

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La historia de la modificación del asfalto no es tan reciente como se podría pensar. En 1843 se concedieron patentes para modificar el asfalto con polímeros naturales y sintéticos. Con el paso de los años, el uso de polímeros aumentó, especialmente después de la introducción y desarrollo del programa estratégico de investigación de autopistas (Strategic Highway Research Programó SHRP), a partir del cual se desarrollaron especificaciones Superpave Performance Graded (PG) a principios de los años noventa. La mayoría de los polímeros utilizados son elastómeros como el SBR (caucho estireno-butadieno) y el SBS (estireno-butadieno-estireno).

En las últimas décadas el esfuerzo científico y tecnológico también se orientaron en el desarrollo de materiales asfálticos para la construcción de carreteras cuyas especificaciones son cada vez más exigentes debido principalmente a factores climáticos (entre otros), de ahí que surge la modificación del asfalto que es una nueva técnica de pavimentación en vías, consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas como la resistencia a las deformaciones por factores climatológicos, variaciones de temperaturas, radiación solar y finalmente el tránsito de una carretera. La investigación de los asfaltos modificados con polímeros indica que son ligantes con características adhesivas, viscosos a temperaturas elevadas que sirven para reducir deformaciones permanentes como el ahuellamiento en la superficie de la carretera causada por el paso constante de vehículos, disminuyendo el fisuramiento por el efecto térmico de las bajas temperaturas y por la fatiga.

Los asfaltos modificados se utilizan como ligante en tratamientos superficiales, los cuales pueden ser simples, dobles o triples aplicados en la construcción de calzadas, en obras de mejoramiento estándar de caminos con volúmenes de tránsito medianos a ligeros, e incluso como revestimiento de bermas en carreteras de alto tránsito en algunos casos. En diferentes países, el tratamiento superficial con asfalto modificado con polímeros se utiliza como una técnica de rehabilitación de bajo costo para el mantenimiento a largo plazo, ya

que la incorporación de polímeros en el ligante ofrece buenos resultados en el comportamiento a bajas temperaturas, lo que lo convierte en una nueva técnica de trabajo.

Por otra parte, Bolivia carece de investigación científica con respecto a este tema en comparación con países como Colombia o España, nuestro país se enfrenta con dificultad en los posibles problemas que puedan presentarse respecto a este tema.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1. Situación problemática

El asfalto es vulnerable a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento por intemperismo, es afectado por la oxidación; sus propiedades mecánicas son limitadas frente a diversos factores; es quebradizo a bajas temperaturas, fluye a altas temperaturas además de tener una baja recuperación elástica, lo que limita su rango de utilidad.

Por otro lado, en Bolivia el incremento del parque automotor en el año 2023 alcanzó a 2,470,622 vehículos según el instituto nacional de estadística (INE, 2023), la utilización de neumáticos crece día tras día produciendo un gran problema en cuanto a desechos de los mismos, ya que los neumáticos terminan en ríos, quebradas, basureros, contaminando nuestro planeta mientras que un pequeño porcentaje va a reciclaje.

Por estos motivos, el campo de la ingeniería vial en estos tiempos tiene mayores retos en forma general, como es el diseño de mejores vías que soporten los mayores incrementos de cargas vehiculares, por el desarrollo acelerado del tráfico vehicular, las variaciones climatológicas que se hacen más extremas en el tiempo, sumado la insuficiencia de recursos para la inversión en infraestructuras viales, retan a la ingeniería en investigar y plantear nuevas alternativas que permitan preservar y mejorar el buen desempeño de nuestras redes viales.

Al presentarse estos problemas, se modifica el asfalto 85-100 con polímeros (polvo de neumático) para mejorar sus propiedades físicas y reológicas, en especial su recuperación elástica.

Actualmente, se observan numerosos problemas en nuestras vías o carreteras, los cuales se presentan a causa de diferentes factores, como el desgaste y las fallas evidentes en las carpetas asfálticas. La necesidad de tener en buenas condiciones los caminos, se vuelve cada día más indispensable para el progreso social y económico de nuestro departamento.

Por estas razones y entre muchos otros más, se presenta la necesidad de llevar a cabo esta investigación de evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial con asfalto modificado con polvo de neumático, para verificar que los resultados obtenidos brinden confiabilidad contundente en el uso de esta nueva alternativa, que pueda ser involucrada en la conservación, mantenimiento y rehabilitación de vías o carreteras deterioradas.

1.2.2. Problema

¿De qué manera influirá la utilización del asfalto modificado con polvo de neumático usado como ligante en una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial?

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los tratamientos superficiales han mostrado a lo largo de su historia ser destacados en su comportamiento y durabilidad dentro de su vida útil en vías o carreteras, así como también una de las alternativas más utilizadas para la demanda de intensidad de tráfico ya sea media o baja, es una solución económica que permite mejorar las condiciones físicas de los caminos; sin embargo, esta opción resulta inconveniente cuando es desarrollada de manera incorrecta, lo que puede provocar accidentes de tránsito, debido a que en nuestra región principalmente se realizan tratamientos superficiales con asfaltos convencionales los cuales tienen propiedades físicas y mecánicas limitadas, que podría convertirse en la razón principal de que se presenten estos problemas mencionados anteriormente.

Es por ello que es importante la realización de nuevos diseños de tratamientos superficiales modificados, donde se le está brindando al conductor una mayor seguridad al conducir y así evitar los accidentes automovilísticos. También garantizando una mejor vía de circulación; así mismo al utilizar el polvo de neumático se da la solución a un problema de contaminación ya existente y sin ninguna solución total que se da.

La razón por el cual se desea realizar esta investigación es saber principalmente si mejoran las propiedades de estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial realizado con asfalto modificado con polvo de neumático, ver si tiene un mejor desempeño en el tratamiento, con la finalidad de proyectar en el futuro esta técnica, proponiendo esta alternativa para el mejoramiento del diseño y construcción de los tratamientos superficiales dobles, optimizando su implementación y el uso de esta técnica para mejorar las condiciones de nuestras vías o carreteras, principalmente en el mantenimiento y la conservación de éstas, reduciendo los costos a largo plazo en beneficio de nuestra sociedad.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial constituido con asfalto modificado con polvo de neumático, para tener una alternativa de mantenimiento, conservación y durabilidad de las vías de bajo volumen de tráfico.

1.4.2. Objetivos específicos

- Establecer toda la información teórica sobre el tratamiento superficial, asfalto modificado con polvo de neumático, de diferentes fuentes bibliográficas.
- Tomar en consideración lo estipulado en normas, manuales de la ABC, para el diseño de carreteras con respecto al tratamiento superficial.
- Identificar la procedencia de los agregados pétreos, asfalto y del polvo de neumático, los cuales serán utilizados para los ensayos de laboratorio.
- Realizar la caracterización de los agregados pétreos, asfaltos y el polvo de neumático reciclado de llantas.
- Aplicar la metodología de diseño por el método de dimensión mínima promedio para la obtención de mejores resultados en la construcción de tratamientos superficiales.
- Realizar la dosificación de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial en los moldes de Marshall.

- Comparar la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial con asfalto convencional con el asfalto modificado con polvo de neumático, evaluando las propiedades de estabilidad y la fluencia mediante el aparato del Marshall.
- Comparar las características adhesivas entre el tratamiento superficial doble con asfalto convencional y modificado.
- Realizar un análisis técnico - económico comparativo de la aplicación de un tratamiento superficial doble con asfalto convencional y asfalto modificado con polvo de neumático.
- Plantear las conclusiones de estudio y las recomendaciones pertinentes.

1.5. HIPÓTESIS

Si el uso del polvo de neumático reciclado de llantas influye significativamente en la variación de un asfalto, entonces se podrá usar el asfalto modificado para realizar una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial, y así evaluar el comportamiento de las propiedades que van a mejorar como la estabilidad, fluencia y características adhesivas entre los agregados pétreos y asfalto.

1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1. Variable independiente

La variable independiente, antecede en el tiempo a la dependiente.

- Mezcla asfáltica para un tratamiento superficial.

1.6.2. Variable dependiente

Se trata del factor que se ve modificado o influenciado por una variable independiente.

- Estabilidad, fluencia; con asfalto modificado con polvo de neumático.

1.6.3. Conceptualización y operacionalización de variables

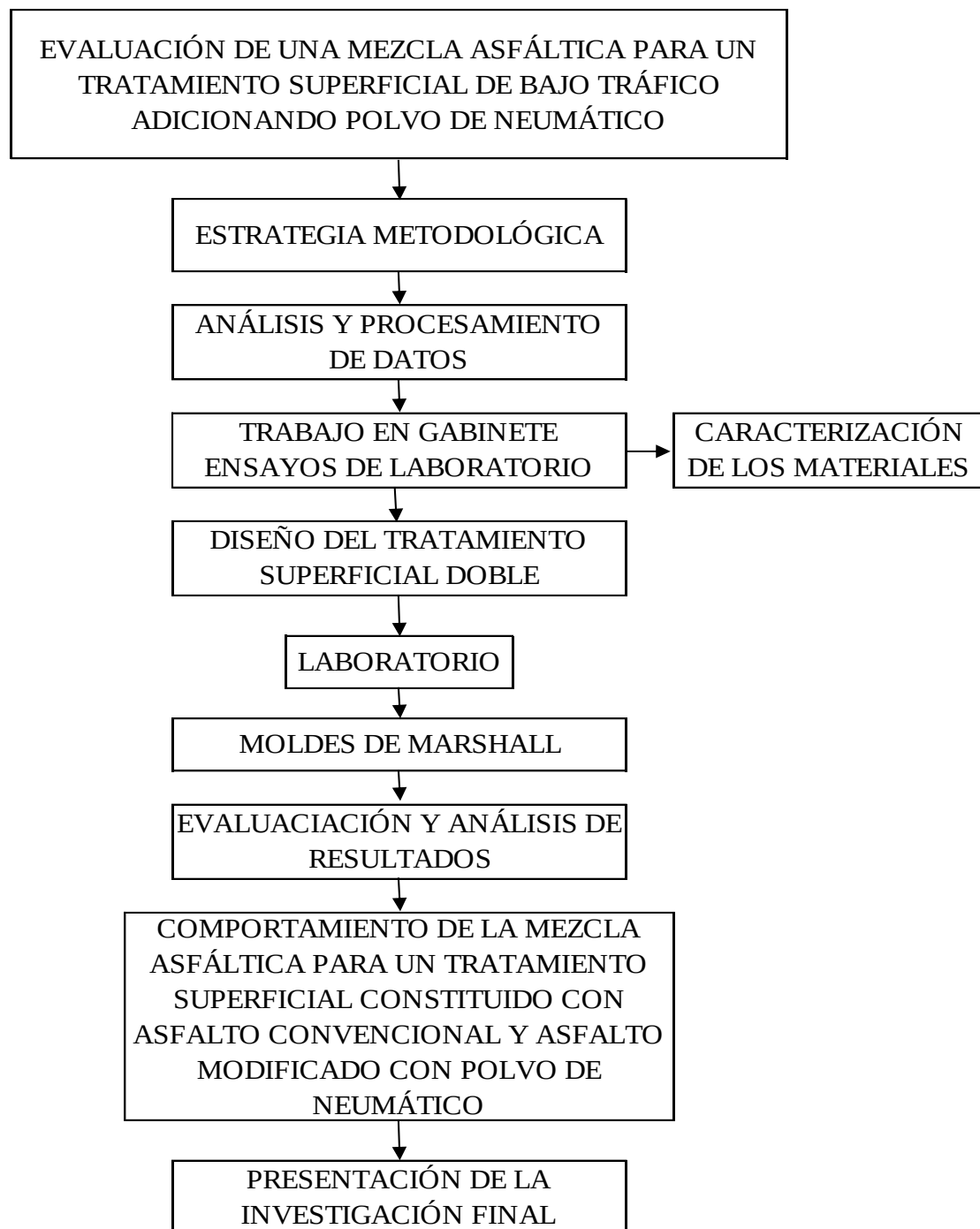
Tabla 1.1. Conceptualización y operacionalización de variables

Variable independiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Mezcla asfáltica para un tratamiento superficial	Es una combinación de agregados pétreos mas ligante asfáltico.	Ligante	L/m ² o gr/cm ²	Cantidad calculada
		Agregados pétreos	Kg/m ² o gr/cm ²	Cantidad calculada
Variable dependiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Estabilidad, fluencia; con asfalto modificado con polvo de neumático	Se define como la carga máxima en la cual se deforma y se produce la ruptura de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial doble.	Ensayo con el aparato de Marshall de las briquetas de tratamiento doble.	—	Briquetas de tratamiento doble.

Fuente: Elaboración propia.

1.7. PROCESO DE APLICACIÓN

Gráfico 1.1. Esquema de la investigación



Fuente: Elaboración propia.

1.8. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se realiza en los laboratorios de Asfalto, Hormigón y Suelos de la Universidad Autónoma “Juan Mísael Saracho” de la Facultad de Ciencias y Tecnología, la caracterización de los materiales se limitará a realizar los ensayos de acuerdo a los equipos disponibles en los laboratorios de la universidad; para ello nos centramos en cumplir con los objetivos de la investigación de demostrar que la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial constituido con asfalto modificado con polvo de neumático es más eficiente, comparado necesariamente con la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial con el asfalto convencional.

El método que recomienda el Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC para el diseño de las dosificaciones de agregado y ligante asfáltico para un tratamiento superficial es el Método de McLeod (Dimensión Mínima Promedio); se toma en cuenta para la dosificación tratarse de un tratamiento superficial doble.

Se toma en consideración lo estipulado en el Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas y la guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático.

Se elaboraron treinta briquetas con una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial con asfalto convencional y otras treinta con una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial con asfalto modificado, utilizando diferentes contenidos de ligante, de acuerdo con el método de la dimensión mínima promedio para la dosificación.

Evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial constituido con asfalto convencional y asfalto modificado con polvo de neumático que son usados como ligantes; la evaluación se realiza mediante el aparato de Marshall para la estabilidad y fluencia, el ensayo del Vialit para la comparación respectiva, planteando hacer una nueva alternativa que permita conservar y mantener el desempeño de las redes viales.

Por medio de los resultados se llega a tener conclusiones y recomendaciones de esta investigación realizada.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL DE BAJO TRÁFICO ADICIONANDO POLVO DE NEUMÁTICO

2.1. GENERALIDADES

El área de ingeniería vial en estos tiempos tiene mayores retos en forma general, como es el diseño de mejores vías que soporten los mayores incrementos de cargas vehiculares, el desarrollo acelerado del tráfico vehicular, las variaciones climatológicas que se hacen más extremas en el tiempo, sumado a la insuficiencia de recursos para la inversión en infraestructuras viales, retan a la ingeniería en investigar y plantear nuevas alternativas que permitan conservar y mantener el buen desempeño de nuestras redes viales.

El aumento en las exigencias a las cuales se someten los recubrimientos asfálticos en las carreteras ha forzado a las compañías constructoras y a las instituciones responsables de la construcción y mantenimiento de la red vial, a mejorar el comportamiento de los mismos para tratar de adecuarse a las demandas actuales del tráfico.

La necesidad de optimizar el comportamiento mecánico de los asfaltos convencionales, ante las situaciones mencionadas nace la necesidad de realizar la modificación de los asfaltos con polímero que mejorarán las propiedades mecánicas y reológicas del asfalto.

La modificación es una técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de los asfaltos en la pavimentación de vías. Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamientos) de las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado, disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad, finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

2.2. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado o tratado, según especificaciones técnicas, que se colocan sobre la subrasante con el objetivo de proveer

una superficie de rodadura adecuada y segura bajo diferentes condiciones ambientales y que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. (Ortega Maldonado, 2012).

2.3. TIPOS DE PAVIMENTO

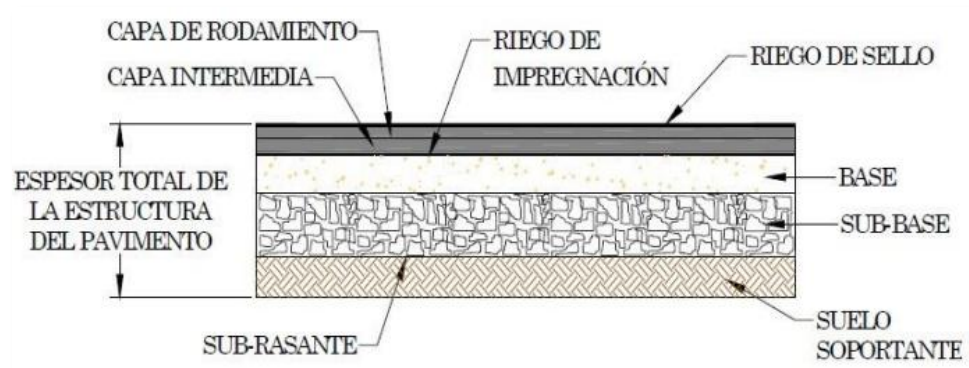
Los pavimentos de forma general pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Pavimentos flexibles.
- Pavimentos rígidos (Hormigón).

2.3.1. Pavimentos flexibles

Un pavimento flexible es una estructura que mantiene un contacto íntimo con las cargas y las distribuye a la sub-rasante, su estabilidad depende del entrelazamiento de los agregados, de la fricción de las partículas y de la cohesión. De modo que los pavimentos flexibles comprenden en primer lugar, a aquellos que están formados por una serie de capas granulares, rematadas por una capa de rodamiento asfáltica de alta calidad y relativamente delgada. La calidad de los materiales utilizados en cada una de las capas aumenta conforme nos acercamos a la superficie, de modo de lograr una estructura competente ante las cargas esperadas y que a la vez resulte lo más económica posible.

Figura 2.1. Sección transversal de un pavimento flexible



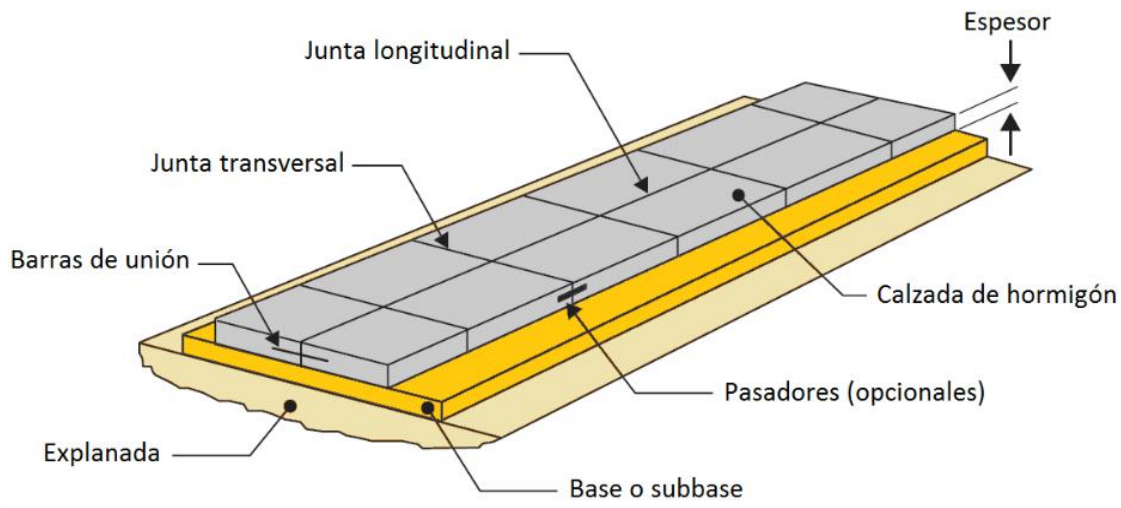
Fuente: Torres-Bonifaz Manual de Pavimentos, ESPE, 2010.

2.3.2. Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos consisten básicamente en losas construidas en el sitio sobre una capa de base y a veces sobre una capa sub-base, estas capas pueden ser o no ser

estabilizadas. La losa, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, absorben gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento lo que produce una buena distribución de las cargas de las ruedas, dando como resultado tensiones muy bajas en la sub-rasante. Difieren de los pavimentos flexibles, en que poseen una resistencia considerable a la flexión, además de que se ven considerablemente afectados por los cambios de temperatura.

Figura 2.2. Estructura típica de un pavimento rígido



Fuente: Torres-Bonifaz Manual de Pavimentos, ESPE, 2010.

2.4. CAUSAS DE DETERIORO DE PAVIMENTOS

El proceso de deterioro que experimentan los pavimentos está ligado a una cantidad muy significativa de factores, algunos de los cuales pueden ser más o menos independientes de la ubicación de la obra, pero otros están fuertemente relacionados con las condiciones locales, tales como las características de los suelos, la intensidad y distribución de las precipitaciones, las diferencias térmicas entre el día y la noche y entre invierno y verano, etc. (ABC, 2011).

A continuación, se mencionan los tipos de daños de acuerdo al tipo de pavimento:

Pavimento flexible: Parches, baches, ruptura de bordes, pulimento, exudación, piel de cocodrilo, grietas longitudinales, grietas transversales, grietas en bloques, hundimiento, deslizamiento, ondulación.

Pavimento rígido: Parches, baches, fisura de esquina, fisura transversal, fisura longitudinal, desnivel, sellado deficiente, pandeo, etc.

2.5. CONSERVACIÓN DE LOS PAVIMENTOS

La actividad de conservación de los caminos pavimentados, procura restablecer algunas características superficiales del pavimento, sin constituirse en un refuerzo estructural. En caminos asfálticos, se trata de mantener la durabilidad de la mezcla asfáltica y prevenir el desarrollo prematuro de fisuras y grietas, que suelen ser provocadas por la oxidación y radiación solar.

El tratamiento de la superficie normalmente se aplica mientras el pavimento aún está en buen estado, no habiendo alcanzado a llegar ni siquiera al estado regular. (ABC, 2011).

Figura 2.3. Carretera antes y después de un tratamiento superficial



Fuente: Los tratamientos superficiales – Lanamme.

Uno de los objetivos primordiales de la conservación es evitar, al máximo posible, la pérdida innecesaria de capital ya invertido, mediante la protección física de la estructura básica y de la superficie del camino. La conservación procura, específicamente, evitar la destrucción de elementos tales como obras de arte en general, túneles, drenajes, puentes, señalización, pavimento, y otros elementos que en conjunto conforman la infraestructura vial.

2.6. DEFINICIÓN DE MEZCLAS SUPERFICIALES

Es un término que se refiere a un tipo de mezcla asfáltica utilizada en la construcción y mantenimiento de pavimentos. Esta mezcla se aplica sobre la superficie de las carreteras, caminos o pistas para mejorar sus características funcionales. Los componentes de la mezcla superficial son los agregados y ligante asfáltico.

Los principales tipos de mezclas superficiales son: Tratamiento superficial simple, tratamiento superficial múltiple, mezclas asfálticas en caliente, mezclas asfálticas en frío, entre otros.

2.7. GENERALIDADES SOBRE LOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Los tratamientos superficiales se construyen en el mundo entero sobre un considerable porcentaje del total de las carreteras abiertas al tránsito todo el año. Su bajo costo y la posibilidad de ejecutarlos utilizando una amplia gama de materiales locales, hacen que estos revestimientos sean muy importantes, especialmente para carreteras de tráfico liviano o medio en áreas rurales. Cuando la construcción se realiza con el equipo apropiado es un pavimento de primera calidad (Arturo Castro, 2009).

2.7.1. Definición de tratamiento superficial

Es un revestimiento en el que un agregado es colocado uniformemente sobre un ligante bituminoso, previamente aplicado sobre la calzada, para luego ser compactado. Se designa por tratamiento superficial a cualquier tipo de revestimiento bituminoso delgado con un espesor menor a una pulgada (UMSS, 2014).

Ejemplos:

- Riegos antipolvo.
- Riegos de imprimación.
- Tratamientos superficiales simples.
- Tratamientos superficiales múltiples.
- Tratamientos superficiales con mezclas en instalación fija.
- Sellados con lechada asfáltica.
- Riegos de sellado.

-

- Finalidades

Función principal:

- Servir como revestimiento de los caminos.
- Proporcionar un movimiento más suave y seguro a los vehículos, librándolos del polvo.
- Proteger la estructura subyacente de la acción dañina de las aguas de infiltración.

Funciones complementarias:

- Restaurar pavimentos (gastados, oxidados, deformados, fisurados, etc.).
- Obtener una superficie antideslizante.
- Obtener una superficie de bajo costo que sirva en el tiempo.

- Principios básicos de comportamiento

- 1) El material bituminoso debe ser aplicado en cantidad suficiente como para aglutinar y mantener firmes los fragmentos del agregado.
- 2) El agregado debe ser aplicado de tal modo que cubra íntegramente al material bituminoso uniformemente distribuido sin excesos ni defectos.
- 3) El grado de retención o aglutinación entre los dos materiales constituyentes debe ser capaz de impedir que el agregado sea arrancado por la acción de las ruedas.

2.8. TIPOS DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

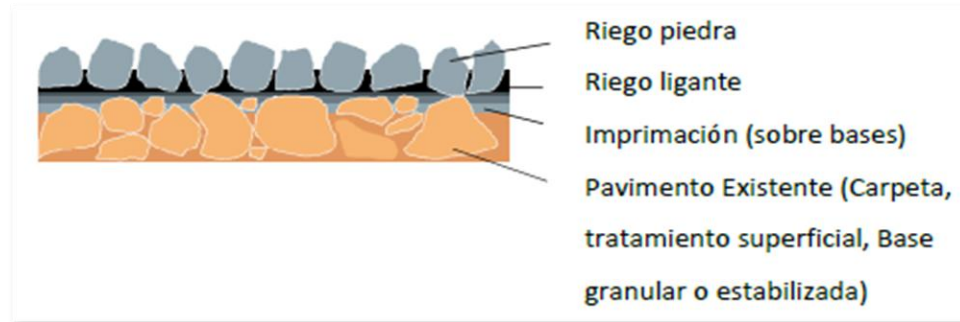
Los tipos de tratamientos superficiales van desde una simple y ligera aplicación de asfalto líquido hasta una serie de capas alternadas de asfalto y agregado. Todos ellos sellan y aumentan la vida de la superficie de las carreteras, pero cada tipo tiene una o más fines específicos (Arturo Castro, 2009). A continuación, se describe de manera sucinta los más importantes:

2.8.1. Tratamiento superficial simple

Se define como una aplicación de asfalto a cualquier clase de superficie de carretera, seguida de una aplicación de agregado de tamaño tan uniforme como sea posible. El espesor del tratamiento es casi igual al tamaño máximo nominal del agregado. Un

tratamiento superficial simple se suele usar como capa de desgaste y de impermeabilización.

Figura 2.4. Tratamiento superficial simple

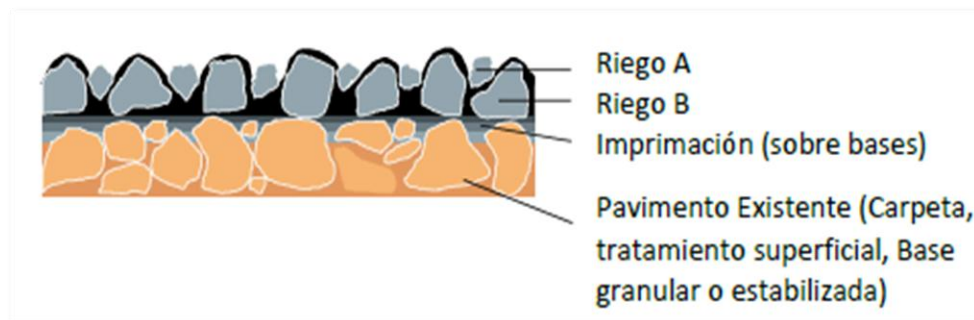


Fuente: Tratamientos superficiales de alto desempeño, 2019.

2.8.2. Tratamiento superficial múltiple

Dos o tres tratamientos superficiales colocados uno encima del otro. El tamaño máximo del agregado de cada tratamiento sucesivo es corrientemente la mitad del tamaño del agregado colocado previamente, y el espesor total es casi el mismo que el tamaño máximo nominal del agregado de la primera capa; usualmente el triple produce una capa de pavimento de un espesor hasta de 2,5 cm. Un tratamiento superficial múltiple constituye un tratamiento más denso e impermeabilizante que uno de capa simple, y proporciona al pavimento alguna resistencia.

Figura 2.5. Tratamiento superficial doble



Fuente: Tratamientos superficiales de alto desempeño, 2019.

2.9. TRÁFICO EN TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Según el Manual de diseño de conservación vial de la ABC, se recomienda tránsito ligero y de mediano volumen en tratamientos superficiales.

Tabla 2.1. Clasificación del tráfico

Tipo de Tráfico	Descripción
Ligero	Autos, motos, poca carga
Mediano	Vehículos livianos y algunos pesados
Pesado	Alta proporción de camiones o buses
Muy pesado	Tráfico continuo de vehículos pesados

Fuente: INVIAS, Manual de diseño geométrico.

La cantidad del tráfico en términos de vehículos por día es necesario en la determinación de la cantidad de ligante asfáltico y se establece en la metodología de dimensión mínima promedio (DMP).

2.10. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE UN TRATAMIENTOS SUPERFICIAL

Según UMSS (2014) principalmente se deben considerar los siguientes factores:

- Propiedades de los agregados.
- Propiedades de los ligantes.
- Metodologías de dosificación de tratamientos superficiales.

2.10.1 Propiedades de los agregados

En tratamientos superficiales los agregados tienen la función de proveer la textura deseada, resistir la abrasión producto del tráfico y las condiciones climáticas, transmitir

las cargas vehiculares al pavimento y aumentar el coeficiente de fricción de la carretera (Zuñiga, 2012).

Las especificaciones que se deben cumplir están establecidas en normas que se utilizan en nuestro país como la ASTM, AASHTO y el Manual de especificaciones técnicas generales de construcción elaborado por la administradora boliviana de carreteras (ABC).

Características fundamentales

Físicas

- Granulometría.
- Tamaño máximo.
- Forma
- Angularidad.
- Dureza.
- Porosidad.
- Limpieza.

Físico químicas

- Adhesividad.
- Alterabilidad frente a los agentes atmosféricos y al tráfico.

2.10.1.1. Características físicas

El agregado seleccionado para el tratamiento debe cumplir ciertas exigencias normativas y características en cuanto a tamaño, dureza, forma, limpieza y propiedades superficiales.

Granulometría

El análisis granulométrico es el conjunto de operaciones cuyo fin es determinar la distribución del tamaño de los elementos que componen una muestra.

Según el Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC no se permitirá el empleo de agregados que contengan agua libre. Los agregados deberán satisfacer la siguiente gradación:

Tabla 2.2. Requisitos de gradación de agregados para tratamientos superficiales bituminosos

Tamiz	Porcentaje, en peso, que pasa por los tamices de malla cuadrada-método AASHTO T-27					
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D	Gradación E	Gradación F
1 1/2"	100	-	-	-	-	-
1"	90 - 100	100	-	-	-	-
3/4"	20 - 55	90 - 100	100	-	-	-
1/2"	0 - 10	20 - 55	90 - 100	100	-	-
3/8"	0 - 5	0 - 15	40 - 70	85 -100	100	100
Nº. 4	-	0 - 5	0 - 15	10 - 30	85 - 100	85 - 100
Nº. 8	-	-	0 - 5	0 - 10	10 - 40	60 -100
Nº. 100	-	-	-	-	-	0 - 10

Fuente: Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC.

Tamaño máximo

La especificación de la ASTM establece agregados de diferentes tamaños máximos para la ejecución de los tratamientos superficiales que van desde tamaños máximos de 25 mm hasta tamaños máximos de 5 mm y diferentes combinaciones de tamaños para los tratamientos dobles y triples. Considerando como máximo tamaño a emplear 25 mm.

Forma

La forma de las partículas está determinada por:

- Naturaleza de la roca.
- Proceso de trituración: regularidad en la alimentación.
- Coeficiente de reducción en el proceso de trituración.

Tipos y características principales:

- Redondeadas: menor rozamiento interno, mayor tasa de ligante, escurrimientos.
- Laminares: facilidad de dislocamiento/fragmentación, sobre posición.
- Cúbicas: drenaje superficial deficiente, mayor riesgo de exudación.
- Poliédricas (ideales): Condiciones de fijación superiores, rozamiento interno elevado, mayor resistencia a la fragmentación, rugosidad (profundidad de textura) adecuada, drenaje superficial apropiado, dosificación fácil.

Angularidad

El buen rozamiento interno de las partículas minerales es importante para asegurar un trabajo en común de todo el conjunto de partículas minerales que forman el mosaico final del riego. Distintas especificaciones consideran que una partícula puede ser adecuada cuando tiene, por lo menos, dos caras fracturadas, exigiendo que el contenido de estas partículas sea superior al 75% en peso del total.

El ensayo de las caras fracturadas determina el porcentaje en peso del material que presente una, dos o más caras fracturadas de las muestras de agregados pétreos.

Dureza

Esta característica es muy importante, se debe controlar mediante el ensayo de desgaste por medio de la máquina de los ángeles.

Las especificaciones para construcción de carreteras establecen que el desgaste no debe ser mayor a 40 %. Los agregados deben ser de piedra triturada, cascajo o gujarros rodados triturados.

Porosidad

Una pequeña porosidad es beneficiosa, porque permite una penetración apropiada del ligante, lo cual aumenta la resistencia al desprendimiento de la película de ligante bajo la acción del agua.

Limpieza

Es necesario controlar la limpieza de los agregados, para garantizar la adherencia entre las partículas del agregado y el ligante bituminoso, por lo cual las partículas pétreas deben estar exentes de polvo, materia orgánica o cualquier sustancia perjudicial.

2.10.1.2. Propiedades físico químicas

Adherencia

Es una condición fundamental para que los agregados sean cubiertos por el ligante, además para que la película de ligante tenga la resistencia suficiente para evitar su desprendimiento por la acción combinada del agua y el tráfico.

Alterabilidad

Los agregados están sujetos a procesos de descomposición, debido a que están directamente sometidos a la intemperie y a la acción combinada de los agentes atmosféricos y al tráfico. El control de la alterabilidad del agregado se realiza mediante el ensayo de durabilidad (Pérdida máxima con sulfato de sodio / magnesio < 12%).

Tabla 2.3. Ensayos de laboratorio normalizados para agregados

Ensayos de laboratorio para agregados	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T-27 ASTM C-136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de un tratamiento superficial es de primordial importancia, porque en función de ellas se conoce de la gradación de los agregados.
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	AASHTO T-85 ASTM C-127	La densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente empleada para calcular el volumen ocupado por el agregado en mezclas como las de concreto hidráulico, concreto asfáltico y otras que se dosifican o analizan sobre la base de un volumen absoluto.
Peso unitario de los agregados	AASHTO T-19 ASTM C-29	El método de prueba se emplea para determinar valores de densidad bulk que son utilizados por muchos métodos de selección de proporciones para mezclas asfálticas.
Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados	NTL-354	La forma de las partículas de los agregados es importante en la construcción de carreteras, porque las partículas de forma defectuosa suelen generar inconvenientes. Las partículas planas y alargadas tienden a producir mezclas de concreto poco trabajables, lo que afecta su durabilidad a largo plazo.
Desgaste por medio de la máquina de los Ángeles	AASHTO T-96 ASTM C-131	Este ensayo se ha usado ampliamente como un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas. Los resultados no brindan automáticamente comparaciones válidas entre fuentes marcadamente diferentes en origen, composición o estructura.
Porcentaje de caras fracturadas de los agregados	ASTM D-5821 NTL-358	Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso, del material que presente una o más caras fracturadas de las muestras de agregados. Uno de los propósitos de este requisito es maximizar la resistencia al corte, incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregados, ligadas o no.
Durabilidad por el método de los sulfatos para determinar la desintegración	AASHTO T-104 ASTM C-88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura en pavimentos; especialmente cuando estos tendrán una gran porción de superficie expuesta a los agentes atmosféricos.

Fuente: Elaboración propia.

2.10.2. Propiedades de los ligantes

El asfalto es un material de particular interés para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales (Cueva del ingeniero civil, 2009).

Se utiliza como ligante el asfalto convencional 85-100 y el asfalto modificado con polvo de neumático, donde se verifica que cumplan con las especificaciones establecidas en normas que se utilizan en nuestro país como la ASTM, AASHTO y el Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.

Finalidades

- Fijación de los agregados.
- Impermeabilización del pavimento.

2.10.2.1. Factores que se consideran para la elección de los ligantes

- Características de los agregados.
- Tráfico.
- Condiciones climáticas locales.
- Temperatura de la superficie: sobre la cual se aplicará el asfalto.
- Características de la superficie subyacente.
- Resistencia al envejecimiento.
- Condiciones de la superficie.
- Equipo utilizado.
- Economía.

2.10.2.2. Condiciones básicas que debe cumplir el ligante bituminoso

- El asfalto debe ser lo suficientemente fluido para obtener una aplicación uniforme sobre la superficie que se quiere cubrir.
- Debe ser lo suficientemente fluido para envolver rápidamente las partículas del agregado y conseguir una adherencia inicial rápida entre el ligante y el agregado y con la superficie del camino.
- Una vez concluido el tratamiento superficial, para la apertura al tráfico, el asfalto debe tener una viscosidad adecuada para retener el agregado en su lugar.

Tabla 2.4. Ensayos de laboratorio normalizados para el asfalto 85-100

Ensayos de laboratorio para asfaltos	Norma	Propósito
Penetración	AASHTO T49-97 ASTM D-5	El ensayo de penetración se usa para medir la consistencia de los productos bituminosos a la temperatura de ensayo. Altos valores de penetración indican consistencias más blandas.
Punto de inflamación	AASHTO T79-96 ASTM D1310-01	Tiene por propósito identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro de inflamación. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta de Cleveland.
Punto de ablandamiento	AASHTO T53-96 ASTM D-36	Los productos bituminosos son materiales visco-elásticos y no cambian del estado sólido al estado líquido a una temperatura definida, sino que se toman gradualmente más blandos y menos viscosos a medida que se eleva la temperatura. Por esta razón, el punto de ablandamiento se debe determinar por medio de un método arbitrario pero muy definido, que produzca resultados reproducibles y comparables.
Ductilidad	AASHTO T51-00 ASTM D-113	El ensayo brinda una medida de las propiedades a tensión de los materiales bituminosos y se usa para establecer si el producto que se ensaya cumple la especificación correspondiente. Generalmente, se considera que un asfalto de baja ductilidad presentará pobres propiedades adhesivas y un deficiente comportamiento en servicio.
Peso específico	AASHTO T229-97 ASTM D71-94	Los valores de densidad se usan para realizar conversiones de unidades de volumen a masa y para realizar correcciones en las medidas de volumen, cuando la temperatura de ejecución del ensayo difiere de la temperatura usada como referencia.
Viscosidad	AASHTO T201-01 ASTM D-2170	La viscosidad cinemática caracteriza el comportamiento del flujo. El método se usa para determinar la consistencia de un ligante bituminoso como un elemento para establecer la uniformidad de embarques o de fuentes de suministro. Usualmente, se especifica 60° y 135° C. También, se utiliza para conocer el comportamiento reológico del producto y para determinar las temperaturas de elaboración y compactación de las mezclas asfálticas.

Fuente: Elaboración propia.

2.10.2.3. Tipos de ligante asfáltico

Se utiliza como ligante el asfalto convencional 85-100 y el asfalto modificado con polvo de neumático.

- Asfalto convencional 85-100

Es un material aglomerante sólido o semisólido de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados, que se obtienen de la refinación del petróleo. El asfalto convencional es comúnmente usado en la construcción de pavimentos para carreteras, autopistas, calles, aeropuertos, áreas de estacionamiento, entre otros. Se clasifican de acuerdo a su consistencia medida por la viscosidad dinámica o absoluta y por su penetración comprendidos entre 40 y 300 (Carrasco Flores, 2014).

El Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC de Bolivia recomienda el uso de los siguientes tipos de asfaltos diluidos y asfaltos convencionales (cementos asfálticos) en tratamientos superficiales:

Asfalto diluido de curado medio	MC-800 y MC-3000.
Asfalto diluido de curado rápido	RC-250, RC-800 y RC-3000.
Cemento asfáltico; penetración	85-100, 120-150 y 200-300.

Tabla 2.5. Especificaciones del asfalto convencional 85-100

Ensayos	Limites	Método	Encontrados
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg.	85-100	(AASHTO T49-97); (ASTM D-5)	90,67
Punto de inflamación	232 min.	(AASHTO T79-96); (ASTM D1310-01)	292
Punto de ablandamiento	43 a 53	(AASHTO T53-96); (ASTM D-36)	46,67
Ductilidad	100 min.	(AASHTO T51-00); (ASTM D-113)	113
Peso específico	1 a 1,05	(AASHTO T229-97); (ASTM D71-94)	1,019
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C	85 min	(AASHTO T201-01); (ASTM D-2170)	97,33

Fuente: Repsol, ficha técnica del asfalto 85-100.

- Asfalto modificado con polvo de neumático (polímero)

Se denomina asfaltos modificados a los cuales se les adiciona en forma de disolución, sustancias de alto peso molecular denominados polímeros (el polvo de neumático es un tipo de elastómero, invariablemente un polímero), que tienen la característica de ser estables en el tiempo y resistentes a la gradiente térmica; de esta manera, el asfalto ve modificadas sus propiedades físicas y reológicas, aumentando su resistencia a la oxidación, humedad y cambios de temperatura.

Estos polímeros incrementan la adherencia entre el material pétreo y el asfalto, incluso aún en presencia de agua, así como mejoran la resistencia del producto final a las deformaciones y agrietamientos.

El objetivo perseguido con la adición de polímeros al asfalto es el modificar sus propiedades físicas-mecánicas y reológicas buscando:

- Disminuir la susceptibilidad térmica, disminuir la fragilidad en el tiempo de frío y aumentar la cohesión en tiempo de calor.
- Disminuir la susceptibilidad a los tiempos de aplicación de la carga.
- Aumentar la resistencia a la deformación permanente y a la rotura en un rango más amplio de temperaturas, tensiones y tiempos de carga.
- Mejorar la adherencia con los agregados.

Logrando estos objetivos el asfalto se puede destinar a:

- Aumentar la durabilidad de las carreteras o disminuir el espesor de las mismas.

En muchos países, la administración pública ha jugado un papel crucial en el desarrollo de los asfaltos modificados, fomentando las pruebas y motivando a las empresas productoras de asfalto y a las constructoras para que investiguen en estas áreas. Por otra parte, la misma administración pública, a través de sus centros de desarrollo ha participado en las investigaciones, estudiando las posibilidades de adición de diferentes polímeros más interesantes.

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto, los

polímeros son sustancias de alto peso molecular formado por la unión de cientos de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples).

Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas como cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijo que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y suelta, éstos pueden ser homopolímeros, copolímeros, polímeros que son plastómeros y elastómeros, termoendurecibles.

Homopolímeros: que tienen una sola unidad estructural.

Copolímeros: tienen varias unidades estructurales distintas.

Plastómeros: al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad.

Elastómeros: al estirarlos, a diferencia de los anteriores, estos vuelven a su posición original, los más conocidos se describen a continuación:

- **Natural:** caucho natural, celulosa, glucosa, sacarosa, ceras y arcillas son ejemplos de polímeros orgánicos e inorgánicos naturales.
- **SBS:** Estireno-Butadieno-Estireno o caucho termoplástico. Este es el polímero utilizado para la modificación de los asfaltos, ya que este es el que mejor comportamiento tiene durante la vida útil de la mezcla asfáltica.
- **SBR:** cauchos sintéticos del 25% de Estireno y 75% de butadieno; para mejorar su adhesividad se le incorpora ácido acrílico.
- **EPDM:** Polipropileno atáctico es muy flexible y resistente al calor y a los agentes químicos.

Termoendurecibles: tienen muchos enlaces transversales que impiden que puedan volver a ablandarse al calentarse nuevamente.

Cuando se añaden polímeros al asfalto, las propiedades del asfalto modificado dependen de los siguientes parámetros; el tipo de polímero a emplearse ya sean elastómeros o plastómeros, su forma física, naturaleza y grado de asfalto, tipo de equipo, tiempo, temperatura durante el mezclado, finalmente compatibilidad del asfalto y el polímero.

2.10.2.4. Generalidades sobre el polvo de neumático fuera de uso

Los neumáticos son estructuras muy complejas elaboradas con más de doscientos componentes. El principal componente es el caucho, que es casi la mitad de su peso, y puede ser de dos tipos: natural o sintético. El caucho natural normalmente le proporciona elasticidad al neumático, mientras que el sintético lo que aporta es estabilidad térmica (Olivares Carmona, 2016).

El caucho natural se obtiene a partir de un fluido lechoso de color blanco, conocido como látex, que corresponde a la savia de varias plantas específicas. La principal fuente comercial de látex son las euforbiáceas del género *Hevea*, que contienen entre un 30% a un 40% de caucho. Por otro lado, los cauchos producidos sintéticamente se obtienen por reacciones químicas, conocidas como polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados, consiguiendo cualidades y características exclusivas, que en muchos casos lo hacen superior e insustituible con respecto al caucho natural (Dupré, 2013).

Ambos tipos de cauchos son polímeros elastoméricos, un material con la propiedad mecánica de poder sufrir mucha más deformación elástica bajo tensión que la mayoría de los materiales y regresar a su tamaño previo sin deformación permanente.

Durante la fabricación del neumático, los cauchos se someten al proceso de vulcanización consiste en entrelazar las cadenas de polímeros con moléculas de azufre mediante la acción de altas presiones y temperaturas. Los enlaces así formados son muy estables lo que hace que el proceso de desvulcanización sea difícil. Esta es la principal causa por la cual no es posible reciclar neumáticos desechados para la fabricación de neumáticos nuevos.

Otro componente de los neumáticos que entra en proporciones altas, es el negro de carbono, que sirve como carga de refuerzo y para mejorar la resistencia de los cauchos a la oxidación. El acero y material textil constituyen el tercer y cuarto componente en magnitud del neumático, con la misión de ser el esqueleto del mismo y soportar y transmitir las cargas y esfuerzos que se producen sobre él durante la circulación de los

vehículos. El óxido de zinc, el azufre y otra serie de productos químicos, que actúan como catalizadores, plastificantes, adhesivos, etc., terminan de dar la composición al neumático.

La clasificación de los neumáticos se hace generalmente según el tipo de vehículos que los utiliza. Se ha estimado que un 80% de los neumáticos desechados proceden de automóviles o camionetas (peso aproximado de 8kg), un 20% de vehículos pesados (peso aproximado de 65kg), y alrededor del 1% restante son neumáticos especiales para motocicletas, aviones, equipos de construcción u otros.

En un neumático, las proporciones de los componentes pueden variar en función del tipo de neumático y del fabricante, aunque generalmente se aproximan a las que se exponen en la Tabla 2.6. (porcentajes en peso). Es importante señalar que el mayor porcentaje de caucho se encuentra en la banda de rodado y el mayor porcentaje de acero, en el anillo interno del neumático que se sujeta a la llanta (talón).

Tabla 2.6. Composición ponderal de los neumáticos

Material	Vehículo Turismo (%)	Vehículo Pesado (%)
Caucho	48	45
Negro de carbono y sílice	22	22
Metal	15	25
Textil	5	-
Óxido de zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	5

Fuente: Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.

Aplicaciones de los neumáticos fuera de uso

Según CEDEX (2007) las posibles aplicaciones de reutilización y de reciclado de los neumáticos fuera de uso son muy variables. Además del recauchutado, que es sin duda la principal aplicación de reutilización de los neumáticos, se pueden citar empleos de neumáticos enteros en:

- Arrecifes artificiales.
- Defensas de muelles o embarcaciones.
- Barreras sonoras
- Como elementos de seguridad vial, entre otros.

En trozos o tiras se pueden utilizar en:

- Rellenos ligeros.
- Drenaje de gases en vertederos y rellenos.
- Recogida de lixiviados en vertederos, y aislamientos térmicos.

Como material granulado y polvo tienen aplicación en:

- Carreteras.
- Campos de fútbol.
- Relleno de césped artificial.
- Mezclas de caucho.
- Elastómeros termoplásticos, etc.

Obtención del polvo de neumático

Las técnicas más utilizadas, son la molienda mecánica a temperatura ambiente y la molienda criogénica a una temperatura por debajo de la transición vítrea, la etapa empieza con la eliminación de fibras de acero, luego la etapa de cribado y molienda y finalmente la etapa de limpieza. En la etapa de limpieza, las partículas de caucho se limpian a fondo con agua y otros agentes de limpieza como solución de amoníaco, ácido cítrico, etc. (Mohajerani, 2020).

La empresa INGOQUI realiza la obtención de dicho material por la molienda criogénica.

- Molienda criogénica

La molienda criogénica consiste en congelar el caucho con un agente químico, como nitrógeno líquido, por debajo de la fase de transición vítrea. A continuación, se tensiona el caucho hasta obtener el tamaño deseado. La molienda criogénica produce materiales de caucho más suave y más pequeño.

Figura 2.6. Proceso de molienda criogénica



Fuente: Ingoqui.

Costo de procesamiento

El costo de procesamiento de los neumáticos desechados involucra mano de obra, energía, equipo y su mantenimiento. Por lo tanto, si el tamaño de las partículas de caucho es menor, entonces el costo asociado con su producción será mucho mayor (Roychand, 2019).

La diferencia entre procesamiento a temperatura ambiental y criogénica está en la calidad del polvo de caucho. El procesamiento criogénico conduce a una mayor finura de molienda, cuyo precio es mayor.

Tabla 2.7. Costo de procesamiento del polvo de neumático

Tamaño de la partícula (mm)	Presentación	Costo de procesamiento Bs
< 1,00	Sacos de 40 kg	160,00

Fuente: Ingoqui.

Técnicas de incorporación del polvo de neumático

Según CEDEX (2007) la incorporación del caucho proveniente de neumáticos fuera de uso a una mezcla de asfalto - caucho, se puede hacer de dos maneras, denominadas vía húmeda y vía seca. Ambos procedimientos se diferencian, además de la forma de ejecución, en el contenido de caucho que se utiliza para preparar la mezcla de asfalto - caucho.

En la presente investigación se incorpora el polvo de neumático (caucho) por vía húmeda, el cual se describe a continuación:

- Proceso por vía húmeda

En el proceso de vía húmeda se fabrican los ligantes añadiendo caucho a un asfalto convencional. Cuando el caucho se incorpora al asfalto convencional 85-100 a elevada temperatura, las partículas de caucho se reblandecen, absorben los componentes más ligeros del asfalto convencional y se hinchan. Con el hinchamiento disminuye la distancia entre partículas y el ligante se hace más viscoso. Este fenómeno de hinchamiento se suele denominar digestión o maduración (interacción del polvo de neumático con el asfalto). El proceso se controla mediante la medida de la viscosidad del ligante. Un asfalto con un 15 % de caucho puede aumentar su viscosidad en un factor de 10 o más.

Las características del producto resultante de la mezcla del asfalto convencional 85-100 y el caucho dependen de ambos componentes, del tamaño de las partículas del caucho y del

tiempo y temperatura de mezclado. Las temperaturas elevadas, los largos tiempos de mezclado y las partículas más pequeñas de caucho producen interacciones más rápidas.

Los asfaltos con caucho se pueden clasificar según el procedimiento de fabricación y según el contenido de caucho.

Figura 2.7. Proceso por vía húmeda



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.8. Terminología asociada al uso del polvo de neumático

Proceso	Producto	% de incorporación de polvo de caucho
Vía húmeda	Betún mejorado con caucho (BM)	8-12
	Betún modificado con caucho (BMC)	12-15
	Betún modificado de alta viscosidad de caucho (BMAVC)	15-22
Vía seca	Mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho	0,5 - 1,0 % respecto al peso del árido

Fuente: Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.

Consideraciones para la implementación del polvo de neumático en un asfalto

Según (Gallego Medina, 2017) en los siguientes apartados se describe las consideraciones a seguir para implementar el polvo de neumático (caucho) en un asfalto.

- Selección del asfalto base

Como criterio de partida el asfalto base debe ser más blando que el que se pretende obtener.

También tiene cierta influencia la naturaleza química del asfalto. En general son preferibles los asfaltos cuyo contenido conjunto de compuestos nafteno-aromáticos y aromáticos -polares sea lo más alto posible.

- Selección del polvo de neumático

El parámetro con más influencia para la modificación del asfalto es la granulometría del caucho. En general, granulometrías más gruesas ralentizan la interacción asfalto-caucho y acentúan los problemas de sedimentación en el producto final.

Propiedades químicas y físicas del polvo de neumático

Para que las mezclas asfalto-caucho en caliente fabricadas por vía húmeda o seca tengan unas características adecuadas, se le debe exigir al caucho obtenido de la trituración de neumáticos fuera de uso, cumplir ciertas propiedades químicas y físicas.

Las especificaciones sobre composición química tienen como función principal asegurar que el material proviene del reciclado de neumáticos fuera de uso. Por otro lado, las propiedades físicas que se especifican son las siguientes:

- La granulometría del polvo de neumático deberá estar comprendida dentro de algunas de las bandas granulométricas indicadas en la Tabla 2.9. el tamaño máximo y la granulometría de las partículas son los parámetros que tienen gran influencia en el comportamiento de la mezcla.
- La densidad aparente puede variar ligeramente en función del proceso de producción. No obstante, como valor de referencia se puede tomar una densidad aparente del orden de 0,3 - 0,5 gr/cm³, con ligeras oscilaciones en función de la banda granulométrica y tipo de neumático empleado.

- El contenido de agua deberá ser menor que 0,75%. Su determinación se tiene que realizar de acuerdo a la Norma UNE 103 300-3, excepto en lo relativo a la temperatura de calentamiento en la estufa, que será de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- El contenido en contaminantes como materiales ferromagnéticos, textiles e impurezas, que se limita para evitar deterioros en los equipos de manejo y pérdidas de características en los productos fabricados (mezclas).

Tabla 2.9. Bandas granulométricas especificadas para el polvo de neumático

Tamiz		P - 1	P - 2	P - 3
ASTM	mm	% pasante	% pasante	% pasante
Nº 8	2,36	100	-	-
Nº 16	1,18	60 - 100	100	-
Nº 30	0,60	30 - 80	40 - 100	100
Nº 50	0,30	15 - 60	10 - 70	30 - 60
Nº 100	0,15	0 - 40	2 - 40	0 - 30
Nº 200	0,075	0 - 20	0 - 20	0 - 18

Fuente: Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.

Temperatura de mezclado y tiempo de digestión

Se ha comprobado que la intensidad con la que interacciona el asfalto y polvo de neumático (caucho), en la operación de fabricación, se duplica aproximadamente por cada incremento de 10°C de temperatura. Por ello, cuanto mayor sea la temperatura, menor será el tiempo de digestión necesario.

No obstante, al calentar los asfaltos éstos envejecen, por lo que deben evitarse temperaturas innecesariamente altas. Sería recomendable que, de acuerdo con la práctica habitual, las temperaturas de mezclado estén en los siguientes rangos:

- Asfaltos con un contenido de polvo de neumático de hasta el 22%: $185\text{-}195^{\circ}\text{C}$.
- Asfaltos con un contenido de polvo de neumático de hasta el 15%: $175\text{-}185^{\circ}\text{C}$.

Para su uso del asfalto modificado con caucho reciclado se deberá calentar a una temperatura entre 160 y 190°C .

En cuanto a los tiempos de digestión deben establecerse con carácter general 60 minutos, si bien a escala industrial este tiempo puede reducirse ligeramente.

Tabla 2.10. Especificaciones de asfaltos mejorados con polvo de neumático (BM)

Características		Norma de referencia	Unidad	BC35/50	BC50/70
Penetración, 25° C		UNE EN 1426	0,1 mm	35 - 50	50 - 70
Punto de reblandamiento anillo y bola		UNE EN 1427	°C	≥ 58	≥ 53
Punto de fragilidad Fraass		UNE EN 12593	°C	≤ -5	≤ -8
Fuerza ductilidad (5cm/min)	5°C	UNE EN 13589 UNE EN 13703	j/cm²	≥ 0,5	
Recuperación elástica a 25 °C		UNE EN 13398	%	≥ 10	
Estabilidad al almacenamiento (*)	Diferencia anillo y bola	UNE EN 13399	°C	≤ 10	
	Diferencia de penetración		0,1 mm	≤ 8	≤ 10
Solubilidad		UNE EN 12592	%	≥ 92	
Punto de inflamación v/a		UNE EN ISO 2592	°C	≥ 235	

Fuente: Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.

2.10.3. Metodologías de dosificación de tratamientos superficiales

A continuación, se presentan las metodologías de dosificaciones de tratamientos superficiales bituminosos más comúnmente empleadas, las cuales tienen como finalidad la determinación de las dosificaciones del agregado pétreo y ligante bituminoso. Así también, se exponen los fundamentos y el procedimiento de cada una de estas metodologías.

La dosificación del agregado pétreo es referida a la distribución del material granular, el cual debe formar un mosaico uniforme, sin vacíos y sin acumulaciones. Mientras que la dosificación del ligante bituminoso es realizada en dos etapas; primero se establecen los procesos para determinar el volumen de vacíos entre la capa de agregado, para luego en base a este dato, dosificar la cantidad del ligante.

Se describen las siguientes metodologías de diseño que se aplican en un tratamiento simple donde se repite consecutivamente el procedimiento al tratarse de un tratamiento superficial doble o un tratamiento superficial triple.

Método empírico

Este tipo de método se basa en la experimentación, fórmulas empíricas, cálculos y factores que afectan al desempeño de las propiedades y características de los agregados pétreos y del ligante asfáltico.

Existen diversas metodologías empíricas para diseñar un tratamiento superficial, sin embargo, con el pasar del tiempo dos de estas han ido mejorando y consolidándose como las más adecuadas para el diseño de tratamientos superficiales múltiples, Método de McLeod o Dimensión Mínima Promedio y el Método de Kearby Modificado.

Ambos métodos evalúan las tasas de aplicación de agregado pétreo y ligante, mediante el desarrollo de pruebas de laboratorio en el agregado y la estimación de la profundidad de incrustación del agregado en función del volumen de tráfico (Jibaja, 2019).

- Método de McLeod o Dimensión Mínima Promedio

En 1969, Norman McLeod presentó el Método de la Dimensión Mínima Promedio, el cual se desarrolló a partir de la hipótesis del neozelandés F.M Hanson. Este diseño posteriormente fue adaptado por la asociación de fabricantes de emulsiones asfálticas.

Fundamentos

Según Hanson, el espesor final compactado de agregado pétreo viene dado por la menor dimensión promedio de las partículas, la cual fue denominada como dimensión mínima promedio. Esta dimensión es adquirida por el agregado después del proceso de esparcido, compactación con rodillos y solitaciones de tránsito, puesto que:

- 1.- Cuando se distribuye un agregado de una sola dimensión en una plataforma, previamente imprimada con un ligante bituminoso, las partículas quedan en una posición desordenada y el volumen de vacíos es aproximadamente el 50 %.
- 2.- Después de un trabajo de compactación las partículas se orientan y el porcentaje de vacíos disminuye aproximadamente a un 30 %.
- 3.- Como consecuencia de las cargas del tráfico, el agregado y el ligante adquieren su máxima densidad y los vacíos se reducen aproximadamente al 20%. Todas las partículas se acomodan en una posición que corresponde a su lado más achatado.

Figura 2.8. Distribución de los vacíos en la capa de tratamiento superficial según Hanson



Nivel de espacios de 50% cuando el agregado es recién esparcido



Espacios se reducen al 30% al iniciarse la compactación de los agregados



Espacios se reducen al 20% con el paso de los vehículos

Fuente: Seguimiento de un doble tratamiento superficial para camino de alto tránsito.
Queirolo, 2009.

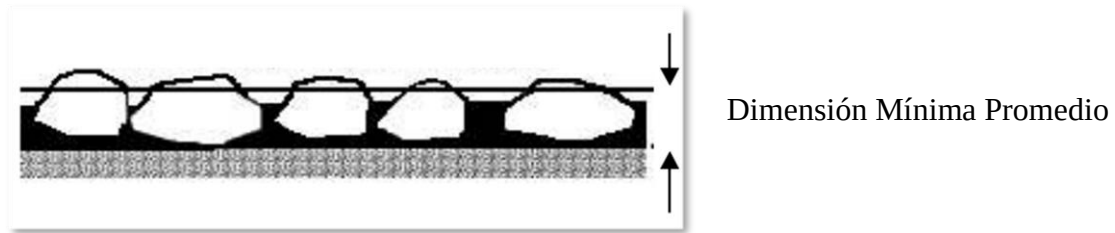
El Ing. McLeod después de varias experiencias llegó a la conclusión de que el porcentaje de vacíos del agregado suelto, establecido como el 50 % por el método de Hanson, en la realidad excepcionalmente se cumple, a su vez muy ocasionalmente este porcentaje es menor a 40 %.

La hipótesis de Hanson de que el tráfico pesado y las condiciones de clima reducen este porcentaje al 20 %, en la realidad no ocurre. Si consideramos que el porcentaje de vacíos del agregado suelto es del 40 %, el porcentaje de vacíos del tratamiento simple después de la apertura al tráfico será igual a:

$$a = \frac{40}{50} * 20 = 16\%$$

Por lo tanto, utilizando la hipótesis de Hanson se tendrá un exceso en la cantidad de asfalto, especialmente si se utiliza agregado graduado. Por esta razón es necesario introducir una corrección a la fracción de vacíos.

Figura 2.9. Dimensión mínima promedio del agregado



Fuente: Seguimiento de un doble tratamiento superficial para camino de alto tránsito.
Queirolo, 2009.

Dosificación de agregado pétreo

Según (Zane L. Webb, 2010) el Método de McLeod, la dosificación del agregado pétreo viene dada por la ecuación 2.1.

$$C = M * (1 - 0,4V) * H * D_{RS} * E \quad (\text{Ec. 2.1.})$$

Donde:

C= Dosificación de agregado pétreo (kg/m²).

M= Factor de evaluación relacionado al clima, tránsito (und).

V= Espacios vacíos entre el agregado suelto (decimal), Ec. 2.2.

H= Dimensión mínima promedio (mm), Ec. 2.3.

D_{RS}= Densidad real seca del agregado (kg/m³).

E= Factor de desperdicio (und), Tabla 2.11.

(M) Factor de evaluación: Factor de corrección que debe ser evaluado por la experiencia del diseñador en base al clima y tránsito. Su valor normal es 1,0, sin embargo, el Asphalt Institute propone modificarlo según experiencia local. Un valor de 0,9 ha dado buenos resultados en el país. No obstante, lo anterior, se podrá utilizar factores de ajuste intermedios entre 0,9 y 1,0.

(V) Espacios vacíos entre el agregado suelto: Los huecos entre el agregado suelto se aproximan a los espacios vacíos presentes cuando las piedras caen de la gravilladora al pavimento. Generalmente, este valor estará cerca del 50% del volumen total de la capa de tratamiento. Después del paso inicial de los rodillos, se supone que los vacíos se reducen al 30% y alcanzarán un mínimo de aproximadamente el 20% después de que el tráfico

haya orientado las piedras en su lado más plano. Sin embargo, si hay muy poco tráfico, los vacíos permanecerán en un 30% y el tratamiento requerirá más ligante para asegurar una buena retención de agregado. El porcentaje de los espacios vacíos entre el agregado expresado como un decimal, se determinan a partir de la ecuación 2.2.

$$V = 1 - \frac{D_{AS}}{D_{RS}} \quad (\text{Ec. 2.2.})$$

Donde:

V= Espacios vacíos entre el agregado suelto (decimal).

D_{AS} = Densidad aparente suelta del agregado (kg/m^3).

D_{RS} = Densidad real seca del agregado (kg/m^3).

(H) Dimensión mínima promedio: Representa el espesor esperado de la capa del tratamiento, en las rutas las ruedas donde el tráfico obliga a las partículas de agregado a descansar en su lado más plano y elongado, es decir con su menor dimensión en vertical, por ello el término dimensión mínima promedio, resulta ser el promedio de las dimensiones más pequeñas de las partículas de agregado. Se determina a partir del tamaño medio de la partícula y el índice de lajas (índice de aplanamiento), mediante la ecuación 2.3.

$$H = \frac{TM}{1,09 + (0,0118 * IL)} \quad (\text{Ec. 2.3.})$$

Donde:

H= Dimensión mínima promedio (mm).

TM= Tamaño medio de la partícula (mm), es representado por la abertura del tamiz por donde pasaría el 50% del material.

IL= Índice de lajas (%).

(E) Factor de desperdicio: Este factor es una corrección para tomar en cuenta las pérdidas de agregados que se producen durante la construcción. Depende del tipo y estado del equipo mecánico utilizado y los procedimientos usados. A falta de un valor de registro histórico, se puede usar los valores mostrados en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Factor de desperdicio “E”

H (mm)	Desperdicio (%)	Factor de desperdicio "E"
< 6,5	5	1,05
6,5 - 8,0	4	1,04
8,1 - 9,5	3	1,03
> 9,5	2	1,02

Fuente: Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

Con respecto a la **ecuación de dosificación del agregado pétreo** (Ec. 2.1); el término “V” representa los espacios vacíos que existen entre el agregado suelto, este espacio corresponde ser llenado por el ligante asfáltico, pero no se llena en su totalidad, pues si esto sucede, durante la circulación del tráfico las partículas de agregado se reacomodarán ocupando mayor espacio y desplazando el ligante, generando exudaciones. Por ello se considera que el 40% del volumen de vacíos que existe entre el agregado, debería ser llenado por ligante asfáltico.

Por ende, el término “1-0,4V”, representa el porcentaje de espacio correspondiente a ser llenado por el agregado pétreo.

Al multiplicar la dimensión mínima promedio “H” (espesor de capa), por la densidad real seca del agregado “DRS”, se obtiene el peso de material suelto que puede ser distribuido en 1m² de superficie. Y al multiplicar este valor por el porcentaje de espacio correspondiente a ser llenado por el agregado pétreo “1-0,4V”, se obtiene la dosificación del material granular. Los factores “M” y “E”, son valores que ajustan esta dosificación a las condiciones ambientales y de desperdicio respectivamente.

Dosificación de ligante asfáltico

Según (Zane L. Webb, 2010) el Método de McLeod, la dosificación del ligante asfáltico viene dada por la ecuación 2.4.

$$D = \frac{K * (0,4 * V * H * T + S + A)}{R} \quad (\text{Ec. 2.4.})$$

Donde:

D= Dosificación de ligante asfáltico (l/m²).

K= Factor de evaluación relacionado al clima (und).

V= Espacios vacíos existentes entre el agregado suelto (decimal).

H= Dimensión mínima promedio (mm), espesor esperado de la capa de tratamiento.

T= Factor de tránsito (und), Tabla 2.12.

S= Corrección por textura superficial (l/m^2).

A= Corrección por absorción del agregado (l/m^2).

R= Residuo asfáltico del ligante (decimal).

(K) Factor de evaluación: Factor de corrección que debe ser evaluado en base al clima por la experiencia del diseñador. Su valor normal es 1,0, pero puede ser mayor o menor según el diseñador. En climas tropicales se ha aplicado 0,9 mientras que en climas muy fríos se usa 1,2. Se podrá utilizar valores intermedios entre los valores indicados, dependiendo del clima de la región donde se ejecute la obra.

(T) Factor del tránsito: El volumen del tráfico en términos de vehículos por día es necesario en la determinación de la cantidad de ligante asfáltico necesario para incrustar suficientemente el agregado pétreo.

Por lo general, cuanto mayor es el volumen de tráfico, menor es la tasa de aplicación del ligante. A primera vista, esto puede no parecer correcto. Sin embargo, el tráfico obliga a las partículas de agregado a descansar en su lado más plano y a mejorar su acomodamiento, reduciendo los espacios vacíos. Si una carretera no tiene tráfico, las partículas tendrían la misma orientación que cuando se enrollaron por primera vez durante la construcción. Como resultado, los granos se mantendrían más altos y necesitarían más ligante asfáltico para completar los espacios.

Con suficiente tráfico, las partículas de agregado quedarán lo más planas posible, lo que hará que la capa de tratamiento sea lo más delgada posible. Si esto no se tiene en cuenta, es probable se generen exudaciones. La metodología emplea la Tabla 2.12. para estimar el factor de tránsito, basada en la cantidad de vehículos por día que circularán en la carretera.

Tabla 2.12. Factor de tránsito “T”

Volumen de tránsito Vehículo/día	Factor "T"
< 100	0,85
100 - 500	0,75
500 - 1000	0,70
1000 - 2000	0,65
> 2000	0,60

Fuente: Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

(S) Corrección por textura superficial: Este parámetro toma en cuenta la cantidad de ligante asfáltico que es absorbida por la superficie de la base o pavimento asfáltico. Normalmente, en tratamientos superficiales sobre bases imprimadas no se realiza esta corrección o su magnitud no supera los 0,2 l/m². La definición de la textura superficial es subjetiva, y no existen ensayos que permitan medir la corrección necesaria.

Tabla 2.13. Factor de corrección por textura superficial “S”

Textura superficial	Factor de corrección "S" (L/m ²)
Pavimento asfáltico con exceso de asfalto superficial	Hasta - 0,3
Pavimento asfáltico de textura cerrada	0,0
Pavimento asfáltico de textura abierta:	
1	0,1
2	0,2
3	0,3
4	0,4
5	0,5
Base granular imprimada	0,0 - 0,2

Fuente: Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

(A): Corrección por absorción del agregado: Este factor compensa la disminución en la dosis de ligante que provoca la absorción del agregado. Por las características de los materiales utilizados en nuestro país, normalmente este factor se desprecia para la mayoría de los agregados. Para agregados absorbentes, como piedras volcánicas u otros, se recomienda utilizar algún procedimiento de pretratamiento, como la precobertura con asfalto, en vez de aplicar factores de corrección.

(R) Residuo asfáltico: Es el porcentaje de asfalto residual, para asfaltos convencionales según Seal Coat and Surface Treatment Manual es igual a R = 1.

Dosificaciones de ligante a priori, total y reales

En tratamientos superficiales múltiples, las dosis de ligante cumplen funciones de adherencia y empaquetamiento, por ejemplo:

En un TST la dosificación del primer riego de ligante debe empaquetar el agregado de la primera capa y adherirlo al pavimento. El segundo riego debe empaquetar el agregado de la segunda capa y adherirlo a la primera y a la tercera capa, lógicamente este riego necesita una mayor dosificación. Mientras que, el tercer riego debe empaquetar el agregado de la tercera capa y adherirlo a la segunda capa. Es por ello que las dosificaciones de ligante se redistribuyen a partir de proporciones de una dosificación total.

Las dosificaciones a priori se determinan en base a la ecuación de dosificación de ligante del método que se emplee, luego estas dosis se acumulan, generando una dosificación total, la cual se redistribuye en proporciones para cada capa, determinando así las dosificaciones reales. Las proporciones para TSD y TST se presentan en las Tablas 2.14. y 2.15. respectivamente.

Tabla 2.14. Distribución de la dosis total de ligante para un TSD

Capa	Dosificación a priori L/m ²	Dosificación total L/m ²	Dosificación real L/m ²
1ra	A	A+B=DT	40% - 45% DT
2da	B		55% - 60% DT

Fuente: Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

Tabla 2.15. Distribución de la dosis total de ligante para un TST

Capa	Dosificación a priori L/m ²	Dosificación total L/m ²	Dosificación real L/m ²
1ra	A	A+B+C=DT	30% DT
2da	B		40% DT
3ra	C		30% DT

Fuente: Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

Cabe recalcar que las dosificaciones de agregado pétreo no se distribuyen en porcentajes de una dosificación total para cada capa, puesto que, el agregado pétreo no cumple funciones de adherencia y empaquetamiento, más bien es parte del relleno que conforma las capas de tratamiento superficial.

Con respecto a la **ecuación de dosificación del ligante (Ec. 2.4)**, el valor de la dimensión mínima promedio “H”, que representa el espesor de la capa del tratamiento, también representa un volumen por superficie de 1m², puesto que, si se analiza para un área de 1m²=

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \text{área (m}^2\text{)} * \text{espesor (m)}$$

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = 1\text{m}^2 * \text{espesor (m)}$$

$$\text{Volumen (m}^3\text{/m}^2\text{)} = \text{espesor (m/m}^2\text{)} = H$$

Si se multiplica el volumen por m² de superficie de capa de tratamiento “H”, con el porcentaje de espacio correspondiente a ser llenado por ligante asfáltico “0,4V”, se obtendrá el volumen de ligante asfáltico por m² de superficie a aplicar, que es la dosificación del ligante. Sin embargo, esta dosificación debe ser dividida entre el residuo asfáltico “R”, puesto que, el resto de los componentes del aglutinante se evaporan y el residuo asfáltico es el material que se encarga de empaquetar el agregado pétreo.

Los factores T, S, A y K son correcciones que modifican dicha dosificación con respecto a las condiciones de tránsito, superficie, absorción y clima respectivamente.

Procedimiento

Los pasos a seguir para el diseño de un tratamiento superficial bituminoso múltiple, de acuerdo al Método de Dimensión Mínima Promedio son:

Paso A. Determinación de características del ligante asfáltico y agregado pétreo

Se determinan las características a continuación citadas del ligante asfáltico y del agregado pétreo, destinados a emplearse en cada capa del tratamiento superficial, puesto que, los valores representativos de dichas cualidades son empleados en las fórmulas de la metodología.

Características del ligante asfáltico:

- Residuo asfáltico.

Características del agregado pétreo:

- Análisis granulométrico.
- Densidad real seca del agregado.

- Densidad aparente suelta del agregado.
- Índice de lajas (índice de aplanamiento).

Antes de la aplicación del método de diseño, es necesario que el asfalto y el agregado pétreo cumpla con los requerimientos establecidos por las normativas locales. En el caso de Bolivia, los requisitos para tratamientos superficiales son establecidos por el Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC, Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC, elaborado por la administración boliviana de carreteras.

Paso B. Determinar dosificaciones de ligante asfáltico y agregado pétreo.

Se procede a aplicar la Ec. 2.1. para determinar la dosificación del agregado pétreo. Es necesario recordar que se debe determinar una dosificación de agregado pétreo por cada capa de tratamiento superficial.

Paralelamente, se aplica la Ec. 2.4. determinando las dosificaciones a priori del ligante para cada capa. Estas dosificaciones son acumuladas para determinar una dosificación total y posteriormente, se determinan las dosificaciones reales para cada capa del tratamiento.

- Método de Kearby modificado

Para realizar el diseño del tratamiento superficial deben seguir los siguientes pasos:

La dosis del agregado se determina mediante la fórmula:

$$Q = K \quad ; \quad S = \frac{W}{K}$$

Donde:

Q = Dosis del agregado en (kg/ m²).

K = Cantidad de agregado obtenida de la prueba de tablero (kg/ m²).

S = Dosis del agregado en m² de superficie / m³ de agregado.

W = Peso unitario suelto del agregado (kg/ m³).

El método de Kearby modificado requiere de realizar primeramente la prueba de tablero que consiste en medir la cantidad de agregado necesario para cubrir un área determinada del material que se va a emplear en la fabricación de la muestra de estudio.

La dosis de ligante se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$L = E * V * T + S$$

Donde:

L = Dosis de aplicación de asfalto (L/m²).

E = Altura de agregado recubierto por ligante (mm).

$$L = d * e$$

d = Espesor promedio de capa de agregado (mm).

$$d = 1000 * \frac{K}{W}$$

e = % de recubrimiento del agregado (mm).

K = Cantidad de agregado obtenida de la prueba de tablero (kg/ m²).

W = Peso unitario suelto del agregado (kg/ m³).

V = Vacío del agregado condición suelta expresado en forma decimal.

T = Factor de tránsito, mostrado en el cuadro de la Tabla 2.12.

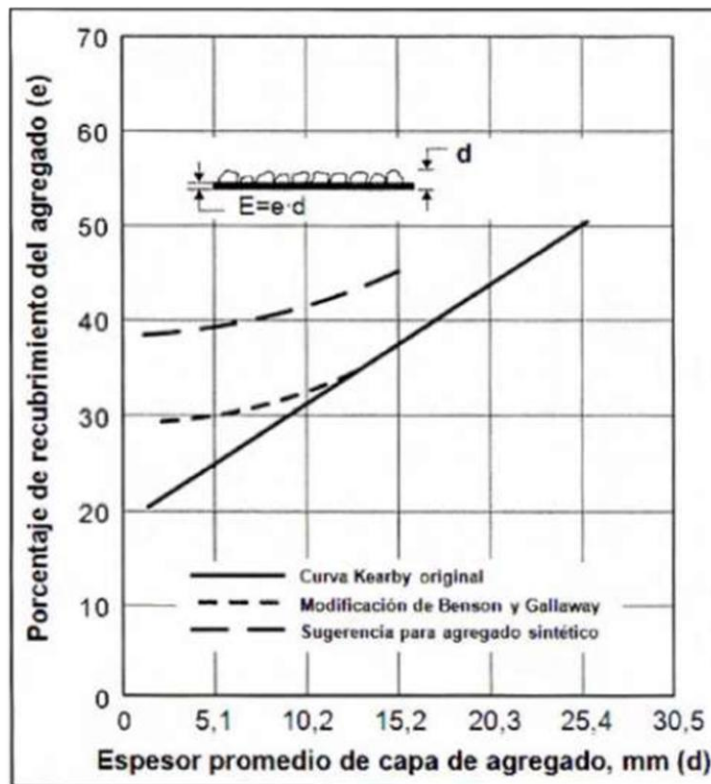
S= Factor de corrección por textura superficial (L/m²). Tabla 2.13.

En el caso que se utilicen emulsiones asfálticas, es necesario realizar la siguiente corrección:

$$L_{\text{emulsión}} = L + K * \left(\frac{L}{\% \text{ Asfalto residual}} - L \right)$$

K = factor de corrección por estación climática. 0,40 en verano y 0, 90 en invierno. Además, que debe realizarse una corrección por temperatura de aplicación, ya que el método parte de una temperatura estándar de 60 °C.

Figura 2.10. Relación entre porcentaje de recubrimiento y el espesor promedio de capa



Fuente: NCHRP, 2011 Modificado por la Autora, 2012.

2.10.3.1. Determinación de la metodología a emplear

En la Tabla 2.16. se presentan los parámetros que intervienen en cada una de las metodologías para el diseño de tratamientos superficiales múltiples.

Como se aprecia en la Tabla 2.16. la metodología de McLeod (Dimensión Mínima Promedio) requiere de una cantidad mayor de factores para la determinación de las dosificaciones. Esto implica que el método incluya más variables que buscan representar las condiciones que afectan a las tasas de aplicación de los materiales. Además, es el método recomendado por el Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC. Por ello, se decide aplicar el Método de McLeod (Dimensión Mínima Promedio) para el diseño de las dosificaciones de agregado y ligante asfáltico.

Tabla 2.16. Parámetros de diseño aplicadas en metodologías de diseño de TSB

Parámetros de diseño	Metodologías de diseño	
	McLeod (DMP)	Kearby Modificado
Tamaño del agregado	x	x
Dimensión mínima promedio	x	
Vacíos existentes entre el agregado	x	x
Índice de lajas	x	
Peso seco del agregado suelto		x
Gravedad específica bulk del agregado		x
Densidad aparente suelta del agregado	x	
Densidad real seca del agregado	x	
Densidad neta del agregado		
Condición de la superficie existente	x	x
Volumen de tráfico	x	x
Absorción del agregado	x	
Condiciones climatológicas	x	
Desperdicios	x	
Contenido de asfalto residual	x	x
Empotramiento del agregado		x

Fuente: Estudio comparativo de metodologías de diseño de TSB.

2.11. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA PARA UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL

Lo que se plantea realizar es evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial constituido con asfalto modificado con polvo de neumático, la evaluación se realiza mediante el aparato de Marshall para la estabilidad y fluencia, si bien este método solo es aplicable a mezclas asfálticas, se podría adaptar para un tratamiento superficial en el cual se puede evaluar la estabilidad y fluencia; se realiza una comparación de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial con asfalto convencional con el asfalto modificado con polvo de neumático.

Para la dosificación de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial se van a utilizar los moldes de Marshall donde se va a desarrollar el proceso de ejecución de las briquetas de tratamiento doble que tiene un espesor aproximado de 25 mm, por lo tanto, este proceso es aplicable ya que dichos moldes tienen una altura de 80 mm y un diámetro interior de

101,6 $\pm$ 0,1 mm. según lo especificado en la Norma AASHTO T 245-97, para la dosificación del agregado y el ligante se realizará en base al MÉTODO DE DISEÑO DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES A0705 descrito en el Manual de carreteras volumen IV de asfalto elaborado por la Administración Boliviana de Carreteras donde se debe realizar la caracterización de ambos materiales, tanto como el agregado y el ligante que se va a utilizar.

La mezcla asfáltica para un tratamiento superficial ya que no es tan pesada y se considera para tráfico ligero (bajo) para ser compactada se define con una energía de 50 golpes por cara para obtener la compactación adecuada de las briquetas.

- Estabilidad:

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

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

- Fluencia:

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

Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tráfico.

Figura 2.11. Aparato de Marshall para determinar la estabilidad y fluencia



Fuente: Elaboración propia.

2.12. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE

Para evaluar el desempeño del tratamiento superficial se realiza el ensayo de Vialit que se describe a continuación:

- Ensayo de Vialit

Este ensayo se llevó a cabo con el fin de evaluar la adherencia entre el agregado y los dos tipos de asfaltos analizados. El procedimiento empleado en este ensayo está conforme a los lineamientos establecidos por el Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC. El procedimiento se aplica fundamentalmente a los materiales empleados en tratamientos superficiales.

Preparación de las muestras

Para evaluar la adherencia de los agregados utilizados en el tratamiento superficial, se crearon especímenes para cada capa.

Según su granulometría de los agregados, se tamizan para obtener las fracciones de ensayo; Tamices 4/6,3 mm; 6,3/9,5 mm y 9,5/14 mm.

De cada fracción por ensayar se elige grupos de 100 partículas de agregado, se reserva en un recipiente hasta el ensayo.

Se puede utilizar cualquier tipo de ligante que sea apropiado para los tratamientos superficiales con riego, como el cemento asfáltico, emulsiones y eventualmente otros materiales asfálticos. En la Tabla 2.17. se indican los aportes de ligante en función del tamaño del agregado.

Tabla 2.17. Cantidad de ligante (kg/m²)

Tipo de Ligante	Agregado o Tamaño (mm)		
	4/6,3	6,3/9,5	9,5/14
Cemento Asfáltico	1,0	1,1	1,3
Alquitranes	1,0	1,2	1,6
Asfaltos Liquidos	1,0	1,1	1,3
Asfaltos Fluxados	1,0	1,1	1,2
Emulsiones Asfálticos	0,8	1,0	1,2

Fuente: Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

Preparación de las placas de ensayo

El cálculo de la cantidad de agregado se realizó pesando 100 partículas para cada una de las capas y el cemento asfáltico para cada capa se llevó a cabo relacionando la dosificación proporcionada por la Tabla 2.17. con el área de la bandeja metálica.

Área de la bandeja metálica utilizada:

Sus dimensiones son $a = 18 \text{ cm}$ $b = 28 \text{ cm}$, dando una superficie de $A = 504,00 \text{ cm}^2$.

Realización del ensayo

El ensayo se realiza normalmente a una temperatura ambiente no inferior a 10° C, dejando las bandejas en estas condiciones antes de ensayarlas durante un mínimo de media hora.

Se nivela el dispositivo para el ensayo y se coloca la bandeja en posición invertida, con los agregados hacia abajo, apoyada sobre las puntas de soporte.

El ensayo consiste en dejar caer la bola libremente, soltándola desde la canaleta inclinada hasta que golpea en el centro de la bandeja. La caída se repite tres veces en menos de 10 segundos.

Figura 2.12. Ensayo del Vialit



Fuente: Elaboración propia.

El cálculo del porcentaje de pérdida de agregado será mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de adhesividad} = \frac{P_{\text{maev}} - P_{\text{mdev}}}{P_{\text{ag}}} * 100$$

Donde:

P_{maev} = Peso de la muestra antes del ensayo de Vialit.

P_{mdev} = Peso de la muestra después del ensayo de Vialit.

P_{ag} = Peso del agregado colocado inicialmente.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE LA PRÁCTICA

3.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolla en el departamento de Tarija que se encuentra ubicado al sur de Bolivia, limita al Norte con el departamento de Chuquisaca, al sur con la República de Argentina, al este con la República del Paraguay y al oeste con los departamentos de Chuquisaca y Potosí.

La Provincia de Cercado, se sitúa al Centro-Oeste del Departamento de Tarija, Tarija se encuentra en las coordenadas $21^{\circ}30'45,60''\text{S}$ y $64^{\circ}43'45,85''\text{O}$, tiene una extensión de 2074 Km^2 .

Figura 3.1. Ubicación del área de proyecto “Tarija”



Fuente: Google Earth.

Se realiza en los Laboratorios de Asfalto, Hormigón y Suelos de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” de la Facultad de Ciencias y Tecnología, la caracterización de los materiales se limitará a realizar los ensayos de acuerdo a los equipos disponibles en los laboratorios de la universidad.

En este capítulo se desarrolla la etapa experimental de la investigación, el cual se lleva a cabo en dos etapas. La primera corresponde a la selección y caracterización de los materiales que se utilizan en la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial, la segunda corresponde a la dosificación del tratamiento para realizar las briquetas de tratamiento doble, el cual se evalúa mediante el aparato de Marshall (para evaluar el comportamiento de la estabilidad y fluencia) y el ensayo de Vialit (para evaluar el desempeño del tratamiento superficial). Se realiza la dosificación del ligante utilizando el asfalto convencional 85-100 y el asfalto modificado con polvo de neumático, con el fin de mejorar el comportamiento que tiene durante su vida útil.

Se busca realizar la comparación de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial constituido con asfalto convencional 85-100 y el asfalto modificado con polvo de neumático, evaluando el comportamiento de la estabilidad y fluencia mediante el aparato de Marshall y el desempeño de la adherencia entre los agregados pétreos y los asfaltos, mediante el ensayo de Vialit; demostrando que si se usa el asfalto modificado con polvo de neumático en las briquetas de tratamiento doble, éste mejora considerablemente sus propiedades, convirtiéndose en una nueva alternativa de mantenimiento para vías otorgando más beneficios que lo tradicional en cuanto a durabilidad y resistencia ante los factores climáticos y a la acción del tráfico.

3.2. UBICACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales que se usarán en la investigación para realizar los ensayos de caracterización deben cumplir con las especificaciones de las normas AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials.) y ASTM (American Society for Testing and Materials.) descritas en el Manual de carreteras volumen IV de hormigones, Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC y manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Para la presente investigación se hará uso de materiales existentes en nuestro medio, los mismos que se ajustan dentro de las normativas vigentes.

3.2.1. Agregados pétreos

Los agregados pétreos a utilizarse en la presente investigación, fueron provenientes de las infraestructuras de la alcaldía municipal de Tarija, provenientes de la Chancadora Garzón que extrae el material de la localidad de San Mateo en donde se encuentra dicha chancadora a la orilla del río Sella, estos materiales de agregados fueron obtenidos mediante una solicitud dirigida al gerente de esta entidad, siguiendo una serie de pasos para lograr la obtención del mismo. Se solicitó la provisión de los agregados pétreos de la grava $\frac{3}{4}$ " y gravilla $\frac{3}{8}$ ".

La presencia de elementos ajenos al agregado, como la suciedad, el polvo o las partículas orgánicas influyen negativamente en la adhesividad, lo que manifiesta una pérdida prematura de agregado; estos deben tener la suficiente resistencia para soportar las cargas durante la construcción y en las condiciones de servicio, no se recomienda el uso de agregados de forma redonda por que poseen una menor fricción interna y requieren mayor tasa de ligante y plana por que presentan baja resistencia a la fragmentación.

Figura 3.2. Acopio de agregados en la alcaldía de Tarija



Fuente: Elaboración propia.

Los agregados pétreos obtenidos deben cumplir con los requisitos de gradación descritos en el Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC que se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Requisitos de gradación de agregados para tratamientos superficiales bituminosos

Tamiz	Porcentaje, en peso, que pasa por los tamices de malla cuadrada-método AASHTO T-27					
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D	Gradación E	Gradación F
1 1/2"	100	-	-	-	-	-
1"	90 - 100	100	-	-	-	-
3/4"	20 - 55	90 - 100	100	-	-	-
1/2"	0 - 10	20 - 55	90 - 100	100	-	-
3/8"	0 - 5	0 - 15	40 - 70	85 - 100	100	100
Nº. 4	-	0 - 5	0 - 15	10 - 30	85 - 100	85 - 100
Nº. 8	-	-	0 - 5	0 - 10	10 - 4	60 - 100
Nº. 100	-	-	-	-	-	0 - 10

Fuente: Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC.

3.2.2. Asfalto convencional 85-100

El asfalto convencional 85-100 a utilizarse en la presente investigación es de la marca REPSOL de procedencia peruana, proporcionado por la alcaldía municipal de Tarija.

Es un material asfáltico de uso vial. Es una combinación de compuestos orgánicos e hidrocarburos de alto peso molecular ($>C\ 25$), con cierto contenido de metales como Hierro, Níquel y Vanado, así como presencia de Azufre, Oxígeno y Nitrógeno. Se obtienen a partir de un proceso de desasfaltización por Propano a partir del Destilado Pesado de Petróleo.

Figura 3.3. Ubicación de la planta de asfalto de la alcaldía de Tarija



Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Polvo de neumático reciclado de llantas

INGOQUI, es una empresa boliviana, que se encuentra en el camino antiguo a Oruro Km 19 (Vinto), Cochabamba-Bolivia, dedicada a la reutilización de caucho proveniente de los neumáticos desechados, esta empresa recicla más de 150 neumáticos al día, su principal producción es de trapeadores y alfombrillas hechos con este material, esta empresa está facilitando el “polvo de neumático reciclado de llantas” que será utilizado en este proyecto de investigación.

Figura 3.4. Polvo de neumático producido por Ingoqui



Fuente: Ingoqui.

3.3. RELEVAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Los materiales serán del tipo y clase que cumplan las exigencias de las siguientes especificaciones:

3.3.1. Agregados pétreos

Los agregados pétreos para tratamientos superficiales serán partículas provenientes de la trituración de grava o piedra de buena calidad.

Se realizaron los siguientes ensayos de caracterización en base al Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC, Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

Tabla 3.2. Ensayos de caracterización de los agregados pétreos

Ensayos	Método	Limites
Granulometría	(AASHTO T-27); (ASTM C-136)	-
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	(AASHTO T-85); (ASTM C-127)	-
Peso unitario de los agregados	(AASHTO T-19); (ASTM C-29)	-
Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados	NTL-354	30% max
Desgaste por medio de la máquina de los Ángeles	(AASHTO T-96); (ASTM C-131)	40% max
Porcentaje de caras fracturadas de los agregados	(ASTM D-5821); (NTL-358)	75% min
Durabilidad por el método de los sulfatos para determinar la desintegración	(AASHTO T-104); (ASTM C-88)	12% max

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Ligante asfáltico

Se utiliza como ligante el asfalto convencional 85-100 y el asfalto modificado con polvo de neumático.

Se realizaron los siguientes ensayos de caracterización en base al Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC, Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

- Asfalto convencional 85-100

La principal diferencia entre ambos asfaltos es que en nuestro país no se realizan los mismos ensayos de caracterización ya que para el asfalto convencional se ejecutan una serie de ensayos entre los cuales los más importantes y necesarios son los siguientes:

Tabla 3.3. Ensayos de caracterización del asfalto convencional 85-100

Ensayos	Método	Limites
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg.	(AASHTO T49-97); (ASTM D-5)	85-100
Punto de inflamación	(AASHTO T79-96); (ASTM D1310-01)	232 min.
Punto de ablandamiento	(AASHTO T53-96); (ASTM D-36)	43 a 53
Ductilidad	(AASHTO T51-00); (ASTM D-113)	100 min.
Peso específico	(AASHTO T229-97); (ASTM D71-94)	1 a 1,05
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C	(AASHTO T201-01); (ASTM D-2170)	85 min.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5. Asfalto convencional 85-100



Fuente: Elaboración propia.

- Asfalto modificado con polvo de neumático

Para el asfalto modificado con polvo de neumático (polímero) lo que se recomienda realizar son dos ensayos principales:

Tabla 3.4. Ensayos de caracterización del asfalto convencional modificado

Ensayos	Método	Limites
Recuperación elástica	(AASHTO T301-99); (ASTM D6084-06)	≥ 10
Índice de penetración	(AASHTO UNE 104-281)	-

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6. Asfalto modificado con polvo de neumático



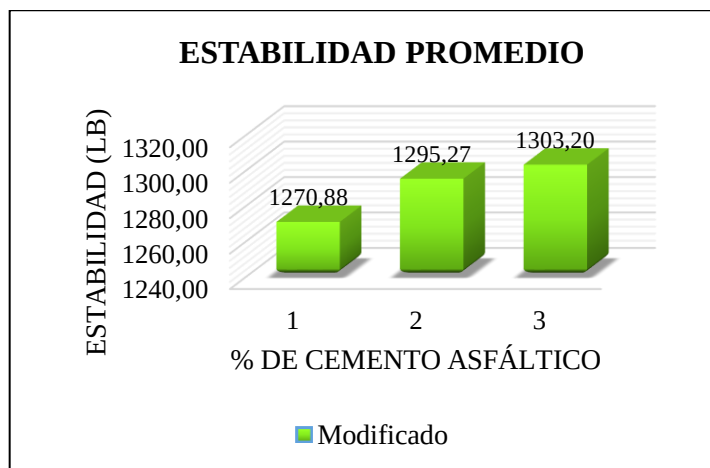
Fuente: Elaboración propia.

Se han realizado varios ensayos que han demostrado que el asfalto modificado con polvo de neumático cumple con las especificaciones ya establecidas. Descritos en el apartado de Anexo IV.

Justificación del porcentaje de incorporación del polvo de neumático en el asfalto

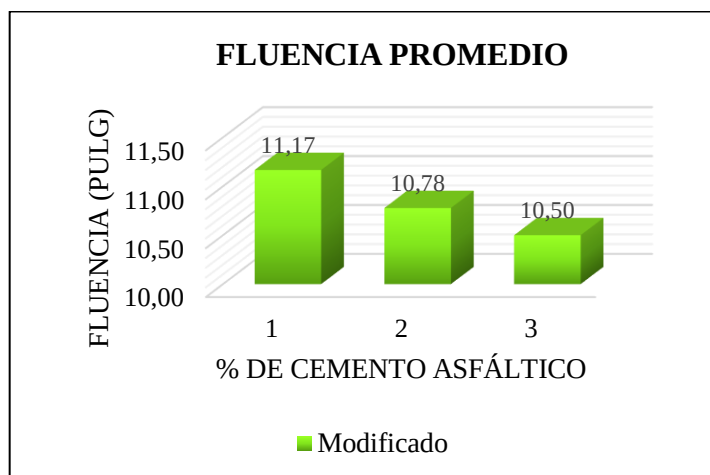
Se evalúa el comportamiento de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial con asfalto modificado con polvo de neumático al 8, 10 y 12%; tratándose de un betún mejorado con caucho (BM) según el Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas, se muestra a continuación los resultados para realizar un comparativo de sus principales propiedades en estabilidad y fluencia:

Figura 3.7. Diagrama comparativo de la estabilidad promedio a diferentes porcentajes de polvo de neumático



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.8. Diagrama comparativo de la fluencia promedio a diferentes porcentajes de polvo de neumático



Fuente: Elaboración propia.

Como criterio de partida el asfalto base debe ser más blando que el que se pretende obtener.

Por ser un país subdesarrollado los proyectos apuntan a un gasto menor, en el presente caso se propone usar el menor rango por vía húmeda de la Tabla 2.8. (8 – 12%) tratándose de un betún mejorado con caucho (BM); además que Bolivia carece experiencia respecto a este tema.

Mediante el diagrama comparativo de estabilidad y fluencia promediados a diferentes porcentajes de caucho se puede evidenciar una mejora en cuanto a la estabilidad y una reducción en cuanto a la fluencia a medida que el porcentaje de caucho incrementa.

Por ende, desde el punto de vista técnico - económico se opta por tomar el valor promedio de la Tabla 2.8. (8 – 12%) tratándose un de un betún mejorado con caucho (BM) donde el porcentaje de incorporación llegaría ser del 10%.

Se verificó que el asfalto modificado con polvo de neumático al 10% cumpla con las especificaciones para un Betún mejorado con caucho (BM).

3.3.3. Polvo de neumático reciclado de llantas

Combinado con el asfalto convencional es un material visco-elástico, ya que tiene ambas propiedades de un material viscoso como el aceite de motor y un material elástico como el caucho. Este depende de la temperatura y del tiempo de carga. El polvo de neumático es un polímero elastómero SBR (caucho estireno-butadieno), que combinado con el asfalto ofrece un mejor desempeño especialmente en términos de durabilidad, resistencia y sostenibilidad lo que lo convierte en una opción ideal para proyectos de pavimentación a largo plazo.

La caracterización del polvo de neumático reciclado de llantas se limitará a realizar los ensayos de acuerdo a los equipos disponibles en los laboratorios de la universidad.

Tabla 3.5. Ensayos de caracterización del polvo de neumático reciclado de llantas

Ensayos	Método	Límites
Granulometría	(AASHTO T-27); (ASTM C-136)	P1, P2 o P3
Peso unitario	(AASHTO T-19); (ASTM C-29)	0,35 - 0,5

Fuente: Elaboración propia.

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La caracterización de los materiales es una tarea importante que requiere los asfaltos y los agregados pétreos que deben cumplir con las especificaciones o parámetros establecidos en las normas mencionadas.

3.4.1. Caracterización de los agregados pétreos

La caracterización de los agregados se realiza para garantizar que el material seleccionado tenga las propiedades adecuadas para proporcionar una superficie resistente, duradera, segura y capaz de soportar las cargas y condiciones ambientales a las que estarán expuestas. El tamaño de los agregados se escogió en función de la gradación de las bandas granulométricas establecidas en el Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC.

3.4.1.1. Ensayo de granulometría (AASTHO T-27); (ASTM C-136)

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los agregados pétreos.

Es aplicable a los agregados que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas. Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de las especificaciones.

Resumen del método.-

Una muestra de agregado seco, de masa conocida, se separa a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente más pequeñas, con el fin de determinar la distribución de los tamaños de sus partículas.

Figura 3.9. Proceso de tamizado de los agregados pétreos



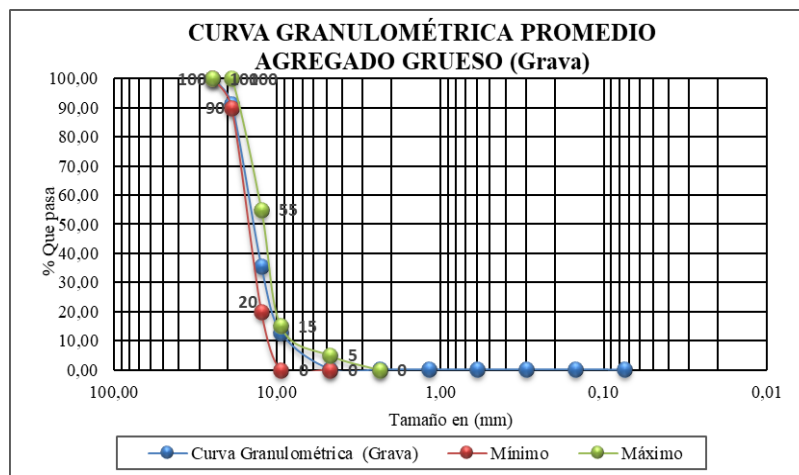
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6. Resultados de la granulometría de la grava - gradación "B"

Análisis granulométrico			
Tamices		Grava	Especificación
		3/4"	Gradación "B"
(pulg)	(mm)	% Pasa	
1"	25,00	100,00	100
3/4 "	19,00	91,19	90-100
1/2 "	12,50	35,50	20-55
3/8 "	9,50	12,84	0-15
Nº 4	4,75	0,26	0-5
Nº 8	2,36	0,16	-
Nº 16	1,18	0,16	-
Nº 30	0,60	0,15	-
Nº 50	0,30	0,15	-
Nº 100	0,15	0,14	-
Nº 200	0,075	0,09	-
Base	0,00	0,01	-

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.10. Curva granulométrica de la grava de gradación "B"



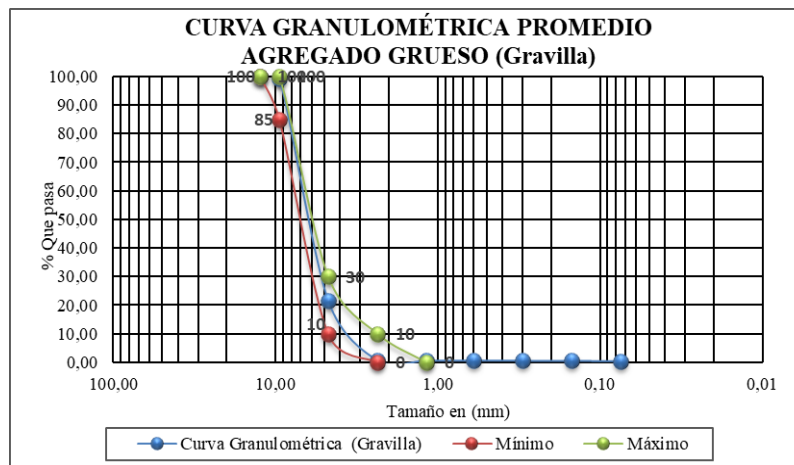
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7. Resultados de la granulometría de la gravilla - gradación "D"

Análisis granulométrico			
Tamices		Gravilla	Especificación
		3/8"	Gradación "D"
(pulg)	(mm)	% Pasa	
1/2 "	12,50	100,00	100
3/8 "	9,50	99,23	85-100
Nº 4	4,75	21,51	10-30
Nº 8	2,36	0,66	0-10
Nº 16	1,18	0,53	-
Nº 30	0,60	0,51	-
Nº 50	0,30	0,50	-
Nº 100	0,15	0,47	-
Nº 200	0,075	0,37	-
Base	0,00	0,04	-

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.11. Curva granulométrica de la gravilla de gradación "D"



Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2. Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (AASHTO T-85); (ASTM C-127)

Este ensayo establece los procedimientos para determinar el peso específico a “granel” y el peso específico aparente y la absorción de agua en agregados gruesos.

Es aplicable a los agregados gruesos que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Resumen del método.-

Se sumerge en agua una muestra de agregado durante un periodo de 24 horas, para llenar sus poros permeables. Una vez retiradas del agua, las partículas del agregado se secan superficialmente y se determina su masa. Posteriormente, se determina el volumen de muestra por el método de desplazamiento de agua. Finalmente, la muestra se seca al horno y se determina su masa seca. Usando los valores de masa obtenidos y las fórmulas incluidas en norma, es posible calcular el peso específico a granel, peso específico aparente y absorción del agregado.

Figura 3.12. Determinación de la masa superficialmente seca y sumergida



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8. Resultados del ensayo de peso específico de la grava

Grava 3/4 "				
Ensayos	1	2	3	Promedio
P.E. Granel (gr/cm ³)	2,593	2,595	2,595	2,59
P.E. S.S.S. (gr/cm ³)	2,625	2,627	2,624	2,63
P.E. Aparente (gr/cm ³)	2,677	2,680	2,673	2,68
% de Absorción	1,206	1,225	1,118	1,18

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9. Resultados del ensayo de peso específico de la gravilla

Gravilla 3/8 "				
Ensayos	1	2	3	Promedio
P.E. Granel (gr/cm ³)	2,611	2,610	2,606	2,61
P.E. S.S.S. (gr/cm ³)	2,653	2,651	2,650	2,65
P.E. Aparente (gr/cm ³)	2,724	2,723	2,727	2,72
% de Absorción	1,588	1,595	1,705	1,63

Fuente: Elaboración propia.

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

Este método establece los procedimientos para determinar el peso unitario de los agregados. Es aplicable a los agregados que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Resumen del método.-

Se usa una muestra representativa del agregado a la humedad ambiente. Por ningún motivo debe secarse dicha muestra en el horno.

a) Determinación de la densidad aparente suelta

- Procedimiento por simple vaciado.

Se aplicó a los agregados de tamaño máximo nominal igual o inferior que 100 mm.

Para medir el peso unitario con agregados sueltos se llena el recipiente por un procedimiento normalizado y se determina el peso de los agregados contenidos en un recipiente lleno.

b) Determinación de la densidad aparente compactada

- Procedimiento por apisonado.

Se aplica a agregados de tamaño nominal igual o menor que 50 mm (2").

Para medir el peso unitario compactado, se llena el recipiente en tres capas aproximadamente iguales, aplicando a cada capa el apisonado por varillado 25 veces.

Figura 3.13. Ensayo del peso unitario del agregado



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.10. Resultados del ensayo de peso unitario de los agregados

Agregados	Grava 3/4"		Gravilla 3/8"	
Descripción	Peso unitario suelto (gr/cm ³)	Peso unitario compactado (gr/cm ³)	Peso unitario suelto (gr/cm ³)	Peso unitario compactado (gr/cm ³)
	1,52	1,57	1,49	1,56
Promedio	1,54		1,52	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.4. Ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados (NTL 354)

Este método describe el procedimiento que debe seguirse, para la determinación de los índices de aplanamiento y de alargamiento, de los agregados que se van a emplear en la construcción de carreteras.

Las partículas planas y alargadas en las capas granulares y en las mezclas asfálticas, estas partículas son propensas a rotura y desintegración durante el proceso de compactación, modificando la granulometría del agregado y afectando adversamente su comportamiento. Este método no es aplicable a las fracciones de agregados con tamaño inferior a 6,3 mm (1/4").

Resumen del método.-

El ensayo de índice de aplanamiento consiste en dos operaciones sucesivas. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones. Luego, cada una de las fracciones se criba empleando para ello tamices de barras paralelas. Las partículas que pasen el tamiz son consideradas planas.

El ensayo de índice de alargamiento consiste en dos operaciones sucesivas. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones. Luego, cada fracción se analiza utilizando un calibrador de longitudes, el cual tiene barras verticales. Se considera que todas las partículas retenidas por las barras son alargadas.

Figura 3.14. Determinación de las partículas planas de los agregados



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.11. Resultados del ensayo de índice de aplanamiento de la grava

Nº de ensayo	Índice de aplanamiento (I _{li}) (%)	Promedio
1	20,62	20,55
2	20,25	
3	20,78	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de índice de aplanamiento de la gravilla

N° de ensayo	Índice de aplanamiento (Ili) (%)	Promedio
1	12,46	11,67
2	10,60	
3	11,93	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.15. Determinación de las partículas alargadas de los agregados



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.13. Resultados del ensayo de índice de alargamiento de la grava

N° de ensayo	Índice de alargamiento (Iai) (%)	Promedio
1	21,94	22,08
2	21,69	
3	22,63	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.14. Resultados del ensayo de índice de alargamiento de la gravilla

Nº de ensayo	Índice de aplanamiento (Iai) (%)	Promedio
1	12,93	12,25
2	11,49	
3	12,33	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.5. Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los Ángeles (ASTHO T-96); (ASTM C-131)

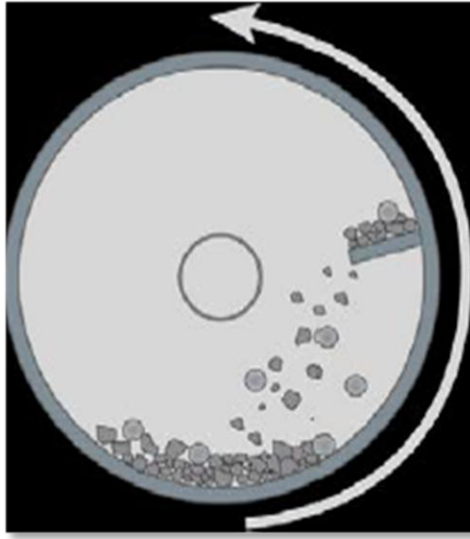
Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los agregados mayores a 2,5 mm, mediante la máquina de los Ángeles.

Este ensayo se ha usado ampliamente como un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas. Los resultados nos brindan automáticamente comparaciones validas entre fuentes marcadamente diferentes en origen, composición o estructura.

Resumen del método.-

Este ensayo mide la degradación de un agregado pétreo con una composición granulométrica definida, como resultado de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero rotatorio que contiene un número determinado de esferas metálicas, el cual depende de la granulometría de la muestra de ensayo. A medida que gira el tambor, una pestaña de acero recoge la muestra y las esferas de acero y las arrastra hasta que caen por gravedad en el extremo opuesto del tambor, creando un efecto de impacto y trituración. Entonces, la muestra y las esferas ruedan dentro del tambor, hasta que la pestaña las levanta y se repite el ciclo. Tras el número especificado de revoluciones, se retira el contenido del tambor y se tamiza la porción de agregado para medir la gradación, como un porcentaje de pérdida.

Figura 3.16. Degradación del agregado durante el ensayo



Fuente: Norma y especificaciones invias, 2012.

Figura 3.17. Proceso por desgaste por medio de la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.15. Resultados del desgaste por medio de la máquina de los ángeles

Nº de ensayo	Material	Desgaste (%)	Desgaste (%)
1	Grava	18,84	19,12
2		19,36	
3		19,15	
1	Gravilla	22,08	22,43
2		22,71	
3		22,48	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.6. Ensayo del porcentaje de caras fracturadas de los agregados (ASTM D-5821); (NTL-358)

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso, del material que presente una o más caras fracturadas de las muestras de agregados.

Uno de los propósitos de este requisito es maximizar la resistencia al corte, incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregados, ligadas o no. Otro propósito, es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y proporcionar mayor fricción y textura a los agregados usados en la construcción de capas de rodadura.

Resumen del método.-

Se seca la muestra hasta obtener una separación limpia de material fino y grueso por medio de tamizaje. Se lava la muestra retenida en la malla designada para determinar la cantidad de partículas fracturadas. Se inspecciona cuidadosamente cada partícula, para ver si cumplen con los criterios de partícula fracturada y se determina el porcentaje de la muestra que corresponde a partículas fracturadas.

Figura 3.18. Determinación de las partículas que presentan caras fracturadas



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.16. Resultados del ensayo de porcentaje de caras fracturadas de la grava

N° de ensayo	Partículas fracturadas (D) (%)	Promedio de partículas fracturadas (D) (%)
1	92,29	91,56
2	91,03	
3	91,35	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.7. Ensayo de durabilidad por el método de los sulfatos para determinar la desintegración (AASHTO T-104); (ASTM C-88)

Este método establece el procedimiento para determinar su resistencia a la desintegración de los agregados mediante soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

Brinda un procedimiento para hacer una valoración preliminar de la solidez de los agregados previstos para la elaboración de concretos y otros propósitos.

Los valores obtenidos se pueden comparar con los indicados en las especificaciones, con el fin de establecer la aptitud de un agregado para un determinado uso.

Resumen del método.-

Para determinar la desintegración de los agregados gruesos mediante soluciones de sulfato de sodio se deben de encontrar previamente lavados y graduados adecuadamente como lo exigen las especificaciones. Las muestras se deben de saturar entre un periodo de 17 ± 1 horas posteriormente se debe retirar la solución de la muestra con mucho cuidado evitando la pérdida de material para proceder el secado en el horno hasta que se seca a una masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C se debe de repetir cinco veces el ciclo de inmersión y secado para finalizar se debe lavar el material con agua hasta retirar por completo la solución del sulfato de sodio. Posterior al secado se lo volvió a zarandear por su respectivo tamiz de esta forma el material pasante es la pérdida o desgaste del agregado.

Figura 3.19. Proceso de saturación de los agregados



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.17. Resultados del ensayo de durabilidad por el método de sulfatos para determinar la desintegración de la grava

Granulometría			Pérdidas	
Tamiz N°	Tamiz pasa	Tamiz ret.	Pérdidas parciales (%)	Pérdidas corregidas (%)
1 "	1 "	3/4 "	0,88	0,08
3/4 "	3/4 "	1/2 "	0,73	0,41
1/2 "	1/2 "	3/8 "	2,42	0,55
3/8 "	3/8 "	N° 4	4,00	0,50
N° 4	N° 4	N° 8	4,70	0,00
% Total de pérdida				1,54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.18. Resultados del ensayo de durabilidad por el método de sulfatos para determinar la desintegración de la gravilla

Granulometría			Pérdidas	
Tamiz N°	Tamiz pasa	Tamiz ret.	Pérdidas parciales (%)	Pérdidas corregidas (%)
1/2 "	1/2 "	3/8 "	0,39	0,00
3/8 "	3/8 "	N° 4	1,27	0,98
N° 4	N° 4	N° 8	2,30	0,48
% Total de pérdida				1,46

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.8. Resumen de la caracterización de los agregados pétreos

A continuación, se presenta una planilla resumen de la caracterización de los agregados, según los ensayos realizados.

Tabla 3.19. Resumen de los ensayos de caracterización de los agregados pétreos

PROYECTO: “EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL DE BAJO TRÁFICO ADICIONANDO POLVO DE NEUMÁTICO ”				
TIPO DE AGREGADO PÉTREO :		Agregado "B" y "D"		
FECHA:		Junio de 2023		
LABORATORISTA:		Univ. Ruben Nelson Chambi Paco		
ENSAYO	UNIDAD	AGREGADO	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Peso específico de los agregados (AASHTO T-85)	gr/cm ³	Grava "B"	2,68	-
	gr/cm ³	Gravilla "D"	2,72	-
Peso unitario del los agregados (AASHTO T-19)	gr/cm ³	Grava "B"	1,54	-
	gr/cm ³	Gravilla "D"	1,52	-
Índice de aplanamiento de los agregados (NTL 354)	%	Grava "B"	20,55	30% max
		Gravilla "D"	11,67	30% max
Índice de alargamiento de los agregados (NTL 354)	%	Grava "B"	22,08	30% max
		Gravilla "D"	12,25	30% max
Desgaste por medio de la máquina de los Ángeles (AASHTO T-96)	%	Grava "B"	19,12	40% max
	%	Gravilla "D"	22,43	40% max
Porcentaje de caras fracturadas de los agregados (ASTM D-5821)	%	Grava "B"	91,56	75% min
Durabilidad de los agregados en solución de sulfatos (AASHTO T-104)	%	Grava "B"	1,54	12% max
		Gravilla "D"	1,46	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Caracterización del asfalto convencional 85-100

El asfalto convencional que se emplea tiene la siguiente información técnica:

Tabla 3.20. Características del asfalto convencional 85-100

Origen:	Peru
Marca:	Repsol
Producto:	Asfalto 85-100

Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos que se realizan para la caracterización están descritos en el Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

3.4.2.1. Ensayo de penetración (AASHTO T49-97); (ASTM D-5)

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

Cuando no se especifiquen las condiciones de ensayo, según norma se consideró la temperatura, carga y tiempo, en 25°C, 100 g y 5 s, respectivamente.

Resumen del método.-

Se derrite la muestra del producto bituminoso (si al inicio se encontraba a temperatura ambiente) y se deja enfriar de manera controlada. Posteriormente, empleando un penetrómetro con una aguja normalizada se penetra la muestra bajo unas condiciones especificadas.

Figura 3.20. Proceso para la determinación de la penetración



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.21. Datos y resultados del ensayo de penetración

Descripción		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Penetración a 25 °C, 100gr y 5seg AASHTO T49 - 97	Lectura N° 1	0,1 mm	98	91	95
	Lectura N° 2	0,1 mm	87	90	86
	Lectura N° 3	0,1 mm	93	87	89
	Promedio	0,1 mm	92,67	89,33	90,00
Penetración promedio		0,1 mm	90,67		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2. Ensayo de punto de inflamación (AASHTO T79-96); (ASTM D1310-01)

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

El punto de inflamación da una indicación de la posible presencia de sustancias altamente volátiles e inflamables en un producto relativamente no volátil o no inflamable. También sirve como prueba de seguridad en la operación de las plantas productoras de mezcla asfáltica en caliente.

Resumen del método.-

La copa del ensayo se llena con la muestra hasta un nivel especificado. Se aumenta la temperatura de la muestra, primero con rapidez y luego de manera constante y lenta, a medida que se aproxima al punto de inflamación. A intervalos de tiempo especificados, se pasa una pequeña llama de ensayo a través de la copa. La temperatura más baja a la cual la aplicación de la llama de ensayo hace que los vapores que se encuentran por encima de la superficie del asfalto desprenden una llamarada repentina, se toma como punto de inflamación.

Figura 3.21. Determinación de la temperatura de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.22. Datos y resultado del ensayo de punto de inflamación

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de inflamación AASHTO T79-96	°C	287	281	284
Inflamación promedio		284,00		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.3. Ensayo de punto de ablandamiento (AASHTO T53-96); (ASTM D-36)

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

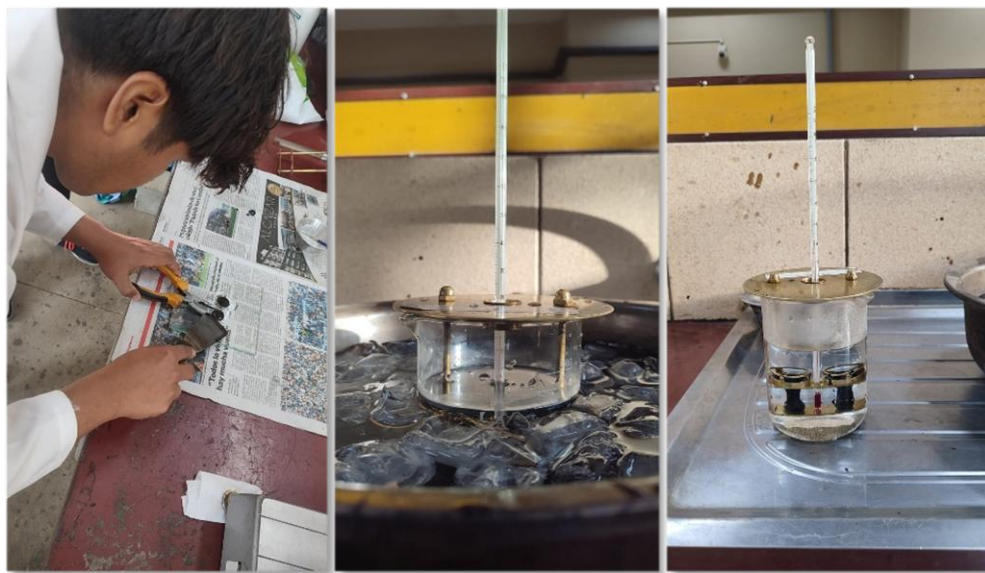
El punto de ablandamiento es útil en la clasificación de los productos bituminosos y es un buen indicador de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas durante su vida de servicio.

Resumen del método.-

Se tiene dos discos horizontales de material bituminoso, fundidos entre anillos, se calientan a una velocidad controlada en un baño líquido, mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento se considera como el valor de temperatura a la cual los discos se ablandan lo suficiente, para que cada bola envuelta en

material bituminoso caiga a la placa inferior. La variación de temperatura entre estas dos muestras debe ser menor a 1°C.

Figura 3.22. Proceso para la determinación del punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.23. Datos y resultado del ensayo de punto de ablandamiento

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de ablandamiento AASHTO T53-96	°C	47	48	45
Ablandamiento promedio		46,67		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.4. Ensayo de ductilidad (AASHTO T51-00); (ASTM D-113)

El ensayo brinda una medida de las propiedades a tensión de los materiales bituminosos y se usa para establecer si el producto que se ensaya cumple la especificación correspondiente.

Generalmente, se considera que un asfalto de baja ductilidad presentará pobres propiedades adhesivas y un deficiente comportamiento en servicio. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5$ °C y a una velocidad de 5 cm/min $\pm$ 5%.

Resumen del método.-

El ensayo consiste en someter una briqueta de material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones normalizadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua, definiéndose la ductilidad como la longitud máxima, en cm, que se estira la briqueta hasta el instante de su rotura.

Figura 3.23. Determinación de la longitud máxima



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.24. Datos y resultado del ensayo de ductilidad

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Ductilidad a 25°C AASHTO T51-00	cm	131	126	127
Ductilidad promedio		128,00		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.5. Ensayo de peso específico (AASHTO T229-97); (ASTM D71-94)

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

Los valores de densidad se usan para realizar conversiones de unidades de volumen a masa y para realizar correcciones en las medidas de volumen, cuando la temperatura de ejecución del ensayo difiere de la temperatura usada como referencia.

Resumen del método.-

Se coloca la muestra en un picnómetro calibrado. Se pesa el picnómetro con la muestra. El volumen remanente del picnómetro es completado con agua destilada. Luego se lleva a la temperatura del ensayo y se determina su masa. La densidad de la muestra se calcula a partir de la masa de la muestra y de la masa del agua destilada desalojada por la muestra en el picnómetro lleno.

Figura 3.24. Proceso para el pesaje del picnómetro más el asfalto



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.25. Datos y resultados del ensayo de peso específico

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso picnómetro	gr	34,9	35,7	33,6
Peso picnómetro + agua (25 °C)	gr	86,3	86,1	84,9
Peso picnómetro + muestra	gr	65,2	67,5	61,6
Peso picnómetro + agua + muestra	gr	87,1	86,7	85,4
Peso específico	gr/cm ³	1,024	1,016	1,015
Promedio	gr/cm ³	1,019		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.6. Ensayo de viscosidad (AASHTO T201-01); (ASTM D-2170)

Este método abarca los procedimientos para determinar la viscosidad cinemática de asfaltos líquidos a 60°C y del asfalto convencional a 135°C, en el rango de 30 a 100.000 cSt.

Resumen del método.-

Se mide el tiempo necesario para que un volumen fijo de líquido fluya, a través de un viscosímetro Saybolt, a una temperatura muy bien controlada. La viscosidad cinemática se calcula multiplicando el tiempo de flujo en segundos por el factor de calibración del viscosímetro.

Figura 3.25. Determinación del tiempo de flujo



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.26. Datos y resultado del ensayo de peso específico

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C AASHTO T201-01	seg	97	93	102
Viscosidad promedio		97,33		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.7. Resumen de la caracterización del asfalto convencional 85-100

El asfalto convencional cumple con los requisitos de especificación técnica de la AASHTO M-20, según lo requerido por el Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados:

Tabla 3.27. Resumen de los ensayos de caracterización del asfalto convencional 85-100

PROYECTO: “EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA PARA UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL DE BAJO TRÁFICO ADICIONANDO POLVO DE NEUMÁTICO ”							
TIPO DE ASFALTO CONVENCIONAL:		85-100					
FECHA:		Julio de 2023					
LABORATORISTA:		Univ. Ruben Nelson Chambi Paco					
ENSAYO	UNIDAD	MUESTRAS			RESULTADO	ESPECIFICACIONES	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg. (AASHTO T49-97)							
Lectura N°1	0,1 mm	98	91	95	90,67	85	100
Lectura N°2	0,1 mm	87	90	86			
Lectura N°3	0,1 mm	93	87	89			
Penetración Promedio	0,1 mm	92,67	89,33	90,00			
Punto de Inflamación (AASHTO T79-96)							
	°C	287	281	284	284	232	-
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)							
	°C	47	48	45	46,67	43	53
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)							
	cm	131	126	127	128	100	-
Peso Específico a 25°C (AASHTO T229-97)							
Peso picnómetro	gr	34,9	35,7	33,6	1,019	1	1,05
Peso picnómetro + Agua (25°C)	gr	86,3	86,1	84,9			
Peso picnómetro + Muestra	gr	65,2	67,5	61,6			
Peso picnómetro + Agua + Muestra	gr	87,1	86,7	85,4			
Peso Específico Promedio	gr/cm³	1,024	1,016	1,015			
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C (AASHTO T201-01)							
	Sf	97	93	102	97,33	85	-

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Caracterización del polvo de neumático

El polvo de neumático fue proporcionado por la empresa nacional INGOQUI, empresa en tratar los neumáticos fuera de uso; lo describe como un polvo fino libre de impurezas. Los ensayos que se realizan para la caracterización se limitan a los equipos disponibles en la UAJMS que se describen a continuación:

3.4.3.1. Granulometría (AASHTO T-27); (ASTM C-136)

Este material posee una banda granulométrica que entra en el tipo P-2, según el Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. La granulometría y banda utilizada se presenta a continuación:

Figura 3.26. Granulometría del polvo de neumático



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.28. Resultados de la granulometría - promedio

Análisis granulométrico - promedio			
Tamices		Promedio	P - 2
(pulg)	(mm)	% Pasa	% pasante
3/8 "	9,50	100,00	-
Nº 4	4,75	100,00	-
Nº 8	2,36	100,00	-
Nº 16	1,18	100,00	100
Nº 30	0,60	94,20	40 - 100
Nº 50	0,30	41,83	10 - 70
Nº 100	0,15	13,63	2 - 40
Nº 200	0,075	2,07	0 - 20
Base	0,00	0,37	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.29. Resultados del ensayo de peso unitario del polvo de neumático

Aditivo	Polvo de neumático	
	Peso unitario suelto (gr/cm ³)	Peso unitario compactado (gr/cm ³)
	0,385	0,457
Promedio	0,421	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.3. Resumen de la caracterización del polvo de neumático

A continuación, se presenta la Tabla 3.30. la cual contiene los resultados obtenidos de los ensayos realizados al polvo de neumático:

Tabla 3.30. Resumen de los ensayos de caracterización del polvo de neumático

ENSAYO	UNIDAD	ADITIVO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES	
				Mínimo	Máximo
Granulometría (AASHTO T-27)	gr	Polvo de neumático	P-2	P-1, P-2 o P-3	
Peso unitario (AASHTO T-19)	gr/cm ³	Polvo de neumático	0,421	0,35	0,5

Fuente: Elaboración propia.

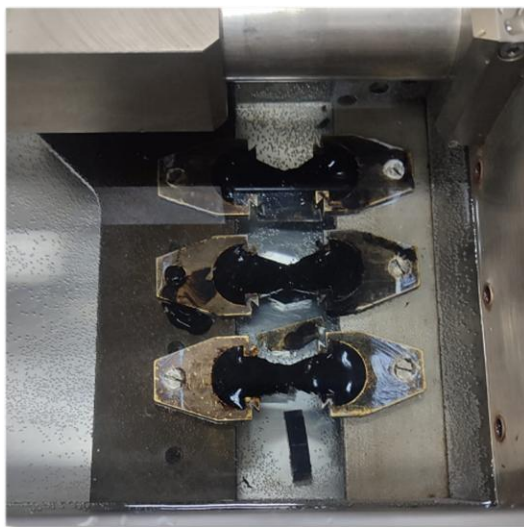
3.4.4. Caracterización del asfalto modificado con polvo de neumático

Para el asfalto modificado se recomienda realizar dos ensayos según el Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC; son los de recuperación elástica para asfaltos modificados (AASHTO T 301-99; ASTM D 6084-06) y el método para determinar el índice de penetración (UNE 104-281).

3.4.4.1. Ensayo de recuperación elástica (AASHTO T301-99; ASTM D 6084-06)

Para materiales bituminosos elastoméricos se considera una elongación inicial de 20 cm. para la muestra. Este método se utiliza en los asfaltos modificados, que comprenden los asfaltos y emulsiones asfálticas modificadas. El ensayo se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5$ °C y una velocidad de 5 cm/min $\pm$ 5%.

Figura 3.29. Proceso de elongación del asfalto modificado



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.31. Datos y resultado del ensayo de recuperación elástica

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Recuperación elástica AASHTO T301-99	%	40	47,5	42,5
Recuperación elástica promedio		43,33		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4.2. Índice de penetración (UNE 104-281)

Este método describe el procedimiento a seguir para la determinación del índice de penetración IP de los asfaltos modificados, este índice se calcula a partir de los valores de penetración y del punto de ablandamiento anillo y bola, y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad de estos materiales a los cambios de temperatura y de su comportamiento reológico.

Dichos valores de los ensayos para el cálculo del índice de penetración mediante el nomograma de hukelo bitumen test date Charl se encuentran en Anexos IV.

Figura 3.30. Determinación de la penetración del asfalto modificado



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.32. Resultado del ensayo del índice de penetración

Descripción	Unidad	Promedio
Índice de penetración UNE 104-281	-	0,42

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4.3. Resumen de la caracterización del asfalto modificado con polvo de neumático

Los resultados de los ensayos restantes que se realizó para el asfalto modificado se encuentran en el apartado de tablas del Anexos IV. A continuación, se muestran los ensayos que recomienda realizar el Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

Tabla 3.33. Resumen de los ensayos de caracterización del asfalto modificado con polvo de neumático

ENSAYO	UNIDAD	MUESTRAS			RESULTADO	ESPECIFICACIONES	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Recuperación elástica (AASHTO T301-99)	%	40	47,5	42,5	43,33	≥ 10	
Índice de penetración (UNE 104-281)	-	0,42			0,42	-	-

Fuente: Elaboración propia.

3.5. DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA PARA UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL

Se procede a realizar la dosificación del tratamiento superficial doble mediante el método de la dimensión mínima promedio especificado en el Manual de carreteras volumen IV de asfalto elaborado por la administración boliviana de carreteras (ABC) basado para su dosificación en los parámetros indicados según las especificaciones descritas.

Los agregados pétreos utilizados deben cumplir las especificaciones establecidas en la Tabla 3.1. que son los rangos de gradación donde la primera capa se encuentra dentro la franja “B” (grava) y la segunda que se encuentra entre la franja “D” (gravilla) que cumplen con los requisitos establecidos en la tabla mencionada antes.

Se determina la dosis de agregado pétreo para un tratamiento superficial simple; como en nuestro caso se trata de un tratamiento superficial doble se repite el procedimiento para cada capa del tratamiento superficial doble y para la dosis de ligante se calcula cada capa de igual forma que para el agregado; finalmente se determina la dosis total sumando las dosis individuales, haciendo un total de ligante para el tratamiento haciendo variar porcentualmente según la Tabla 2.14. establecida en el Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

La ecuación para determinar la dosis de agregado pétreo (kg/m²) está basada en parámetros como el factor de evaluación relacionado al clima, vacíos en el agregado suelto, dimensión mínima promedio, densidad real seca, densidad aparente suelta y el factor de desperdicio que depende de la dimensión mínima promedio.

$$C = M * (1 - 0,4V) * H * D_{RS} * E \quad (\text{Ec. 3.1.})$$

La ecuación para determinar la dosis de ligante asfáltico (l/m²) tanto para el asfalto convencional y modificado con polvo de neumático está basado en varios parámetros como el factor de evaluación relacionado al clima, vacíos entre el agregado suelto, dimensión mínima promedio, factor de tránsito, entre otros.

$$D = \frac{K * (0,4 * V * H * T + S + A)}{R} \quad (\text{Ec. 3.2.})$$

Una vez determinada las cantidades necesarias de agregado pétreo y ligante utilizados para cada capa del tratamiento superficial doble, según el método utilizado para la dosificación se realiza la proporcionalidad entre los valores conocidos y el área del molde de Marshall para obtener las cantidades reales que se van a utilizar para la elaboración de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial en el laboratorio. Los cálculos más detallados de la dosificación del tratamiento superficial doble están descritos paso a paso en el Anexo III.

Tabla 3.34. Gradación de los agregados utilizados en la dosificación del tratamiento superficial doble

Tamiz	Abertura en (mm.)	Porcentaje que pasa (por peso)			
		B		D	
		Agregado utilizado	Especificación	Agregado utilizado	Especificación
1 "	25,00	100,00	100	100,00	-
3/4 "	19,00	91,19	90 - 100	100,00	-
1/2 "	12,50	35,50	20 - 55	100,00	100
3/8 "	9,50	12,84	0 - 15	99,23	85 - 100
Nº 4	4,75	0,26	0 - 5	21,51	10 - 30
Nº 8	2,36	0,16	-	0,66	0 - 10
Nº 16	1,18	0,16	-	0,53	-
Nº 30	0,60	0,15	-	0,51	-
Nº 50	0,30	0,15	-	0,50	-
Nº 100	0,15	0,14	-	0,47	-
Nº 200	0,075	0,09	-	0,37	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.35. Distribución de dosis total del ligante, en capas individuales

Capa	Tratamiento	Tratamiento
	Doble %	Triple %
1a	40 - 45	30
2a	55 - 60	40
3a	-	30

Fuente: Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

Los resultados obtenidos de la dosificación de los materiales del tratamiento superficial doble según el método aplicado son los siguientes:

Tabla 3.36. Dosificación de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial convencional

Capas	Material	Cantidad
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 40% del total	7,60
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 55% del total	10,44
	agregado (gr/m ²)	98,48
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 41% del total	7,79
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 56% del total	10,63
	agregado (gr/m ²)	98,48
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 42% del total	7,98
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 57% del total	10,82
	agregado (gr/m ²)	98,48
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 43% del total	8,17
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 58% del total	11,01
	agregado (gr/m ²)	98,48
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 44% del total	8,36
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 59% del total	11,20
	agregado (gr/m ²)	98,48
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 45% del total	8,55
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 60% del total	11,39
	agregado (gr/m ²)	98,48

Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de ligante se distribuye según lo establecido en la Tabla 3.35. para la primera capa 40 a 45 % del total, para la segunda de un 55 a 60 % del total, según lo establecido en el Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

Tabla 3.37. Dosificación de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial modificado

Capas	Material	Cantidad
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 40% del total	7,60
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 55% del total	10,44
	agregado (gr/m ²)	98,48
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 41% del total	7,79
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 56% del total	10,63
	agregado (gr/m ²)	98,48
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 42% del total	7,98
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 57% del total	10,82
	agregado (gr/m ²)	98,48
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 43% del total	8,17
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 58% del total	11,01
	agregado (gr/m ²)	98,48
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 44% del total	8,36
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 59% del total	11,20
	agregado (gr/m ²)	98,48
1ra aplicación	asfalto (gr/) a 45% del total	8,55
	agregado (gr/m ²)	200,82
2da aplicación	asfalto (gr/) a 60% del total	11,39
	agregado (gr/m ²)	98,48

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.31. Proceso de compactación de las briquetas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.32. Desmoldado de las briquetas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.33. Briquetas de tratamiento doble convencional



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.34. Briquetas de tratamiento doble modificado



Fuente: Elaboración propia.

3.6. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DE ESTABILIDAD Y FLUENCIA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA PARA UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL

El propósito principal de realizar laboratorio es el de conocer la estabilidad y la fluencia de las briquetas de tratamiento doble realizadas anteriormente; como también el comportamiento de la densidad de la mezcla total.

Figura 3.35. Determinación de la estabilidad y fluencia



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en las tablas siguientes se observan los resultados obtenidos de la estabilidad, fluencia y densidad.

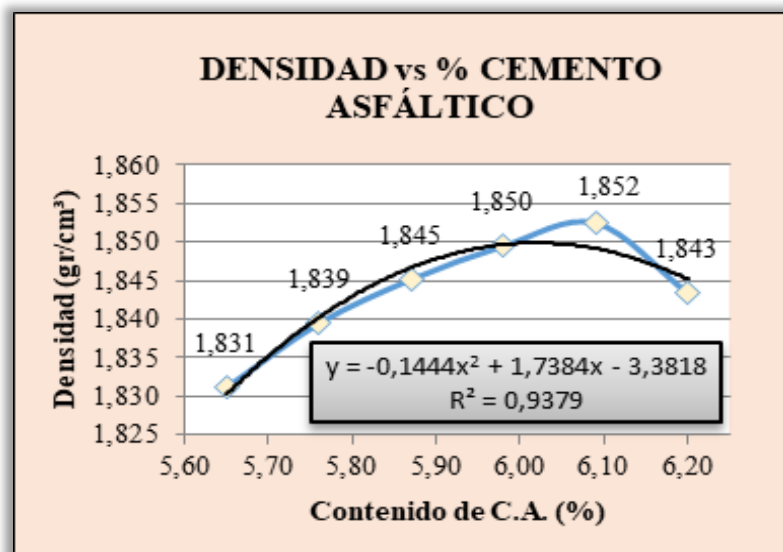
En la Tabla 3.38. se encuentran los resultados de la planilla para la estabilidad y la fluencia de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial doble realizado con asfalto convencional 85-100.

Tabla 3.38. Resultados de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial convencional

Contenido de cemento asfáltico	Contenido de agregado pétreo	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
5,65	94,35	1,831	988,35	10,40
5,76	94,24	1,839	1016,89	10,60
5,87	94,13	1,845	1021,74	11,00
5,98	94,02	1,850	1029,82	11,40
6,09	93,91	1,852	1029,28	12,20
6,20	93,80	1,843	1021,74	14,00

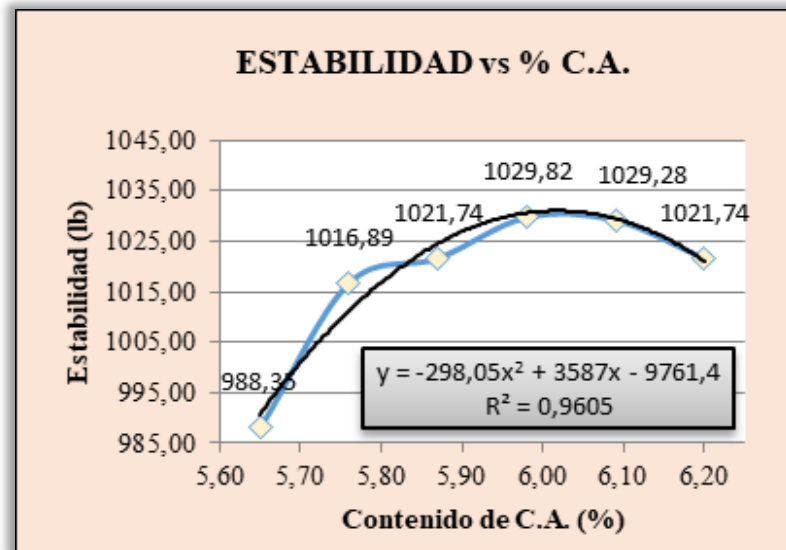
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.36. Densidad de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial convencional



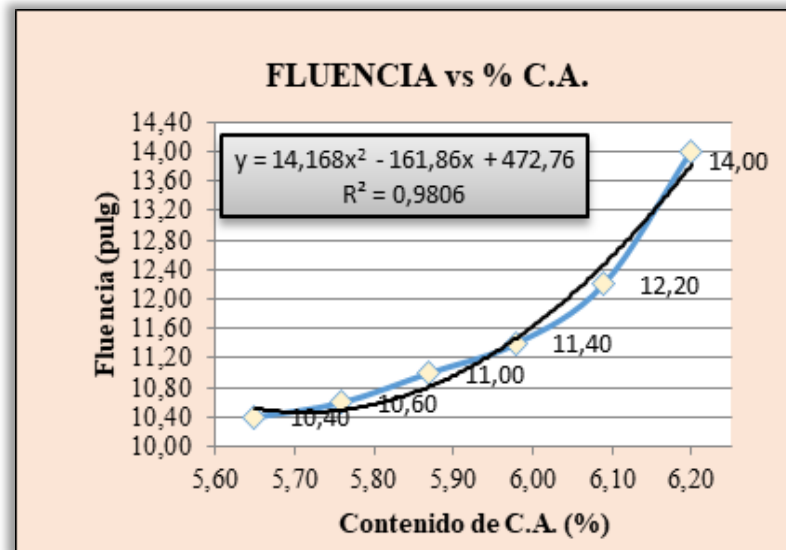
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.37. Estabilidad de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial convencional



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.38. Fluencia de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial convencional



Fuente: Elaboración propia.

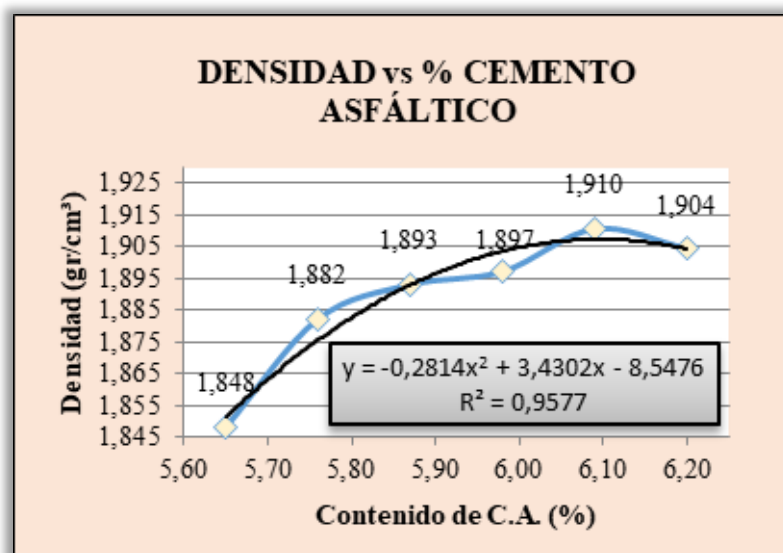
En la Tabla 3.39. se encuentran los resultados obtenidos de la planilla para la estabilidad y fluencia de una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial doble realizado con asfalto modificado con polvo de neumático, la estabilidad y la fluencia son las propiedades más importantes para evaluar en este proyecto de investigación.

Tabla 3.39. Resultados de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial modificado con polvo de neumático

Contenido de cemento asfáltico	Contenido de agregado pétreo	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
5,65	94,35	1,848	1271,63	9,80
5,76	94,24	1,882	1295,87	10,20
5,87	94,13	1,893	1303,40	10,60
5,98	94,02	1,897	1313,64	11,20
6,09	93,91	1,910	1305,56	11,40
6,20	93,80	1,904	1294,25	12,60

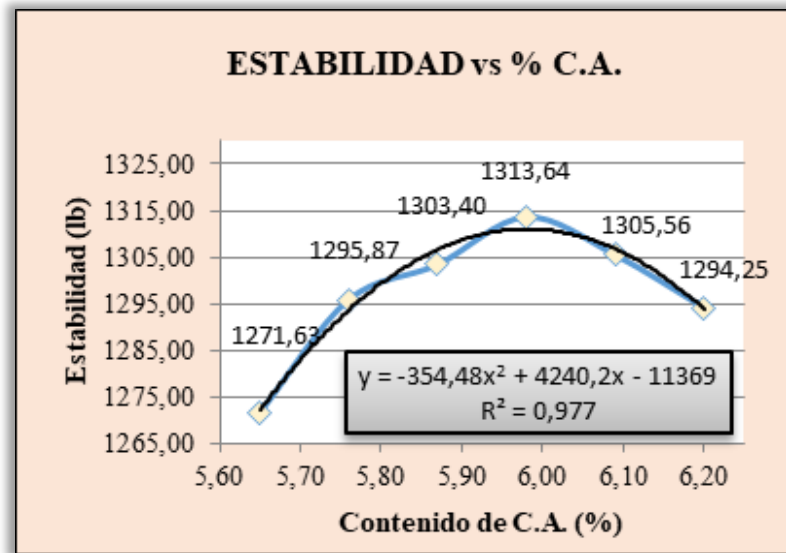
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.39. Densidad de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial modificado con polvo de neumático



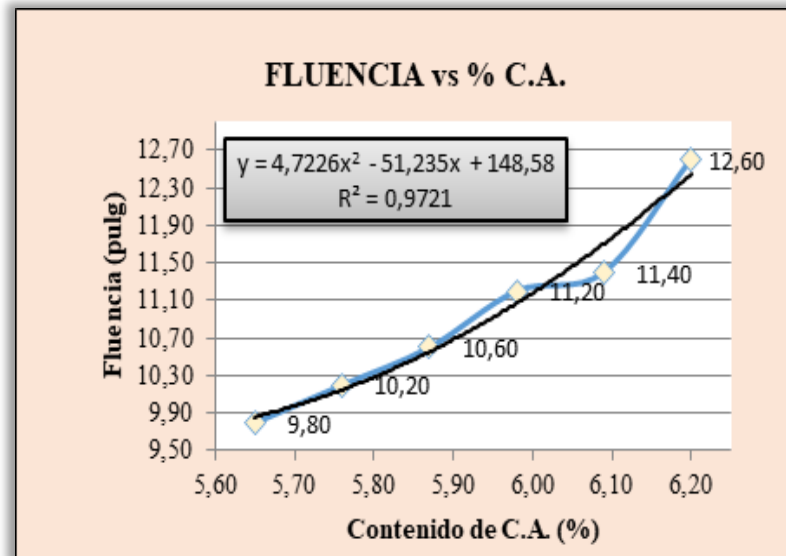
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.40. Estabilidad de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial modificado con polvo de neumático



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.41. Fluencia de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial modificado con polvo de neumático



Fuente: Elaboración propia.

Desarrollado para evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial constituido con asfalto convencional y asfalto modificado con polvo de neumático, comparando cuál de los dos tratamientos resiste una carga máxima y presenta

una mayor deformación que va a experimentar la briqueta desde el comienzo de la aplicación de la carga mediante el aparato de Marshall hasta el instante que se produce la falla.

3.7. ENSAYO PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE

3.7.1. Ensayo de Vialit

Este ensayo fue desarrollado para evaluar la adherencia del agregado pétreo utilizado y los asfaltos, así como también la resistencia al desprendimiento entre estos mediante la placa del Vialit. El procedimiento se aplica fundamentalmente a los materiales empleados en tratamientos superficiales.

El procedimiento empleado en este ensayo está conforme a los lineamientos establecidos por el Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC.

Para obtener la dosificación de los materiales del tratamiento superficial doble se realizó en base la granulometría de los agregados y el área de la bandeja en el cual se va a emular el tratamiento superficial para realizar el ensayo.

Figura 3.42. Dispositivo del ensayo de Vialit



Fuente: Elaboración propia.

El cálculo del porcentaje de pérdida de agregado será mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de adhesividad} = \frac{P_{\text{maev}} - P_{\text{mdev}}}{P_{\text{ag}}} * 100$$

Donde:

P_{maev} = Peso de la muestra antes del ensayo de Vialit.

P_{mdev} = Peso de la muestra después del ensayo de Vialit.

P_{ag} = Peso del agregado colocado inicialmente.

Los cálculos más detallados de la dosificación del ensayo del Vialit están descritos paso a paso en el apartado de Anexo III.

Tabla 3.40. Dosificación para el ensayo de Vialit con asfalto convencional

Tratamiento superficial convencional		Cantidad de agregado utilizado (100 partículas) según el tipo de granulometría	
Material	Asfalto (gr/m²)	Agregado B (gr)	Agregado D (gr/m²)
1a aplicación	65,52	433,50	-
2a aplicación	50,40	-	30,20
1a aplicación	65,52	438,60	-
2a aplicación	50,40	-	30,00
1a aplicación	65,52	435,80	-
2a aplicación	50,40	-	31,60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.41. Dosificación para ensayo de Vialit con asfalto modificado con polvo de neumático

Tratamiento superficial modificado		Cantidad de agregado utilizado (100 partículas) según el tipo de granulometría	
Material	Asfalto (gr/m²)	Agregado B (gr)	Agregado D (gr/m²)
1a aplicación	65,52	436,00	-
2a aplicación	50,40	-	28,50
1a aplicación	65,52	443,00	-
2a aplicación	50,40	-	31,10
1a aplicación	65,52	434,70	-
2a aplicación	50,40	-	30,40

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.43. Distribución del agregado en el ensayo de Vialit



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.42. Resultados del ensayo de Vialit con asfalto convencional 85-100

N° de muestra	Porcentaje de desprendimiento del agregado				
	Primera capa		Segunda capa		Total
	gr	%	gr	%	%
1	13,0	3,00	1,0	3,31	6,31
2	11,8	2,69	0,9	3,00	5,69
3	12,7	2,91	1,1	3,48	6,40
Media	12,50	2,87	1,00	3,26	6,13
Total	%	100			93,87
	%	6,13			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.43. Resultados del ensayo de Vialit con asfalto modificado con polvo de neumático

N° de muestra	Porcentaje de desprendimiento del agregado				
	Primera capa		Segunda capa		Total
	gr	%	gr	%	%
1	10,9	2,50	0,7	2,46	4,96
2	10,4	2,35	0,0	0,00	2,35
3	11,2	2,58	0,4	1,32	3,89
Media	10,83	2,47	4,00	1,26	3,73
Total	%	100			96,27
	%	3.73			

Fuente: Elaboración propia.

3.8. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

En la Tabla 3.44. se muestran los resultados de la caracterización de los agregados pétreos.

Tabla 3.44. Caracterización de los agregados pétreos

ENSAYO	UNIDAD	PARÁMETRO	GRAVA	GRAVILLA
Granulometria (AASHTO T-27)	gr	-	Franja "B"	Franja "D"
Peso específico de los agregados (AASHTO T-85)	gr/cm ³	Grauel	2,59	2,61
		Superficialmente Seco	2,63	2,65
		Aparente	2,68	2,72
	%	% de absorción	1,18	1,63
Peso unitario del los agregados (AASHTO T-19)	gr/cm ³	Suelto	1,52	1,49
	gr/cm ³	Compactado	1,57	1,56
Índice de aplanamiento de los agregados (NTL 354)	%	-	20,55	11,67
Índice de alargamiento de los agregados (NTL 354)	%	-	22,08	12,25
Desgaste por medio de la máquina de los Ángeles (AASHTO T-96)	%	-	19,12	22,43
Porcentaje de caras fracturadas de los agregados (ASTM D-5821)	%	-	91,56	-
Durabilidad de los agregados en solución de sulfatos (AASHTO T-104)	%	-	1,54	1,46

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de los asfaltos que se presentan a continuación:

Tabla 3.45. Caracterización del asfalto convencional 85-100

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg. (AASHTO T49-97)	mm	90,67
Punto de Inflamación (AASHTO T79-96)	°C	284,00
Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96)	°C	46,67
Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00)	cm	128,00
Peso Específico a 25°C (AASHTO T229-97)	gr/cm ³	1,019
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C (AASHTO T201-01)	Sf	97,33

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.46. Caracterización del asfalto modificado con polvo de neumático

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO
Recuperación elástica (AASHTO T301-99)	%	43,33
Índice de penetración (UNE 104-281)	-	0,42

Fuente: Elaboración propia.

3.8.1. Evaluación del comportamiento de las propiedades de estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial y del desempeño mediante el ensayo de Vialit

Una vez finalizado todo el trabajo de laboratorio aplicando el aparato de Marshall a ambas dosificaciones, se muestran los resultados para realizar un comparativo de sus propiedades en estabilidad y fluencia.

De igual forma, se evalúa los resultados obtenidos del ensayo de Vialit para evaluar el desempeño del tratamiento superficial doble.

Tabla 3.47. Resultados promediados de la evaluación

Propiedades y ensayo de Vialit	Unidad	Briqueta de tratamiento superficial doble convencional	Briqueta de tratamiento superficial doble modificado
Estabilidad	Lb	1017,97	1297,39
Fluencia	Pulg	11,60	10,97
Vialit	%	93,87	96,27

Fuente: Elaboración propia.

3.9. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se procederá a analizar los resultados obtenidos para evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial constituido con asfalto convencional y con asfalto modificado con polvo de neumático, llevando a cabo una comparación de sus propiedades en estabilidad y fluencia; de igual forma se analizarán los resultados obtenidos del ensayo de Vialit para evaluar el desempeño del tratamiento superficial doble.

3.9.1. Evaluación del comportamiento de la estabilidad y fluencia

Las principales propiedades que se van a evaluar son la estabilidad y la fluencia, observando de igual forma como se comportan las densidades de la mezcla, realizando una comparación de las muestras elaboradas con asfalto convencional y asfalto modificado con polvo de neumático, determinando cuál de los ligantes asfálticos es el más apropiado para la construcción de un tratamiento superficial doble.

Se elaboraron treinta briquetas con una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial con asfalto convencional y otras treinta con una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial con asfalto modificado, utilizando diferentes contenidos de asfaltos, de acuerdo con el método de la dimensión mínima promedio para la dosificación, según lo indicado en la Tabla 3.35. que muestra los rangos de porcentaje (%) de ligante que se deben emplear en función a las capas establecidas para el tratamiento superficial; en la primera capa, se debe utilizar un rango de 40 a 45 %, y en la segunda, de 55 a 60 % del total de dosis de ligante determinado para la dosificación.

En primer lugar, se examinará la estabilidad, tal como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 3.48. Resultados de la evaluación de las estabilidades

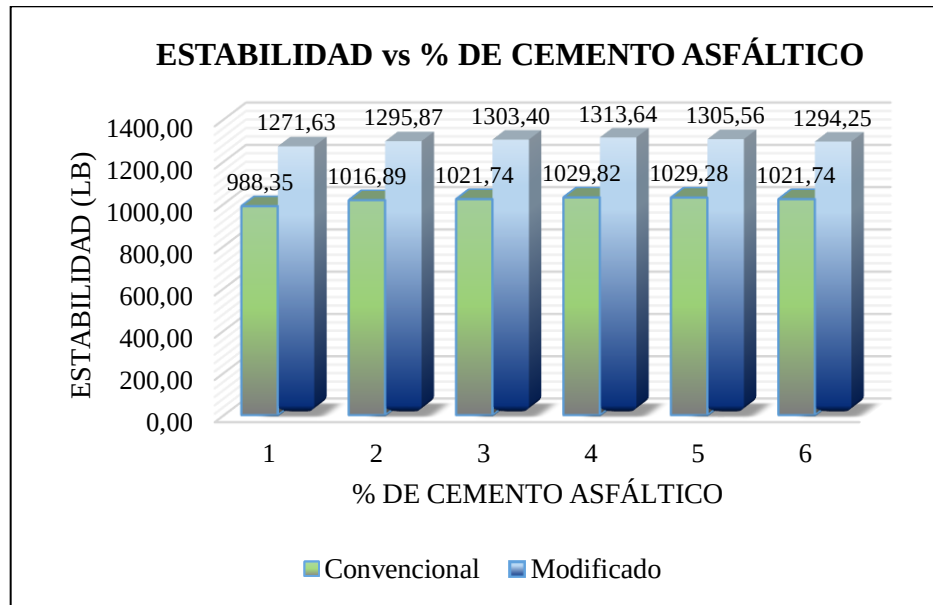
Tratamiento convencional	Tratamiento modificado
Estabilidad (lb)	Estabilidad (lb)
988,35	1271,63
1016,89	1295,87
1021,74	1303,40
1029,82	1313,64
1029,28	1305,56
1021,74	1294,25
1017,97	1297,39

Fuente: Elaboración propia.

La estabilidad es fundamental para garantizar la durabilidad y soporte de las cargas de tráfico sin sufrir deformaciones; se observa un aumento notable en la estabilidad de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial elaborado con asfalto modificado con

polvo de neumático en comparación con el convencional. Esto se puede confirmar en la Figura 3.44. donde se evidencia una mejora significativa en esta propiedad.

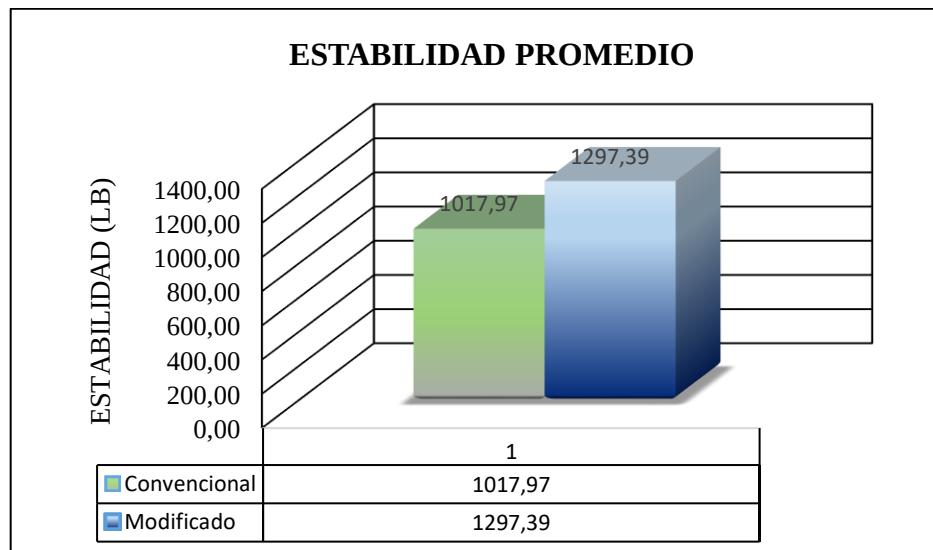
Figura 3.44. Diagrama comparativo de la estabilidad



Fuente: Elaboración propia.

La diferencia porcentual entre las estabilidades promediadas es del 21,54% como se ilustra en la Figura 3.45. mejorando considerablemente esta propiedad.

Figura 3.45. Diagrama comparativo de las estabilidades promediadas



Fuente: Elaboración propia.

Ofreciendo un mejor comportamiento cuando está expuesto a temperaturas extremas. De esta comparación, se concluye que el asfalto modificado con polvo de neumático es el más adecuado para llevar a cabo la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial, debido a sus altos valores de estabilidad observados.

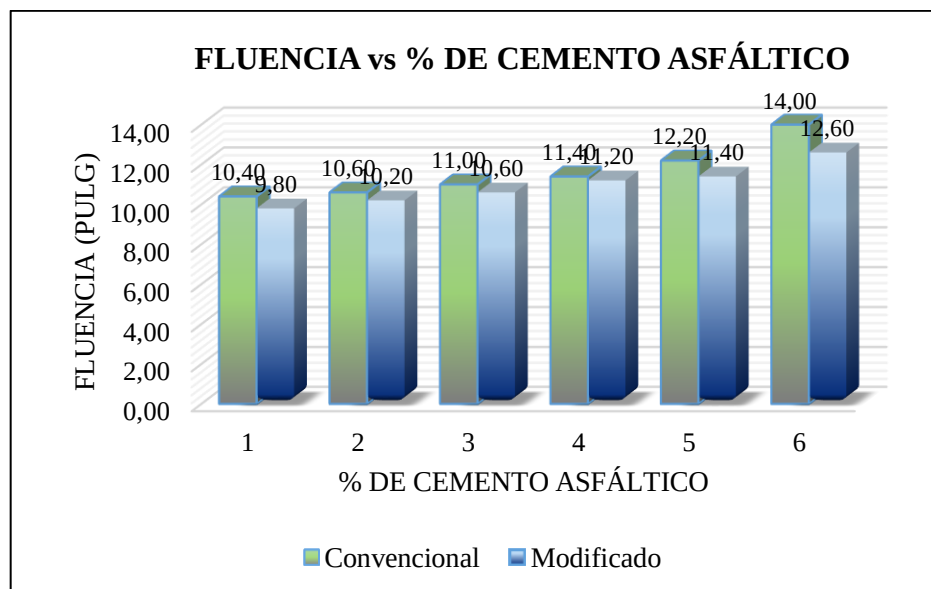
Con los resultados obtenidos en la Tabla 3.49. se procederá a crear la gráfica que permitirá evaluar los resultados relacionados con la fluencia (0,01 pulg.).

Tabla 3.49. Resultados de la evaluación de la fluencia

Tratamiento convencional	Tratamiento modificado
Fluencia (Pulg)	Fluencia (Pulg)
10,40	9,80
10,60	10,20
11,00	10,60
11,40	11,20
12,20	11,40
14,00	12,60
11,60	10,97

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.46. Diagrama comparativo de la fluencia

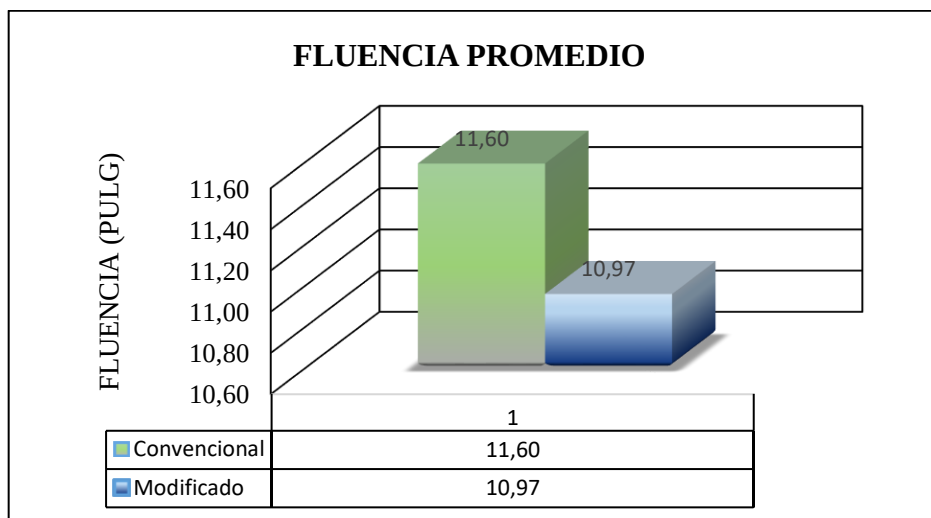


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.46. se observa un aumento del flujo en ambas mezclas del tratamiento superficial a medida que el porcentaje de asfalto incrementa, notándose que con el asfalto modificado con polvo de neumático presenta una fluencia menor.

En la gráfica se observa el comportamiento que tiene esta propiedad mecánica a mayor fluencia que presenta una briqueta mayor va ser la carga que va soportar; hasta llegar a un punto donde la estabilidad tiende a bajar.

Figura 3.47. Diagrama comparativo de las fluencias promediadas



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.47. se presenta las fluencias promediadas, se puede notar que la diferencia porcentual entre ambas es del 5,43%. Un beneficio de usar como ligante de una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial el asfalto modificado con polvo de neumático es que esta se deforma bajo las cargas que debe soportar, gracias al polímero incorporado, el asfalto modificado tiene la capacidad de regresar. Esto mejora el comportamiento a lo largo de su vida útil, permitiendo que absorba las tensiones sin que ocurran rupturas.

De igual forma se va evaluar el comportamiento de la densidad de la mezcla total del tratamiento superficial.

En la Tabla 3.50. se muestra una comparación entre las densidades de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial convencional y modificado que utiliza polvo de neumático,

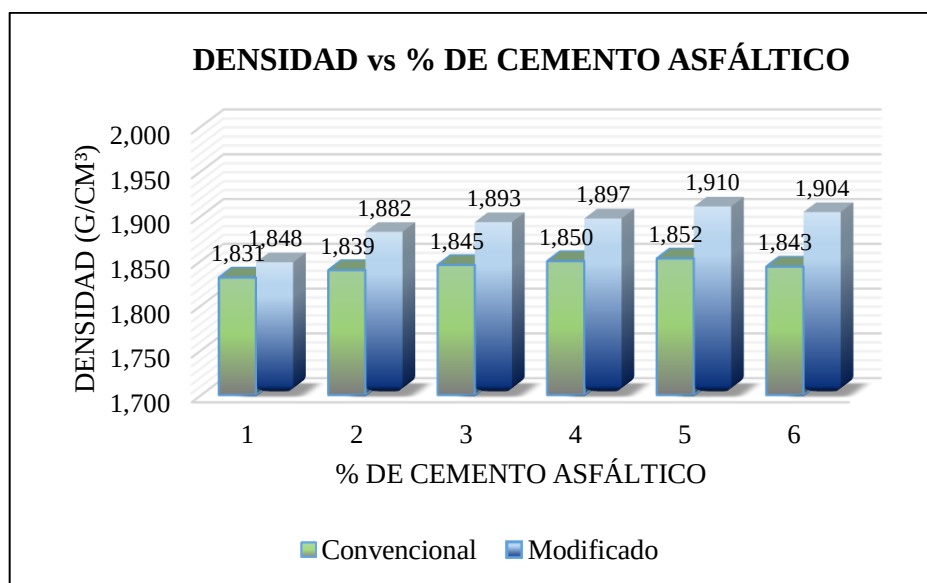
revelando distintas densidades de acuerdo con los porcentajes de asfalto aplicados en la dosificación.

Tabla 3.50. Resultados de la evaluación de la densidad

Tratamiento convencional	Tratamiento modificado
Densidad (gr/m ³)	Densidad (gr/m ³)
1,831	1,848
1,839	1,882
1,845	1,893
1,850	1,897
1,852	1,910
1,843	1,904
1,844	1,889

Fuente: Elaboración propia.

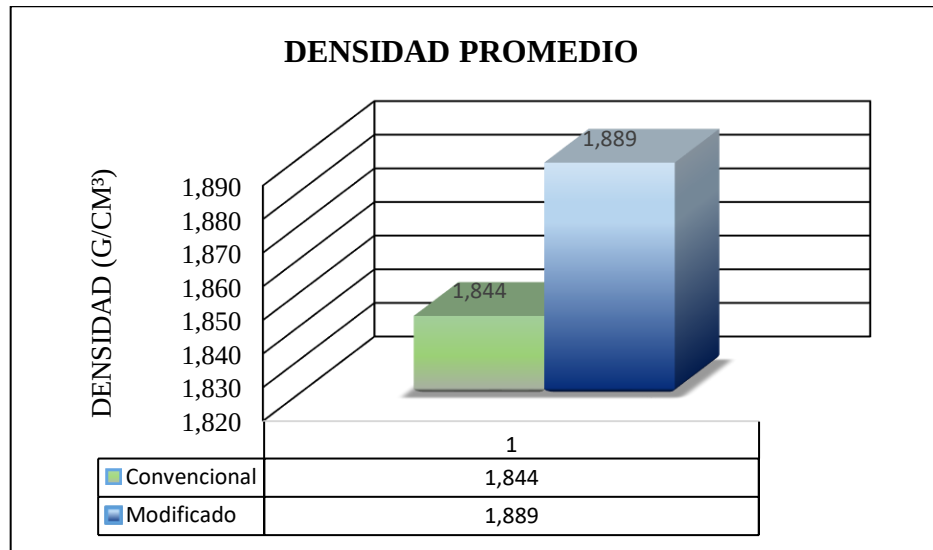
Figura 3.48. Diagrama comparativo de la densidad



Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, la densidad promediada obtenida del tratamiento realizado con asfalto modificado con polvo de neumático es superior, lo que provoca que los porcentajes de vacíos en la muestra también disminuyan en comparación con el tratamiento convencional.

Figura 3.49. Diagrama comparativo de las densidades promediadas



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.49. ilustra las densidades promediadas, donde la diferencia porcentual es de un 2,38% superior en comparación con la convencional. Esto lleva a la conclusión de que, a medida que aumenta el porcentaje (%) de asfalto en la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial la densidad tiende a aumentar.

3.9.2. Evaluación del desempeño mediante el ensayo de Vialit

Para determinar cuál de los dos asfaltos proporciona una mejor adherencia, se compararon los resultados de ambos tratamientos, evaluando el material desprendido en cada ensayo.

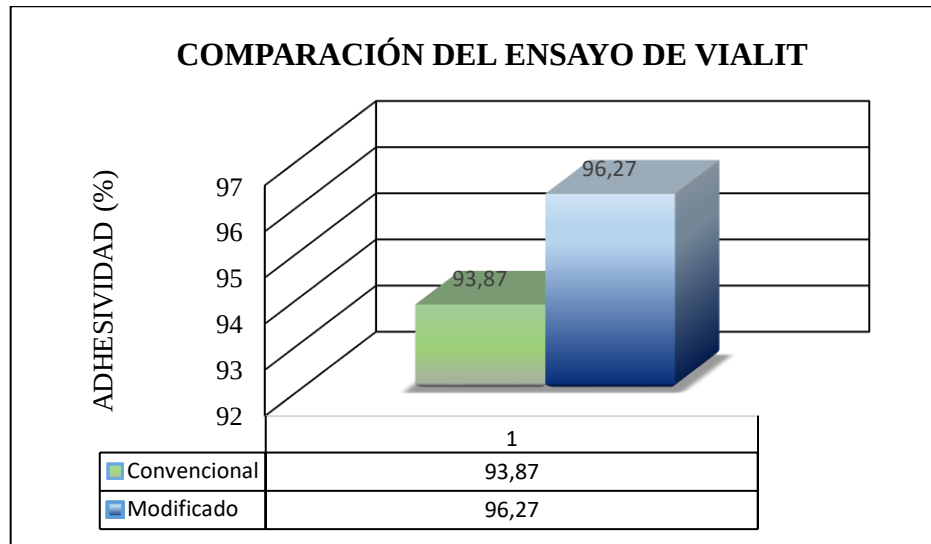
Se examinó también la condición del agregado desprendido, concluyendo que es más aconsejable utilizar un ligante con mayor adherencia a los agregados en la construcción de tratamientos superficiales.

Tabla 3.51. Resultados del ensayo de Vialit

Tratamiento convencional	Tratamiento modificado
Ensayo de Vialit (%)	Ensayo de Vialit (%)
93,87	96,27

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.50. Diagrama comparativo del ensayo de Vialit



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.50. se puede observar que las muestras hechas con asfalto convencional muestran un porcentaje de adherencia del 93,87%; este porcentaje se encuentra dentro del rango de 90 a 95% lo que evidencia una adherencia regular entre los agregados pétreos y el asfalto convencional.

Las muestras elaboradas de asfalto modificado con polvo de neumático muestran una adherencia del 96,27%, lo cual indica una buena adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto modificado con polvo de neumático, superando el 95% de adherencia.

La diferencia del porcentaje de desprendimiento observado sería un indicador de la rigidez del asfalto después del proceso de enfriamiento, en donde se observa que el asfalto modificado presenta mayor rigidez, permitiendo que tenga una mayor adherencia y un menor porcentaje de pérdida.

Por el contrario, el asfalto convencional presenta sensibilidad a la temperatura, lo cual provoca que el desprendimiento sea un poco mayor comparado con el asfalto modificado con polvo de neumático.

3.10. COSTOS DE APLICACIÓN DE UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL DOBLE

Se determina el costo unitario por metro cuadrado con las cantidades obtenidas para la dosificación de los materiales del tratamiento superficial doble tanto para el convencional y modificado.

ITEM N° 1: Tratamiento superficial doble

a) Materiales

Los materiales que forman parte del tratamiento superficial doble son el ligante asfáltico que son el asfalto convencional y el asfalto modificado con polvo de neumático y los agregados pétreos que son la grava para la primera capa y la gravilla para la segunda.

Para el proceso de la elaboración del tratamiento superficial doble consiste en una serie de ensayos de laboratorio para determinar las cantidades del ligante asfáltico y el agregado pétreo ambos materiales deben cumplir con las especificaciones técnicas establecidas, de acuerdo a las normas de los ensayos realizados para su caracterización en laboratorio.

b) Mano de obra y equipo mecánico

Se debe tomar en cuenta el costo de la mano de obra del tratamiento, el personal necesario para operar los equipos que se utilizan en el tratamiento superficial teniendo conocimiento del costo horario de los equipos necesarios, así como de los operarios de estos, determinando así el pago de los costos directos.

Los costos directos de cada partida toman en cuenta los rendimientos de los equipos, el costo horario entre otros parámetros como los costos de posesión, de operación y en los costos indirectos que conforman el presupuesto de la obra que son analizados según la necesidad de la misma como los gastos administrativos entre otros.

Finalmente, tomando en cuenta todos los parámetros necesarios como los impuestos el IVA y el IT con sus respectivos % de descarga al mismo tiempo sus utilidades y beneficios sociales.

Precios Unitarios

A continuación, en las tablas siguientes se presentan las planillas que corresponden al costo del tratamiento superficial doble con asfalto convencional realizando una comparación con respecto al asfalto modificado con polvo de neumático, con las especificaciones descritas anteriormente.

Análisis técnico-económico

En la Tabla 3.52. se determinó el costo del tratamiento superficial doble, con asfalto convencional con un costo de 112,69 bs por metro cuadrado y el costo del tratamiento superficial doble realizado con asfalto modificado con polvo de neumático que se encuentra plasmado en la Tabla 3.53. es de 113,78 bs por metro cuadrado siendo más costoso el tratamiento superficial doble modificado con un porcentaje de 0,96 % esto se presenta por el costo del asfalto modificado con polvo de neumático que es más costoso económicamente, pero analizando de forma diferente el costo del tratamiento superficial doble realizado con asfalto modificado con polvo de neumático a la larga es una técnica de rehabilitación de bajo costo en el mantenimiento y conservación de una carretera ya que es más económico debido a que las propiedades del asfalto modificado con polvo de neumático son más resistente a los agentes atmosféricos, presentan menos fallas, proporcionando buenos resultados comparado con el tratamiento superficial realizado con asfalto convencional.

Costo de aplicación del tratamiento superficial doble con asfalto convencional

Rendimiento de los materiales

Asfalto convencional= $2,21 \text{ Ltrs/m}^2$ (dato del diseño)

Primera Capa – Agregado Tipo B:

Cantidad de agregados= $23,37 \text{ kg/m}^2$

Peso unitario suelto= 1515 kg/m^3

Rendimiento= $(23,37 \text{ kg/m}^2) / (1515 \text{ kg/m}^3)$

Rendimiento= $0,01543 \text{ m}^3/\text{m}^2$

Segunda Capa – Agregado Tipo D:

Cantidad de agregados= $11,46 \text{ kg/m}^2$

Peso unitario suelto= 1492 kg/m^3

Rendimiento= $(11,46 \text{ kg/m}^2) / (1492 \text{ kg/m}^3)$

Rendimiento= $0,00768 \text{ m}^3/\text{m}^2$

Costo de aplicación del tratamiento superficial doble con el asfalto modificado

Rendimiento de los materiales

Asfalto modificado= $2,21 \text{ Ltrs/m}^2$ (dato del diseño)

Polvo de neumático= $0,22 \text{ kg/m}^2$ (dato del diseño)

Primera Capa – Agregado Tipo B:

Cantidad de agregados= $23,37 \text{ kg/m}^2$

Peso unitario suelto= 1515 kg/m^3

Rendimiento= $(23,37 \text{ kg/m}^2) / (1515 \text{ kg/m}^3)$

Rendimiento= $0,01543 \text{ m}^3/\text{m}^2$

Segunda Capa – Agregado Tipo D:

Cantidad de agregados= $11,46 \text{ kg/m}^2$

Peso unitario suelto= 1492 kg/m^3

Rendimiento= $(11,46 \text{ kg/m}^2) / (1492 \text{ kg/m}^3)$

Rendimiento= $0,00768 \text{ m}^3/\text{m}^2$

Tabla 3.52. Costo del tratamiento superficial doble con asfalto convencional

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
ÍTEM:	Tratamiento superficial doble con asfalto convencional			
CANTIDAD:	1			
UNIDAD:	m ²	MONEDA:	Bs	
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
1. MATERIALES				
Cemento asfáltico convencional 85-100	lts	2,210	15,00	33,150
Agregado 1ra capa grava tipo "B"	m ³	0,015	140,00	2,160
Agregado 2da capa gravilla tipo "D"	m ³	0,008	160,00	1,229
TOTAL MATERIALES				36,540
2. MANO DE OBRA				
Op. Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,040	23,00	0,920
Op. Distribuidor de asfalto	hr	0,040	23,00	0,920
Op. Distribuidor de agregados	hr	0,040	23,00	0,920
Op. Cargador frontal	hr	0,040	19,00	0,760
Ayudante 1ra	hr	0,060	18,75	1,125
Ayudante 2da (Peón)	hr	0,060	13,50	0,810
Op. Compactador liso	hr	0,040	20,00	0,800
Op. Compactador neumático	hr	0,040	20,00	0,800
Capataz	hr	0,050	24,00	1,200
SUB TOTAL MANO DE OBRA				8,260
CARGAS SOCIALES (55% de SUB TOTAL MANO DE OBRA) (55% - 71,18%)				4,543
IMPUESTOS IVA (14,94% de SUB TOTAL MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				1,913
TOTAL MANO DE OBRA				14,720
3. EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Camión escoba mecánica autopropulsada	hr	0,040	55,00	2,200
Camión distribuidor de asfalto	hr	0,040	95,00	3,800
Camión distribuidor de agregados	hr	0,040	200,00	8,000
Cargador frontal	hr	0,003	380,00	1,140
Compactador rodillo liso	hr	0,040	320,00	12,800
Compactador rodillo neumático	hr	0,040	260,00	10,40
HERRAMIENTAS (5% de TOTAL MANO DE OBRA)				0,736
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				39,080
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES (10% de 1+2+3)				9,034
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				9,030
5. UTILIDAD				
UTILIDAD (10% de 1+2+3+4)				9,937
TOTAL UTILIDAD				9,940
6. IMPUESTOS				
IMPUESTOS IT (3,09% de 1+2+3+4+5)				3,378
TOTAL IMPUESTOS				3,380
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)				112,69
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO				112,69

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.53. Costo del tratamiento superficial doble con asfalto modificado

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
ÍTEM:	Tratamiento superficial doble con asfalto modificado			
CANTIDAD:	1			
UNIDAD:	m ²	MONEDA:	Bs	
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
1. MATERIALES				
Cemento asfáltico convencional 85-100	ltres	2,210	15,00	33,150
Polvo de neumático (Polímero)	kg	0,221	4,00	0,884
Agregado 1ra capa grava tipo "B"	m ³	0,015	140,00	2,160
Agregado 2da capa gravilla tipo "D"	m ³	0,008	160,00	1,229
TOTAL MATERIALES				37,420
2. MANO DE OBRA				
Op. Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,040	23,00	0,920
Op. Distribuidor de asfalto	hr	0,040	23,00	0,920
Op. Distribuidor de agregados	hr	0,040	23,00	0,920
Op. Cargador frontal	hr	0,040	19,00	0,760
Ayudante 1ra	hr	0,060	18,75	1,125
Ayudante 2da (Peón)	hr	0,060	13,50	0,810
Op. Compactador liso	hr	0,040	20,00	0,800
Op. Compactador neumático	hr	0,040	20,00	0,800
Capataz	hr	0,050	24,00	1,200
SUB TOTAL MANO DE OBRA				8,260
CARGAS SOCIALES (55% de SUB TOTAL MANO DE OBRA) (55% - 71,18%)				4,543
IMPUESTOS IVA (14,94% de SUB TOTAL MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				1,913
TOTAL MANO DE OBRA				14,720
3. EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Camión escoba mecánica autopropulsada	hr	0,040	55,00	2,200
Camión distribuidor de asfalto	hr	0,040	95,00	3,800
Camión distribuidor de agregados	hr	0,040	200,00	8,000
Cargador frontal	hr	0,003	380,00	1,140
Compactador rodillo liso	hr	0,040	320,00	12,800
Compactador rodillo neumático	hr	0,040	260,00	10,40
HERRAMIENTAS (5% de TOTAL MANO DE OBRA)				0,736
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				39,080
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES (10% de 1+2+3)				9,122
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				9,120
5. UTILIDAD				
UTILIDAD (10% de 1+2+3+4)				10,034
TOTAL UTILIDAD				10,030
6. IMPUESTOS				
IMPUESTOS IT (3,09% de 1+2+3+4+5)				3,410
TOTAL IMPUESTOS				3,410
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)				113,78
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO				113,78

Fuente: Elaboración propia.

Precios unitarios de los materiales; estos precios han sido proporcionados por la alcaldía y la empresa Ingoqui, entidades de donde se proveyeron los materiales.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Se evaluó el comportamiento de una mezcla asfáltica para un tratamiento superficial constituido con asfalto modificado con polvo de neumático, a través del aparato de Marshall para la determinación de la estabilidad y fluencia, se comprobó que aumenta la estabilidad y baja la fluencia, mostrando una mayor adhesión entre el asfalto y los agregados pétreos; esto proporciona una resistencia superior para la capa de rodadura en términos de conservación, mantenimiento y durabilidad a lo largo de su vida útil.

Se establecieron los aspectos generales de los materiales utilizados en la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial; para su posterior caracterización verificando que cumplan con las especificaciones estipuladas en normas.

Se determinaron los parámetros necesarios para la dosificación de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial mediante el método de la dimensión mínima promedio. Estos parámetros para los agregados incluyen la granulometría, la densidad real seca, la densidad aparente suelta, el índice de las, y para el asfalto, el factor de tránsito, la corrección por textura superficial, la corrección por absorción del agregado y el residuo asfáltico.

En base a la dosificación de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial utilizando el método de la dimensión mínima promedio, se ha establecido la relación entre los valores obtenidos de la cantidad de materiales determinados por metro cuadrado y el área del molde de Marshall. Esto nos permite obtener los resultados para la dosificación de las briquetas del tratamiento doble, evaluando así el comportamiento de las propiedades en estudio.

Los resultados de estabilidad y fluencia para evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica del tratamiento superficial son: La estabilidad para el asfalto convencional tienen un valor promedio de 1017,97 lb, mientras que al utilizar el asfalto modificado con polvo de neumático se obtiene un valor promedio de 1297,39 lb. Al analizar esta comparación, se observa que los resultados obtenidos con el asfalto modificado en la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial son mayores que los obtenidos con el asfalto convencional, con una diferencia porcentual de 21,54 %. Del mismo modo, al comparar los resultados

de fluencia, se aprecia un valor promedio con el asfalto convencional de 11,60 pulgadas, mientras que con el asfalto modificado con polvo de neumático fue de 10,97 pulgadas, con una diferencia porcentual de un 5,43 %. Verificando así que las propiedades del asfalto modificado con polvo de neumático mejoren significativamente, en términos de estabilidad y fluidez, así como las características adhesivas entre los materiales del tratamiento superficial.

Se concluyó que, en el ensayo del Vialit, el resultado obtenido con asfalto convencional es del 93,87 %, mientras que el que se realizó con asfalto modificado con polvo de neumático alcanza un 96,27 %, lo que indica una buena adherencia y respalda una menor pérdida de agregado.

En el análisis de precios unitario del tratamiento superficial doble se observa que el costo del tratamiento superficial doble con asfalto convencional 85-100 es de 112,69 Bs el metro cuadrado y del tratamiento superficial doble con asfalto modificado con polvo de neumático es de 113,78 Bs por metro cuadrado enfatizando que lo único que varía en los precios unitarios es el costo del asfalto modificado con polvo de neumático que es mayor al del asfalto convencional que en realidad es una desventaja pero analizando en la parte técnica como sus propiedades se llega a la conclusión de que es una ventaja en cuanto a su vida útil en el mantenimiento y conservación de una carretera o vía en donde se puede utilizar este material.

Se busca brindar una alternativa para reutilizar estos subproductos de los neumáticos desechados, mejorando y generando un impacto positivo en la mitigación de la contaminación ambiental.

4.2. RECOMENDACIONES

Es fundamental que los agregados obtenidos deben cumplir con los requisitos de gradación descritos en el Manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC, ya que esto contribuye a un rendimiento óptimo; se debe emplear agregados provenientes de la trituración, que no contengan agua libre, limpios y sin sustancias químicas.

Para implementar el polvo de neumático en un asfalto se toma como criterio de partida que el asfalto base debe ser más blando que el que se pretende obtener.

El parámetro con más influencia para la modificación del asfalto es la granulometría del polvo de neumático; este debe cumplir los requisitos de gradación descritos Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.

La caracterización de los materiales empleados en la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial debe cumplir con las especificaciones de las normas.

Se recomienda realizar 3 veces el ensayo al momento de la caracterización de los materiales para así obtener resultados más confiables y representativo.

No se debe sobrecalentar la muestra de asfalto demasiado tiempo ya que puede tener efectos negativos en su calidad y propiedades.

Se recomienda revisar los equipos antes de realizar cualquier ensayo para evitar resultados dudosos.

El Manual de carreteras volumen IV de asfalto de la ABC recomienda la metodología a emplear de dimensión mínima promedio (DMP) para la dosificación de los materiales en tratamientos superficiales.

Al momento de romper las briquetas en el aparato de Marshall siempre estar atento y concentrado a las lecturas del dial de flujo y estabilidad para obtener datos más precisos.

El ensayo de Vialit se realiza normalmente a una temperatura ambiente no inferior a 10°C, se aplica fundamentalmente a los materiales empleados en tratamientos superficiales.

La eliminación inadecuada de los neumáticos fuera de uso (NFU) en Bolivia genera la necesidad de implementar planes para poder manejar adecuadamente estos desechos.

Es importante que se difunda la cultura ambiental desde los organismos principales del Estado, motivando a empresas constructoras y a las propias personas a optar por asfalto ecológico en la fabricación de pavimentos, mantenimiento y conservación.