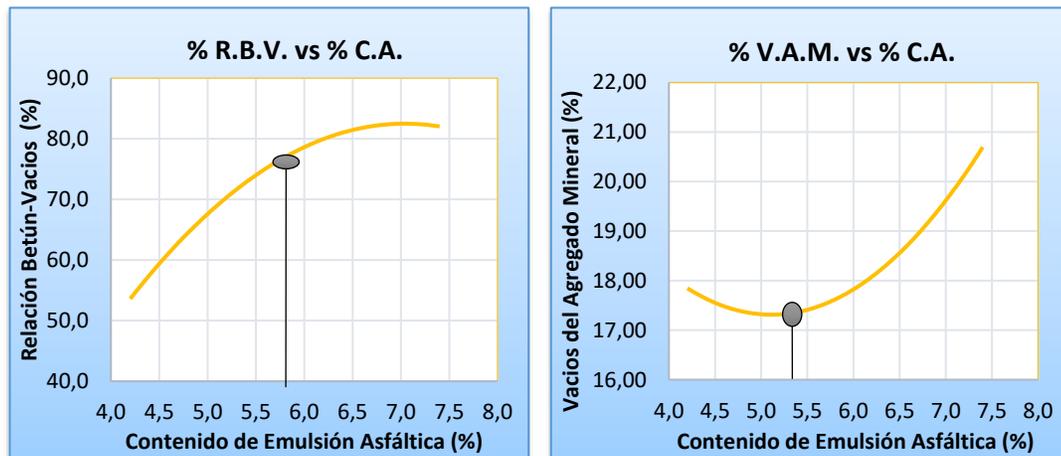
Fuente: Elaboración Propia

Grafica 15. Graficas del diseño Marshall gradación C parte 2



Fuente: Elaboración Propia

Grafica 16. Graficas del diseño Marshall gradación C parte 3



Fuente: Elaboración Propia

El diseño Marshall para la gradación C estableció un contenido óptimo de emulsión residual del 5,98%, obtenido como promedio de los valores de estabilidad máxima (4638,23 lb), densidad máxima (2,342 g/cm³) y vacíos en la mezcla total (4,00%). Este contenido fue seleccionado como el más adecuado, ya que proporciona un equilibrio entre flexibilidad y resistencia para esta granulometría más fina.

La densidad promedio, de 2,34 g/cm³, es ligeramente inferior a las gradaciones A y B, lo que es coherente con la granulometría más fina que requiere mayor ligante. El VMT, de 3,81%, cumple con el rango establecido por los estándares de diseño de mezclas asfálticas. Los VAM, de 17,81%, son los más altos entre las tres gradaciones, reflejando la mayor necesidad de espacio para el ligante en esta mezcla. La RBV, de 78,63%, es la más alta, indicando una excelente cobertura del ligante.

La estabilidad máxima, de 4690,86 lb, es suficiente para soportar cargas moderadas, pero inferior a las gradaciones A y B debido al mayor contenido de ligante y menor resistencia estructural. La fluencia promedio, de 28,57 pulgadas, indica un comportamiento más plástico, adecuado para pavimentos donde se requiere mayor flexibilidad. El contenido óptimo de 5,98% fue el mejor para esta gradación, garantizando cohesión y flexibilidad, aunque con menor estabilidad. Los resultados validan la mezcla para aplicaciones específicas donde se prioriza la deformación controlada sobre la resistencia máxima, demostrando la efectividad del diseño.

4.3.4. Análisis de resultados del diseño Marshall para el contenido óptimo

Los resultados del análisis Marshall para determinar el contenido óptimo de ligante asfáltico en cada gradación se encuentran en la siguiente tabla resumen. Se evaluarán las tres gradaciones utilizadas, analizando cómo el contenido de ligante afecta propiedades clave como estabilidad, fluencia y densidad, y verificando si los resultados cumplen con los estándares técnicos establecidos y los objetivos del estudio.

Tabla 72. Resumen del Diseño Método Marshall de contenido óptimo

GRADACION	A	B	C
CONTENIDO OPTIMO DE LIGANTE (%)	4,91	5,42	5,98
ESTABILIDAD (kg)	2801,30	2539,73	2390,30
FLUENCIA (pulg) al 0,01"	26,71	27,29	28,57
DENSIDAD (gr/cm ³)	2,38	2,35	2,34
VACIOS DE LA MEZCLA (%)	3,89	3,84	3,81
RELACIÓN BETÚN VACIOS (%)	74,97	76,85	78,63
VACIOS DEL AGREGADO MINERAL (%)	15,54	16,59	17,81

Fuente: Elaboración Propia

4.3.4.1. Contenido Óptimo de ligante asfáltico

El contenido de ligante se determinó en función de la granulometría de los agregados, considerando que una mayor superficie específica de los agregados finos requiere un mayor contenido de ligante. Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla 73. Contenido óptimo de ligante

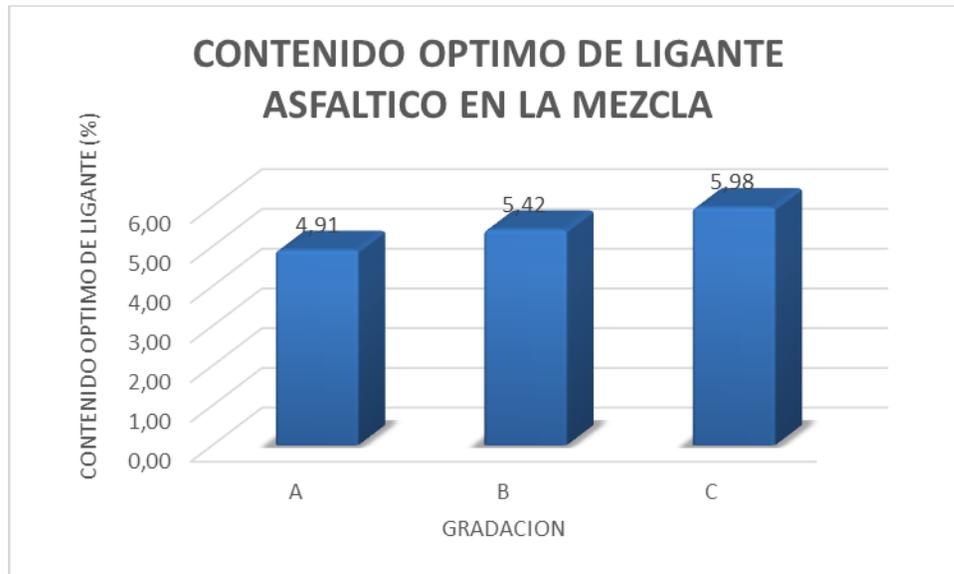
A	4,91
B	5,42
C	5,98

Fuente: Elaboración Propia

El contenido óptimo de ligante asfáltico se define como el valor que asegura el mejor equilibrio entre estabilidad, densidad, cohesión y deformación para cada gradación. Para la gradación A, este contenido fue de 4,91%, representando el menor requerimiento de emulsión debido a la mayor proporción de partículas gruesas, las cuales necesitan menos ligante para cohesionar adecuadamente. En el caso de la gradación C, el contenido fue de

5,98%, reflejando la mayor demanda de emulsión necesaria para garantizar cohesión en agregados más finos, con una mayor área superficial. Por su parte, la gradación B presentó un contenido óptimo de 5,42%, correspondiente a su granulometría intermedia.

Grafica 17. Contenido óptimo de ligante asfaltico en la mezcla



Fuente: Elaboración Propia

El cálculo del contenido óptimo para cada gradación se realizó considerando parámetros técnicos establecidos en la normativa ASTM, como estabilidad máxima, densidad y porcentaje de vacíos en la mezcla. En este sentido, la gradación B refleja un comportamiento promedio, no siendo tan eficiente como la A en términos de ligante requerido ni tan cohesiva como la C, pero demostrando un equilibrio adecuado para las condiciones esperadas.

Los contenidos óptimos son representativos de las características granulométricas de cada mezcla, logrando un diseño efectivo que responde a los objetivos del estudio. La metodología aplicada permitió ajustar el contenido de ligante de forma precisa, optimizando la mezcla según su composición y asegurando un desempeño adecuado. Estos valores validan la hipótesis de que la granulometría influye directamente en el comportamiento mecánico y volumétrico de las mezclas asfálticas con emulsiones de rotura lenta.

4.3.4.2. Densidad

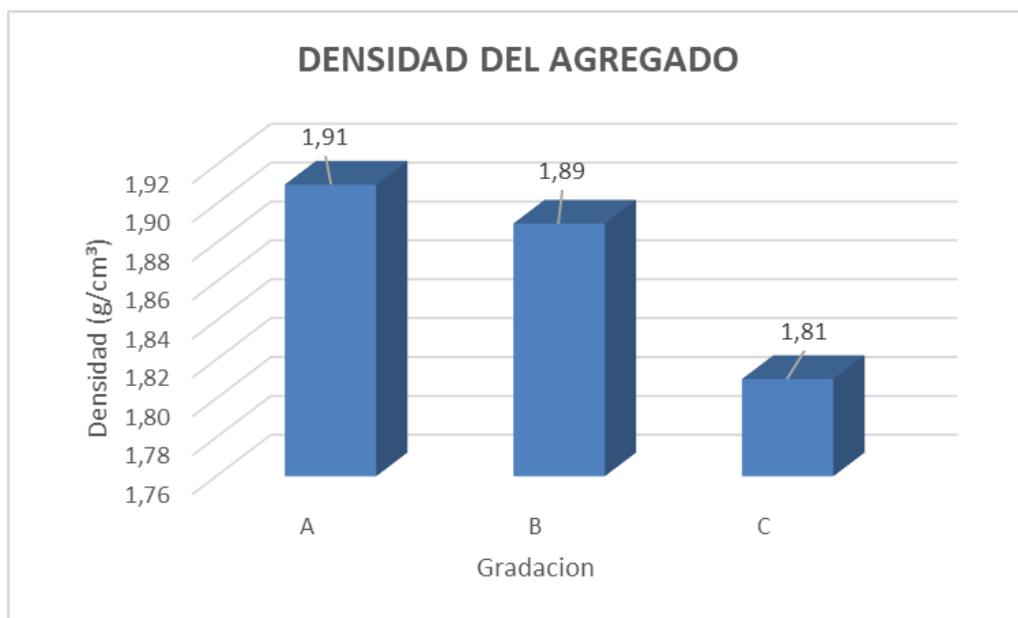
La densidad es un parámetro clave para evaluar la compactación y resistencia de las mezclas asfálticas. Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla 74. Densidad

A	1,91
B	1,89
C	1,81

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 18. Densidad del agregado



Fuente: Elaboración Propia

La densidad promedio obtenida en los ensayos Marshall fue de 2,38 g/cm³ para la gradación A, 2,35 g/cm³ para la gradación B y 2,34 g/cm³ para la gradación C. Estos resultados reflejan la influencia directa de la granulometría y el contenido de ligante en la compactación de la mezcla. La gradación A, con partículas más gruesas, logró una mayor densidad promedio debido a una mejor interconexión de las partículas y una menor demanda de ligante. Por otro lado, la gradación C, con agregados más finos, alcanzó la

densidad más baja, lo que puede atribuirse a la mayor cantidad de ligante requerida para cohesionar las partículas finas y a un incremento en los vacíos ocupados por el ligante.

La densidad promedio para la gradación B fue intermedia, reflejando el equilibrio entre partículas gruesas y finas. Aunque no se destaca por ser la mejor ni la peor, cumple con los parámetros técnicos establecidos, garantizando una compactación suficiente para proporcionar estabilidad y resistencia. Este comportamiento intermedio valida que las características granulométricas de la gradación B permiten obtener un diseño funcional, adecuado para condiciones estándar.

Los resultados obtenidos confirman que todas las mezclas cumplen con los criterios técnicos establecidos en la ASTM, que regula la medición de densidad en mezclas asfálticas. En general, los valores de densidad alcanzados aseguran que las mezclas diseñadas cumplen con los requisitos de compactación, proporcionando resistencia estructural y cohesión interna necesaria para su desempeño en condiciones de tráfico.

4.3.4.3. Estabilidad

La estabilidad de las mezclas asfálticas es crucial para determinar su capacidad de resistir cargas dinámicas. Los resultados obtenidos de las pruebas de estabilidad Marshall para cada gradación, son los siguientes:

Tabla 75. Estabilidad

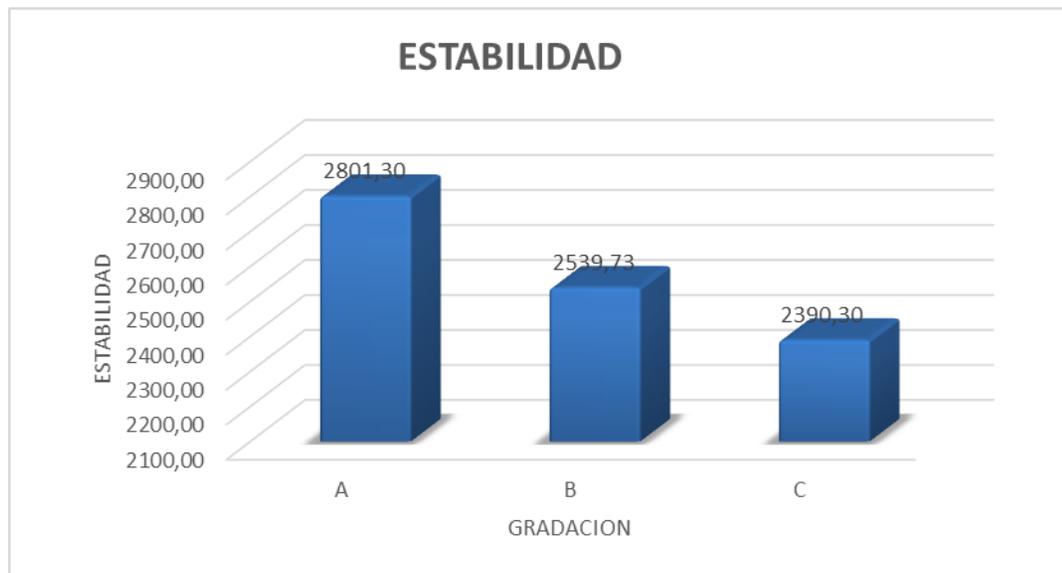
A	2801,3
B	2539,73
C	2390,3

Fuente: Elaboración Propia

La estabilidad es un parámetro crítico para evaluar la capacidad de una mezcla asfáltica para resistir cargas dinámicas. En el caso de las gradaciones analizadas, los valores promedio obtenidos fueron 2801,30 kg para la gradación A, 2539,73 kg para la gradación B y 2390,30 kg para la gradación C.

Estos resultados demuestran una relación inversa entre la estabilidad y el contenido de ligante óptimo, ya que las gradaciones con menor contenido de emulsión (como la A) alcanzaron mayores niveles de estabilidad debido a su menor plasticidad y mayor rigidez estructural. Para la gradación A, la alta estabilidad obtenida refleja un diseño óptimo para condiciones que requieren máxima resistencia estructural, validando que el contenido de ligante del 4,91% es el más adecuado para esta mezcla.

Grafica 19. Estabilidad



Fuente: Elaboración Propia

En contraste, la gradación C, con un contenido óptimo de ligante del 5,98%, presenta una estabilidad más baja debido a su mayor contenido de ligante, que favorece la plasticidad y reduce la capacidad de carga. La gradación B, con una estabilidad promedio de 2539,73 kg, refleja un valor intermedio, consistente con su granulometría equilibrada y su contenido de ligante intermedio (5,42%), siendo un diseño funcional, aunque no sobresaliente.

Estos resultados fueron obtenidos cumpliendo con las normativas ASTM, que regula los procedimientos para evaluar la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas mediante el método Marshall. Este análisis confirma que el diseño Marshall permite identificar contenidos óptimos de ligante ajustados a las necesidades de desempeño específicas de cada gradación, optimizando la relación entre estabilidad y cohesión.

4.3.4.4. Estabilidad y Fluencia

El análisis de estabilidad y fluencia proporciona una visión integral del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas bajo carga. Se evalúa cómo el contenido de ligante influye en la estabilidad de las mezclas y cómo se relaciona con la fluencia, es decir, la deformación de la mezcla bajo carga. Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla 76. Estabilidad y Fluencia

	A	B	C
Estabilidad	2801,30	2539,73	2390,30
Fluencia	26,71	27,29	28,57

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 20. Estabilidad y fluencia



Fuente: Elaboración Propia

El análisis conjunto de estabilidad y fluencia permite evaluar el equilibrio entre resistencia y deformación de las mezclas asfálticas. En las tres gradaciones, la estabilidad presentó una tendencia decreciente a medida que aumentaba el contenido de ligante, mientras que

la fluencia aumentó progresivamente, reflejando un comportamiento más plástico en las mezclas con mayor contenido de ligante.

Para la gradación A, con un contenido óptimo de 4,91%, la estabilidad promedio alcanzó 2801,30 kg, mientras que la fluencia fue de 26,71 pulgadas, indicando una resistencia elevada con deformaciones controladas. Por su parte, la gradación B, con un contenido óptimo de 5,42%, presentó una estabilidad promedio de 2539,73 kg y una fluencia de 27,29 pulgadas, valores intermedios que reflejan un buen equilibrio entre rigidez y plasticidad. Finalmente, la gradación C, con el mayor contenido de ligante (5,98%), mostró una estabilidad promedio de 2390,30 kg y una fluencia de 28,57 pulgadas, evidenciando un comportamiento más plástico y menor resistencia estructural. Estos resultados cumplen con los estándares establecidos en la ASTM, que regula los límites aceptables de estabilidad y deformación. El análisis confirma que cada gradación responde de manera específica a los requerimientos granulométricos y de contenido de ligante.

4.3.4.5. Relación entre fluencia, densidad, porcentaje de vacíos y contenido de ligante

Se analizó cómo estos factores afectan mutuamente las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas asfálticas. A través de los resultados obtenidos, se evaluó cómo un mayor contenido de ligante puede reducir la densidad y los vacíos en la mezcla, mientras aumenta la fluencia. Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla 77. Fluencia, densidad, porcentaje de vacíos y contenido de ligante

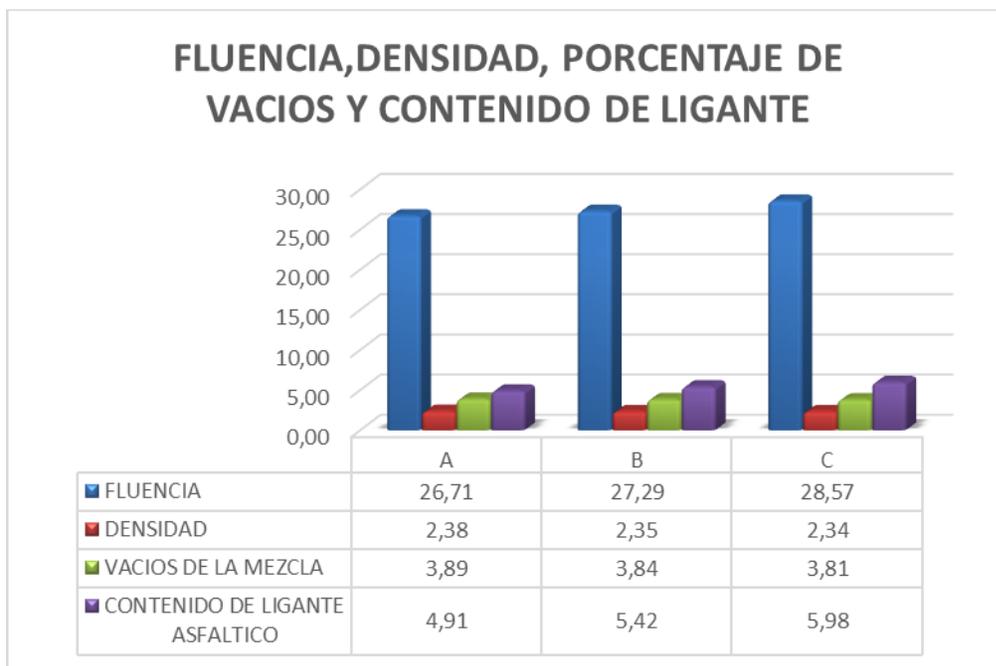
	A	B	C
Fluencia	26,71	27,29	28,57
Densidad	2,38	2,35	2,34
Vacíos de la Mezcla	3,89	3,84	3,81
Contenido de Ligante asfáltico	4,91	5,42	5,98

Fuente: Elaboración Propia

La relación entre fluencia, densidad, vacíos y contenido de ligante refleja la interacción volumétrica y mecánica de las mezclas asfálticas diseñadas. A medida que aumenta el

contenido de ligante, la fluencia y la densidad disminuyen debido al incremento en la plasticidad de la mezcla y la reducción de la compactación efectiva. Simultáneamente, los vacíos en la mezcla total (VMT) disminuyen, lo que indica una mayor cohesión interna.

Grafica 21. Fluencia, densidad, porcentaje de vacíos y contenido de ligante



Fuente: Elaboración Propia

En las gradaciones evaluadas, la gradación A, con el menor contenido de ligante (4,91%), presentó los mayores valores de densidad (2,38 g/cm³) y vacíos en la mezcla (3,89%), junto con la menor fluencia (26,71 pulgadas). Por el contrario, la gradación C, con el mayor contenido de ligante (5.98%), mostró la menor densidad (2,34 g/cm³) y vacíos en la mezcla (3,81%), con la mayor fluencia (28,57 pulgadas).

La gradación B presentó valores intermedios, con una densidad de 2,35 g/cm³, vacíos en la mezcla de 3,84%, y fluencia de 27,29 pulgadas, mostrando un equilibrio aceptable entre estos parámetros. Estos resultados reflejan que las gradaciones con mayor contenido de ligante favorecen la cohesión, pero sacrifican resistencia estructural y compactación, mientras que las mezclas con menor contenido de ligante son más rígidas y resistentes. El análisis demuestra que el diseño Marshall permite optimizar estos parámetros según las necesidades específicas de cada gradación.

4.3.4.6. Trabajabilidad

La trabajabilidad de las mezclas asfálticas se relaciona directamente con la granulometría de los agregados y el contenido de ligante. En las gradaciones más gruesas, como la A, se observaron mayores dificultades para lograr una distribución homogénea y compactación uniforme debido al mayor tamaño de las partículas.

En contraste, la gradación C, con partículas más finas, presentó mejor trabajabilidad, ya que la mayor cohesión facilitó la distribución uniforme del ligante y una compactación más eficiente.

La gradación B mostró un comportamiento intermedio, donde la trabajabilidad fue adecuada, pero sin destacar. Aunque no presentó problemas significativos, tampoco alcanzó la homogeneidad observada en la gradación C.

Estos resultados confirman que la granulometría influye significativamente en la capacidad de manipular y compactar las mezclas, lo que debe considerarse al seleccionar una gradación para aplicaciones específicas.

Imagen 16. Briquetas de la mezcla A y C



Fuente: Elaboración Propia

4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS COMPARATIVO DE DISEÑO MARSHALL DEL CONTENIDO OPTIMO DE LAS GRADACIONES A, B Y C

El análisis comparativo de las gradaciones A, B y C permite evaluar cómo la granulometría de los agregados y el contenido de ligante óptimo influyen en las propiedades mecánicas, volumétricas y de trabajabilidad de las mezclas asfálticas. Estas propiedades fueron estudiadas utilizando el método Marshall, con base en normativas internacionales como la ASTM D6926 y D6927, que establecen los procedimientos para el diseño y evaluación de mezclas.

El contenido óptimo de ligante es un parámetro clave que refleja la cantidad necesaria de emulsión para garantizar cohesión y estabilidad en función de la granulometría. La gradación A, con partículas más gruesas, presentó el menor contenido óptimo (4,91%), mientras que la gradación C, con partículas más finas, requirió el mayor contenido (5,98%). La gradación B, con un contenido intermedio de 5,42%, es un promedio representativo de ambas, lo que se refleja en sus propiedades equilibradas, sin destacar como la mejor ni la peor opción. Este comportamiento es coherente con la relación entre área superficial del agregado y demanda de ligante: mezclas con partículas finas requieren mayor ligante para cubrir la superficie y proporcionar cohesión.

En términos de densidad, la gradación A alcanzó el mayor valor promedio (2,38 g/cm³), seguida por la gradación B (2,35 g/cm³) y la gradación C (2,34 g/cm³). Esto indica que las partículas gruesas permiten una mejor compactación al reducir los vacíos internos, mientras que el incremento del contenido de ligante en la gradación C afecta la compactación debido a la mayor plasticidad. La densidad está directamente relacionada con el desempeño mecánico, ya que mayores densidades implican mezclas más resistentes y duraderas.

La estabilidad presentó una relación inversa con el contenido de ligante. La gradación A logró la mayor estabilidad promedio (2801,30 kg), superando significativamente a la gradación C (2390,30 kg), con la gradación B en un valor intermedio (2539,73 kg). Este resultado confirma que un menor contenido de ligante y una granulometría más gruesa favorecen la resistencia a cargas dinámicas. Por otro lado, el mayor contenido de ligante

en la gradación C genera una mezcla más plástica y menos resistente a las deformaciones acumuladas bajo carga.

La fluencia mostró un comportamiento inverso al de la estabilidad. La gradación A, con menor contenido de ligante, tuvo la menor fluencia promedio (26,71 pulgadas), mientras que la gradación C presentó la mayor (28,57 pulgadas), reflejando su mayor plasticidad. La gradación B, con una fluencia intermedia de 27,29 pulgadas, mantiene un balance aceptable entre rigidez y deformación. Este parámetro es crucial para evaluar el comportamiento de la mezcla bajo tráfico, asegurando que no se deforme excesivamente.

En relación a los vacíos de la mezcla total (VMT), la gradación A presentó el mayor porcentaje (3,89%), seguida de la B (3,84%) y la C (3,81%). Esto indica que, a mayor contenido de ligante, los vacíos se reducen debido a la mayor cohesión interna de la mezcla. Los vacíos del agregado mineral (VAM) también muestran una tendencia similar, con valores de 15,54% en la gradación A, 16,59% en la B, y 17,81% en la C, confirmando que la granulometría fina de la gradación C requiere más espacio para albergar el ligante.

La relación betún-vacíos (RBV) refleja la adherencia del ligante a los agregados, siendo mayor en la gradación C (78,63%), seguida por la B (76,85%) y la A (74,97%). Esto confirma que el mayor contenido de ligante en la gradación C garantiza una mejor cobertura de los agregados, aunque sacrifica rigidez y estabilidad.

Finalmente, la trabajabilidad varió significativamente entre las gradaciones. La gradación A, con partículas gruesas, presentó desafíos en la distribución uniforme del ligante, afectando su compactación. La gradación C, con partículas finas, tuvo la mejor trabajabilidad gracias a su distribución homogénea y cohesión interna, facilitando su manipulación. La gradación B, con características intermedias, mostró una trabajabilidad aceptable sin destacar significativamente.

El resultado final del análisis nos indica que la gradación A se caracteriza por su alta estabilidad y rigidez, adecuada para condiciones que requieren resistencia estructural. La gradación C, por su parte, destaca por su trabajabilidad y cohesión, aunque presenta menor estabilidad y mayor fluencia. La gradación B, al ofrecer un balance entre las propiedades, se posiciona como una opción intermedia funcional y versátil.

4.5. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA EMULSIÓN

Los efectos de la emulsión en las mezclas asfálticas se refieren a la influencia que tiene el contenido de ligante en las propiedades mecánicas y volumétricas de la mezcla. A medida que se incrementa el contenido de emulsión, se producen variaciones en la estabilidad, la fluencia, la densidad y los vacíos de la mezcla, así como en la relación betún-vacíos y los vacíos del agregado mineral.

Estas variaciones reflejan el comportamiento de la mezcla ante diferentes niveles de ligante y permiten determinar el contenido óptimo de emulsión para alcanzar un equilibrio entre resistencia, flexibilidad y trabajabilidad.

A continuación, se presenta el análisis de los efectos de la emulsión en cada gradación, describiendo cómo varían los parámetros mecánicos y volumétricos en función del contenido óptimo de ligante.

En este análisis se consideran los efectos sobre la estabilidad, fluencia, densidad, vacíos de la mezcla, así como la relación betún-vacíos y los vacíos del agregado mineral, que reflejan la eficacia de la cobertura del ligante y su influencia en la trabajabilidad.

4.5.1. Efectos de la Gradación A

Se tuvieron los siguientes efectos:

- **Densidad y Vacíos:** Al aumentar el contenido de emulsión de 3,8% a 6,4%, se observa que la densidad promedio se mantiene casi constante (alrededor de 2,34–2,38 g/cm³), mientras que el porcentaje de vacíos en la mezcla disminuye progresivamente. Esto indica que la emulsión favorece una mayor cohesión interna y reduce los espacios vacíos, lo que en teoría mejora la compactación.
- **Estabilidad:** La estabilidad alcanza un pico en torno al 4,5–5,1% de emulsión (con un valor máximo de 6779,39 lb a 4,5%) y luego disminuye. Esto sugiere que, aunque un cierto contenido de emulsión mejora la adherencia entre los componentes, un exceso reduce la rigidez estructural y la capacidad de carga de la mezcla.
- **Fluencia:** La fluencia aumenta notablemente al incrementarse el contenido de emulsión (pasando de 14,67 pulgadas a 53,33 pulgadas). Esto es indicativo de un

comportamiento más plástico, donde la mezcla se deforma más fácilmente bajo carga, lo que puede ser beneficioso o perjudicial dependiendo de la aplicación y del tráfico esperado.

4.5.2. Efectos de la gradación B

Se tuvieron los siguientes efectos:

- **Densidad y Vacíos:** En la gradación B, la densidad varía ligeramente (entre 2,33 y 2,37 g/cm³) y los vacíos totales disminuyen conforme se aumenta el contenido de emulsión. Esta tendencia es similar a la observada en la gradación A, pero con valores ligeramente diferentes debido a la granulometría intermedia.
- **Estabilidad:** La estabilidad muestra un comportamiento similar: aumenta hasta un punto óptimo (alrededor del 5,1% de emulsión) y luego se reduce al incrementarse el contenido. El valor máximo registrado (5796,88 lb) indica que el balance entre cohesión y rigidez es alcanzado en ese rango, siendo un reflejo de una mezcla bien ajustada para el tráfico medio a alto.
- **Fluencia:** Los valores de fluencia son mayores que en la gradación A, lo que sugiere que, al tener una granulometría algo más gruesa que la C, pero fina en comparación con la A, la mezcla adquiere una flexibilidad intermedia.

4.5.3. Efectos de la gradación C

- Se tuvieron los siguientes efectos:
- **Densidad y Vacíos:** Para la gradación C, diseñada para agregados más finos, la densidad promedio es ligeramente inferior (alrededor de 2,34 g/cm³) y los vacíos en la mezcla disminuyen de forma continua con el incremento de la emulsión. Esto es consecuencia de la mayor área superficial de las partículas finas, que requiere más emulsión para lograr una cobertura uniforme y cohesión.
- **Estabilidad:** La estabilidad es la más baja entre las tres gradaciones, alcanzando un máximo de 4690,86 lb. Esto se debe a que un mayor contenido de emulsión (óptimo en 5,98%) genera una mezcla más plástica, lo que favorece la deformación a expensas de la resistencia estructural.

- **Fluencia:** La fluencia en la gradación C es la más alta (hasta 60,33 pulgadas en los ensayos) lo que confirma el comportamiento más plástico y flexible de estas mezclas. Esto resulta en una mayor capacidad de deformación, útil en aplicaciones donde se requiera una respuesta adaptable a cargas repetidas, aunque puede implicar una menor rigidez.

4.5.4. Comparativa de Efectos de la Emulsión en las Gradaciones

A continuación, analizamos los efectos interrelacionados de los parámetros volumétricos y mecánicos sobre el desempeño global de las mezclas asfálticas, con especial énfasis en:

- **Fluencia y Densidad:**

A medida que aumenta el contenido de ligante, se observa una tendencia a una mayor fluencia, lo que implica un comportamiento más plástico de la mezcla. Simultáneamente, la densidad promedio tiende a disminuir ligeramente. Estos cambios indican que el exceso de ligante favorece la deformación bajo carga, al tiempo que reduce la compactación óptima, lo que puede influir en la capacidad de la mezcla para soportar cargas.

- **Porcentaje de Vacíos en la Mezcla y Vacíos del Agregado Mineral (VAM):**

Con el incremento del contenido de ligante, se produce una reducción en el porcentaje de vacíos totales de la mezcla, lo que refleja una mayor cohesión interna. Sin embargo, se observa también un aumento en los vacíos del agregado mineral, lo que sugiere que, para gradaciones más finas, se requiere un mayor contenido de ligante para lograr una cobertura y adherencia adecuadas en cada partícula. Esta interacción es capturada en la relación betún-vacíos (RBV), que se incrementa al aumentar el ligante, señalando una mejor distribución del betún sobre el agregado.

- **Relación Betún-Vacíos (RBV) y su Influencia en la Trabajabilidad:**

La RBV sirve como un indicador clave del equilibrio entre la cantidad de ligante y la cantidad de vacíos disponibles en la mezcla. Un valor elevado de RBV implica que el ligante cubre de manera más eficiente los agregados, lo que mejora la cohesión y puede facilitar la compactación. Sin embargo, cuando se excede un cierto umbral, la mezcla puede volverse excesivamente plástica, lo que afectaría negativamente la estabilidad estructural. Esta condición se traduce en una variación en la trabajabilidad, ya que una

mezcla con un adecuado balance entre rigidez y plasticidad se maneja y compacta de forma más uniforme.

- **Trabajabilidad:**

La trabajabilidad de la mezcla asfáltica depende directamente de la interacción de los parámetros anteriores. En gradaciones con mayor contenido de ligante, la mayor fluencia y la reducción en los vacíos de la mezcla facilitan una distribución homogénea del material, lo que resulta en una mejor manejabilidad durante el proceso de compactación. Por el contrario, gradaciones con menor contenido de ligante tienden a ser más rígidas y pueden presentar dificultades para alcanzar una compactación uniforme. La combinación óptima de densidad, vacíos, RBV y fluencia permite obtener una mezcla que se compacta de manera eficiente sin sacrificar la estabilidad mecánica.

La siguiente tabla muestra una comparación que integra, para cada gradación, cómo varían los parámetros clave en función del contenido de emulsión. Los términos “alta”, “intermedia” o “baja” se han asignado de manera relativa basándose en el análisis comparativo de los resultados obtenidos en los ensayos (ver Tablas 58, 59 y 60).

Tabla 78. Resumen comparativo de los efectos de la emulsión

Parámetro	Gradación A (4,91% de emulsión)	Gradación B (5,42% de emulsión)	Gradación C (5,98% de emulsión)	Descripción de la Variación
Estabilidad	Alta (valor cercano a 2800 kg)	Intermedia (valor intermedio, ~2540 kg)	Baja (valor menor, ~2390 kg)	La estabilidad disminuye a medida que aumenta el contenido de emulsión, ya que un mayor porcentaje de ligante genera mayor plasticidad y reduce la rigidez estructural.

Parámetro	Gradación A (4,91% de emulsión)	Gradación B (5,42% de emulsión)	Gradación C (5,98% de emulsión)	Descripción de la Variación
Fluencia	Baja (deformación mínima, ~27 pulg)	Moderada (valor intermedio, ~27–28 pulg)	Alta (mayor deformación, ~29 pulg)	La fluencia aumenta con el contenido de emulsión, lo que indica que la mezcla se vuelve más plástica y se deforma más bajo carga.
Densidad	Superior (aproximadamente 2,38 g/cm ³)	Intermedia (alrededor de 2,35 g/cm ³)	Inferior (aproximadamente 2,34 g/cm ³)	La densidad tiende a disminuir ligeramente al aumentar la emulsión, reflejando una menor compactación en mezclas más plásticas.
Vacíos de la Mezcla	Moderadamente altos (~3,89%)	Intermedios (~3,84%)	Ligeramente bajos (~3,81%)	Con mayor contenido de emulsión, los vacíos en la mezcla se reducen, lo que favorece la cohesión interna.
Relación Betún-Vacíos (RBV)	Menor (~75%)	Intermedia (~77%)	Mayor (~79%)	La RBV aumenta a medida que se incrementa la emulsión, lo que indica una mejor cobertura del ligante sobre el agregado.

Parámetro	Gradación A (4,91% de emulsión)	Gradación B (5,42% de emulsión)	Gradación C (5,98% de emulsión)	Descripción de la Variación
Vacíos del Agregado Mineral (VAM)	Menores (~15,5%)	Intermedios (~16,6%)	Mayores (~17,8%)	A mayor contenido de emulsión, se incrementan los vacíos en el agregado mineral, ya que se requiere más ligante para cubrir la mayor área superficial de partículas finas.

Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El análisis realizado evaluó los efectos de la rotura lenta de emulsiones catiónicas combinadas con agregados de distinta densidad para la estabilización asfáltica en pavimentos flexibles. La mezcla empleada, diseñada para estabilización en frío, fue seleccionada por su resistencia, durabilidad y buen rendimiento bajo tráfico moderado. Los agregados se obtuvieron de la cantera La Victoria, mientras que el cemento asfáltico provino de Quimitec en Santa Cruz, Bolivia. Ambas materias primas cumplieron con normativas internacionales (ASTM y ABC).
- La investigación incluyó caracterización física y mecánica de los materiales, siguiendo estándares establecidos, y análisis comparativo de tres tipos de mezclas (A, B y C). Esto permitió validar propiedades como cohesión y estabilidad, esenciales en entornos de alta humedad y temperaturas variables. Los resultados mostraron que la mezcla optimiza la adhesión y durabilidad, cumpliendo el objetivo inicial de evaluar su idoneidad para aplicaciones prácticas en pavimentos flexibles.
- Los agregados utilizados presentaron variaciones en sus propiedades físicas y mecánicas que influyeron en la estabilidad de las mezclas asfálticas. Se identificó que el agregado de 3/8" presentó la mejor distribución granulométrica con un 99,81% de paso en su fracción nominal, mientras que el de 3/4" retuvo un 15,73%, favoreciendo su uso en capas estructurales. El peso específico en estado saturado osciló entre 2,57 g/cm³ y 2,63 g/cm³, con absorciones menores al 1,5%, asegurando una buena adherencia del ligante. El desgaste de Los Ángeles mostró mayor resistencia en el agregado de 3/8" (25,94%) comparado con el de 1" (28,39%).
- La emulsión utilizada cumplió con los estándares técnicos requeridos. Su residuo por destilación alcanzó un 63,77%, asegurando suficiente contenido de asfalto para garantizar cohesión y resistencia en la mezcla. La densidad de 1,001 g/cm³ y la carga positiva de las partículas favorecieron la adhesión con los agregados, reduciendo el riesgo de desprendimientos. La viscosidad de 26,67s permitió una aplicación

homogénea, y su equivalente de arena del 93,12% aseguró una baja presencia de impurezas, optimizando la cohesión interna.

- El ensayo Marshall permitió determinar los contenidos óptimos de emulsión residual para cada gradación: 4,91% para la A, 5,42% para la B y 5,98% para la C. La estabilidad máxima se obtuvo en la gradación A (6665,83 lb), seguida por la B (5796,88 lb) y la C (4690,86 lb), confirmando que mezclas con agregados de mayor densidad presentan mejor resistencia mecánica.
- El aumento en el contenido de emulsión incrementó la fluencia de las mezclas, reflejando un comportamiento más plástico. La gradación A presentó la menor fluencia (26,71 pulgadas), mientras que la gradación C alcanzó la mayor (28,57 pulgadas). La gradación B se ubicó en un punto intermedio (27,29 pulgadas), mostrando un equilibrio entre rigidez y deformabilidad.
- La densidad promedio de la mezcla disminuyó con el incremento del contenido de emulsión. La gradación A registró la mayor densidad (2,38 g/cm³), mientras que la C tuvo la menor (2,34 g/cm³). El porcentaje de vacíos en la mezcla también disminuyó de 3,89% en la gradación A a 3,81% en la C, evidenciando un incremento en la cohesión con mayor contenido de ligante.
- La relación betún-vacíos (RBV) aumentó conforme creció el contenido de emulsión, reflejando una mejor cobertura del ligante sobre los agregados. La gradación A tuvo un RBV de 74,97%, mientras que la C alcanzó 78,63%. Esto sugiere que mezclas con mayor contenido de ligante son más fáciles de compactar y distribuir, pero pueden comprometer la resistencia estructural a cargas elevadas.
- El análisis comparativo mostró que la gradación A es más resistente, adecuada para pavimentos con cargas pesadas. La gradación C, en contraste, ofrece mayor trabajabilidad y cohesión interna, pero menor estabilidad. La gradación B se posiciona como una opción intermedia, equilibrando estabilidad y deformabilidad, lo que la hace apta para pavimentos de tráfico moderado.

5.2. RECOMENDACIONES

- **Evaluación de emulsiones y aditivos:**

Se recomienda analizar el desempeño de diferentes tipos de emulsiones (rápidas y medias) en diversas condiciones climáticas y de tráfico, así como la incorporación de polímeros y aditivos para optimizar la estabilización asfáltica.

- **Simulación de condiciones de campo**

Es fundamental incluir ensayos de laboratorio como fatiga, rutting y resistencia a temperaturas extremas para evaluar el comportamiento a largo plazo de las mezclas asfálticas.

- **Selección de agregados**

Se sugiere estudiar la influencia de agregados de distintas canteras, considerando propiedades como granulometría, absorción y resistencia, con el fin de optimizar su uso según las condiciones locales.

- **Parámetros de mezclado y compactación**

Se recomienda investigar el efecto de la temperatura de mezclado, el tiempo de curado y las técnicas de compactación en la trabajabilidad y desempeño de las mezclas, incorporando tecnología avanzada para su control en obra.

- **Impacto ambiental**

Es necesario analizar el ciclo de vida de las emulsiones asfálticas en mezclas estabilizadas en frío, evaluando la posibilidad de reducir el contenido de asfalto residual sin comprometer la estabilidad de la mezcla.

- **Sostenibilidad**

Se propone la investigación de emulsiones ecológicas o con aditivos biodegradables para reducir el impacto ambiental y fomentar prácticas sostenibles en la construcción de pavimentos.