

1.1. ANTECEDENTES

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 de las mezclas que componen las capas de rodamiento aumentando la rigidez, disminuyendo el fisuramiento por efecto térmico de las bajas temperaturas y por la fatiga aumentando su elasticidad.

Los asfaltos modificados se utilizan como ligante en un tratamiento superficial, estos pueden ser simple, doble y triple aplicados en la construcción de calzadas, en obras de mejoramiento estándar de caminos con volúmenes de tránsito medianos a ligeros, en algunos casos se emplean como revestimiento de bermas en carreteras de alto tránsito, en diferentes países el tratamiento superficial con asfalto modificado con polímeros es usado como una técnica de rehabilitación de bajo costo en el sentido de mantenimiento a largo plazo, debido a la incorporación de los polímeros en el ligante, proporcionando buenos resultados en el comportamiento a bajas temperaturas ganando así una nueva técnica de trabajo.

La historia de la modificación del asfalto no es tan reciente como se podría pensar, en 1843 fueron concedidas patentes para modificar el asfalto con polímeros naturales y sintéticos, con el pasar 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 de ligantes asfálticos Superpave Performance Graded (PG) a principios

de los años noventa. La gran mayoría de los polímeros empleados son elastómeros como el SBR (caucho estireno-butadieno) y el SBS (estireno-butadieno-estireno).

En Bolivia existen ensayos empíricos o prácticas ingenieriles que no brindan un buen fundamento teórico técnico, normas adoptadas del extranjero que no consideran las características propias del país. Como consecuencia se ha observado calidades deficientes en el producto final de un proyecto, como por ejemplo en la elaboración de una carretera que no cumple con la vida útil proyectada en el diseño presentándose grandes fallas como deformaciones, resistencia a la abrasión, envejecimiento prematuro entre otros esto se debe muchas veces a la calidad que presentan los materiales que se utilizan en la ejecución de una carretera o vía, en un tratamiento superficial e inclusive en un micro pavimento.

En el año 2016 en Bolivia se realizó una conferencia para dar a conocer el uso del asfalto modificado con polímeros en el departamento de Oruro; los principales expositores fueron de la empresa Stratura Asfaltos del Brasil con el fin de promover la ejecución de proyectos con asfalto modificado con polímeros es una tecnología que viene ejecutándose de manera más recurrente, permitiendo una mayor vida útil de las carreteras, considerando el fuerte volumen del tráfico vehicular y las altas o bajas temperaturas en las carreteras que se tienen en el país.

Bolivia carece de la investigación científica respecto a otros países como Estados Unidos o Europa, nuestro país se enfrenta con dificultad los posibles problemas que puedan presentarse respecto a este tema.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Los tratamientos superficiales bicapa han mostrado a lo largo de su historia ser destacados en su comportamiento y durabilidad dentro de su vida útil de 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, la principal deficiencia que presentan los tratamientos superficiales de forma general elaborada en el país ya sea simple, doble o triple es la resistencia, la deformación, la pérdida de agregado que como consecuencia disminuye la fuerza de

fricción entre la superficie y los vehículos, lo que puede provocar accidentes de tránsito, debido a que en nuestra región principalmente se realizan tratamientos superficiales con cemento asfálticos convencionales los cuales tienen propiedades físicas y mecánicas limitadas, que podría convertirse en la razón principal que se presentan estos problemas mencionados anteriormente.

La razón por el cual se desea realizar esta investigación es saber principalmente si mejoran las propiedades de resistencia y deformación del tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto modificado con polímeros, si presentan menor pérdida de agregado, 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 bicapa, 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 beneficiando a nuestra sociedad.

Se observa que en diferentes países el tratamiento superficial bicapa con el asfalto modificado con polímeros es usado como una técnica de rehabilitación de bajo costo en el sentido de mantenimiento a largo plazo debido a la incorporación de los modificadores en el ligante el cual trae buenos resultados como es el caso del polímero SBS (estireno-butadieno-estireno) en el comportamiento tanto a bajas y altas temperaturas ganando así una nueva técnica de trabajo.

El asfalto modificado con polímero SBS (estireno-butadieno-estireno) incrementa la adherencia en la interface entre el material pétreo y el material asfáltico, la resistencia a la deformación, esfuerzos de tensión repetidos y por tanto a la fatiga y reduce el agrietamiento entre otras ventajas más por esta razón se convierte en el ligante más eficiente para realizar el tratamiento superficial bicapa.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Situación Problemática

El asfalto es susceptible 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 estas razones 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.

Al presentarse estos problemas, se modifica el cemento asfáltico con polímeros para mejorar sus propiedades físicas y reológicas, en especial su recuperación elástica proponiendo usar esta nueva alternativa en el diseño en carpetas asfálticas como el tratamiento superficial bicapa que no solo es usado como revestimiento asfáltico para carreteras, también en diferentes países se utiliza como una técnica de rehabilitación de bajo costo en el sentido de mantenimiento a largo plazo, en relación al asfalto convencional.

En la actualidad existen muchos problemas en nuestra vías o carreteras que se presentan a causa de diferentes factores como el desgaste y las fallas que son notorias en las carpetas asfálticas. La necesidad de tener en buenas condiciones los caminos, se vuelve cada día más indispensable para el desarrollo social y económico de nuestro departamento.

Por estos motivos y entre muchos otros más, se presenta la necesidad de realizar esta investigación de evaluar el comportamiento del asfalto modificado en el tratamiento superficial en estudio para verificar resultados obtenidos que brinden confiabilidad contundente en el uso de esta nueva alternativa, que pueda ser involucrada en la elaboración de vías o carreteras ya sea para el diseño de carpetas asfálticas o para la conservación, mantenimiento y rehabilitación de vías o carreteras deterioradas.

1.3.2. Problema

¿De qué manera influirá la utilización del asfalto modificado con polímeros usado como ligante en un tratamiento superficial bicapa?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento del asfalto modificado con polímeros que se utiliza como ligante del tratamiento superficial bicapa, para tener una nueva alternativa de mantenimiento, conservación y durabilidad de las vías.

1.4.2. Objetivos específicos

- Establecer los aspectos generales sobre el asfalto modificado con polímeros, tratamiento superficial desde su conceptualización, tipología, características, propiedades, proceso de ejecución que son aplicables.
- Tomar en consideración lo estipulado en normas, manuales de la ABC para el diseño de carreteras en Bolivia con respecto al tratamiento superficial.
- Aplicar la metodología de diseño por el método de la dimensión mínima promedio para la obtención de mejores resultados en la construcción de tratamientos superficiales bicapa.
- Realizar la dosificación del tratamiento superficial bicapa en las briquetas de Marshall.
- Comparar el tratamiento superficial bicapa con asfalto convencional con el asfalto modificado con polímeros, evaluando las propiedades de estabilidad y la fluencia mediante el ensayo del Marshall.
- Comparar las características adhesivas entre el tratamiento superficial bicapa convencional y el modificado.
- Realizar un análisis de precios unitario comparativo entre el tratamiento superficial con asfalto convencional y con asfalto modificado con polímeros.

1.5. HIPÓTESIS

Si el uso del polímero influye significativamente en la variación de un asfalto, se podrá usar el asfalto modificado para realizar el tratamiento superficial bicapa, y así evaluar el comportamiento de las propiedades que van a mejorar como la resistencia, estabilidad, fluencia y características adhesivas entre los agregados pétreos y el ligante asfáltico.

1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1. Variable Independiente

Tratamiento superficial bicapa

1.6.2. Variable Dependiente

Resistencia, estabilidad, fluencia.

Características adhesivas entre los agregados pétreos y el ligante asfáltico.

1.6.3. Conceptualización y Operacionalización de Variables

Tabla 1.1. Conceptualización y Operacionalización de Variables.

Variable	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	valor/ acción
Variable independiente Tratamiento superficial bicapa	Constituido por dos aplicaciones sucesivas de ligante y árido, Con un espesor aproximado de 2.5 cm.	Ligante	L/m ² o g/m ²	Cantidad calculada
		Agregados	kg/m ² o g/m ²	Cantidad calculada
Variable dependiente Resistencia Estabilidad Fluencia	Se define como la carga máxima en la cual se deforma y se produce la ruptura de una probeta de Marshall.	Ensayo de Marshall de las probetas del tratamiento superficial bicapa.	-	Probetas del tratamiento superficial bicapa
Características adhesivas entre los agregados pétreos y el ligante asfáltico.	Ensayos de laboratorio que se realizan para determinar el % de pérdida del agregado en el tratamiento superficial bicapa.	Ensayo del Vialit y el Ensayo del barrido	-	Tratamiento superficial bicapa

Fuente: Elaboración Propia.

1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1. Componentes

a) Unidad de estudio

Carpetas asfálticas

b) Población

Carpetas asfálticas tipo tratamiento superficial.

c) Muestra

Tratamiento superficial doble (bicapa) con asfalto modificado con polímeros

d) Muestreo

Para realizar el muestreo de los materiales que se utilizan en el tratamiento superficial en estudio se basa en el método de muestreo con las especificaciones técnicas de la Norma (ASTM D 140; AASHTO T40-78), de los materiales que se realiza el muestreo son los siguientes:

Se aplicaran dos tipos de asfalto como ligante del tratamiento superficial bicapa el asfalto modificado con polímeros y el asfalto convencional.

Se elegirán dos tipos de agregado de diferentes condiciones geométricas para realizar el tratamiento superficial.

1.8. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

1.8.1. Selección de Métodos y Técnicas

El método que se va a utilizar es el inductivo que es un método científico que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares.

Para la elaboración de los ensayos, mediciones y la evaluación se lo realizara basado en normas establecidas para nuestro país, cumpliendo con cada una de las especificaciones técnicas que estas describen principalmente para la elaboración de los ensayos.

Ensayos: consiste en realizar la caracterización de los materiales que se utilizan en el diseño original del tratamiento superficial en laboratorio, donde se realizan los ensayos de caracterización del cemento asfáltico y de los agregados.

Mediciones: se realizan las mediciones de los resultados de diseño del tratamiento superficial; estas mediciones se realizarán a los efectos del asfalto convencional y el asfalto modificado con polímeros en laboratorio o en el trabajo de gabinete.

Evaluaciones: se va evaluar el comportamiento del asfalto modificado con polímero frente al asfalto convencional en el tratamiento superficial, los resultados obtenidos.

1.8.2. Técnicas de Muestreo

Las técnicas de muestreo de este trabajo de investigación serán analítico, estadístico descriptivo y experimental.

Se analizan el comportamiento del asfalto modificado con polímeros, evaluando principalmente la estabilidad y fluencia, como cambian respecto al asfalto convencional en un tratamiento superficial usado como ligante.

Se va hacer un análisis del asfalto modificado con polímeros cómo son las características adhesivas con los materiales granulares de nuestra región y su comportamiento en un tratamiento superficial bicapa se podría demostrar o verificar que los tratamientos superficiales bicapas con asfalto modificado; es la técnica más adecuada para el mantenimiento y conservación de una carretera.

Se aplica el método estadístico, que permite evaluar estadísticamente los resultados que se obtengan en la aplicación asfalto modificado con polímeros en un tratamiento superficial respecto a lo tradicional que se realiza en nuestra región.

1.8.3. Descripción de Equipos e Instrumentos

Para la extracción y preparación de muestras

Pala: empleada para la recolección de los agregados de la planta.

Bolsa o sacos: usada para transportar las muestras al laboratorio de tal manera de evitar pérdidas de material.

Moldes: usado para la obtención del cemento asfáltico y el polímero de una entidad pública como la alcaldía o una empresa.

Para la caracterización de los materiales pétreos del tratamiento superficial son:

Horno eléctrico: es utilizado para el secado de los agregados, y debe contar con una temperatura constante de 100 a 110°C.

Balanza: es usada para obtener los distintos pesos que se requiera, con una sensibilidad de 0,1 g.

Juego de tamices: el juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, lo cual contiene los tamices 3", 2 ½", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", No. 4, No. 10, No. 40, No. 200, tapa y fondo.

Desgaste mediante la máquina de los Ángeles: máquina de los Ángeles que sirve para determinar la resistencia del desgaste.

Figura 1.1. Juego de Tamices.



Fuente: <https://www.jorgeluxp.wordpress.com/2014/03/01/granulometría>.

Para la caracterización de los ligantes asfálticos del tratamiento superficial se usan:

Moldes: para colocar las muestras del cemento asfáltico.

Plato base: elemento que sirve como base del molde.

Termómetro: para verificar que el asfalto cumpla con las especificaciones.

Ductilómetro: equipo utilizado para realizar el ensayo de ductilidad.

Copa abierta de Cleveland: utilizado para el ensayo de punto ignición.

Parrilla eléctrica o mechero: usado para realizar el ensayo de punto de ignición del asfalto.

Soporte: para el soporte de la copa de Cleveland.

Viscosímetro: usado para el ensayo de viscosidad del cemento asfáltico.

Penetrómetro: usado para realizar el ensayo de penetración del cemento asfáltico.

Picnómetro: usado para el ensayo de peso específico del cemento asfáltico.

Para la dosificación y diseño del tratamiento superficial se usaran lo siguiente:

Moldes de Marshall: se usan las briquetas en el diseño del tratamiento superficial, la superficie de los moldes se aceitan ligeramente, colocar los moldes en una posición tal que sus ejes longitudinalmente queden en posición horizontal donde se aplicara un porcentaje (%) de asfalto modificado con polímeros y otro de agregado así sucesivamente, siguiendo el procedimiento de un tratamiento superficial y se realiza el mismo procedimiento con asfalto convencional seguido de agregado.

Figura 1.2. Molde de Marshall.



Fuente: <https://www.diytrade.com>.

1.8.4. Procedimiento de Aplicación

Con la información obtenida se procede a realizar la investigación previa, para ello es necesario contar con los materiales que se utilizan en la dosificación del tratamiento superficial bicapa que son el asfalto modificado con polímero y los agregados pétreos, necesariamente el asfalto convencional para obtener resultados más satisfactorios en la investigación .

Lo que se plantea realizar es evaluar el comportamiento del asfalto modificado con polímero en un tratamiento superficial bicapa, para ello se va a realizar el ensayo de estabilidad y fluencia utilizando el aparato de Marshall, si bien este método solo es aplicable a mezclas asfálticas, se podría adaptar para un tratamiento superficial en el cual se puede evaluar la resistencia a la deformación, así mismo observar las características adhesivas de los materiales del tratamiento superficial, para obtener mejores resultados se realiza un tratamiento superficial bicapa con asfalto convencional para evaluar el comportamiento del mismo, comparando uno respecto del otro.

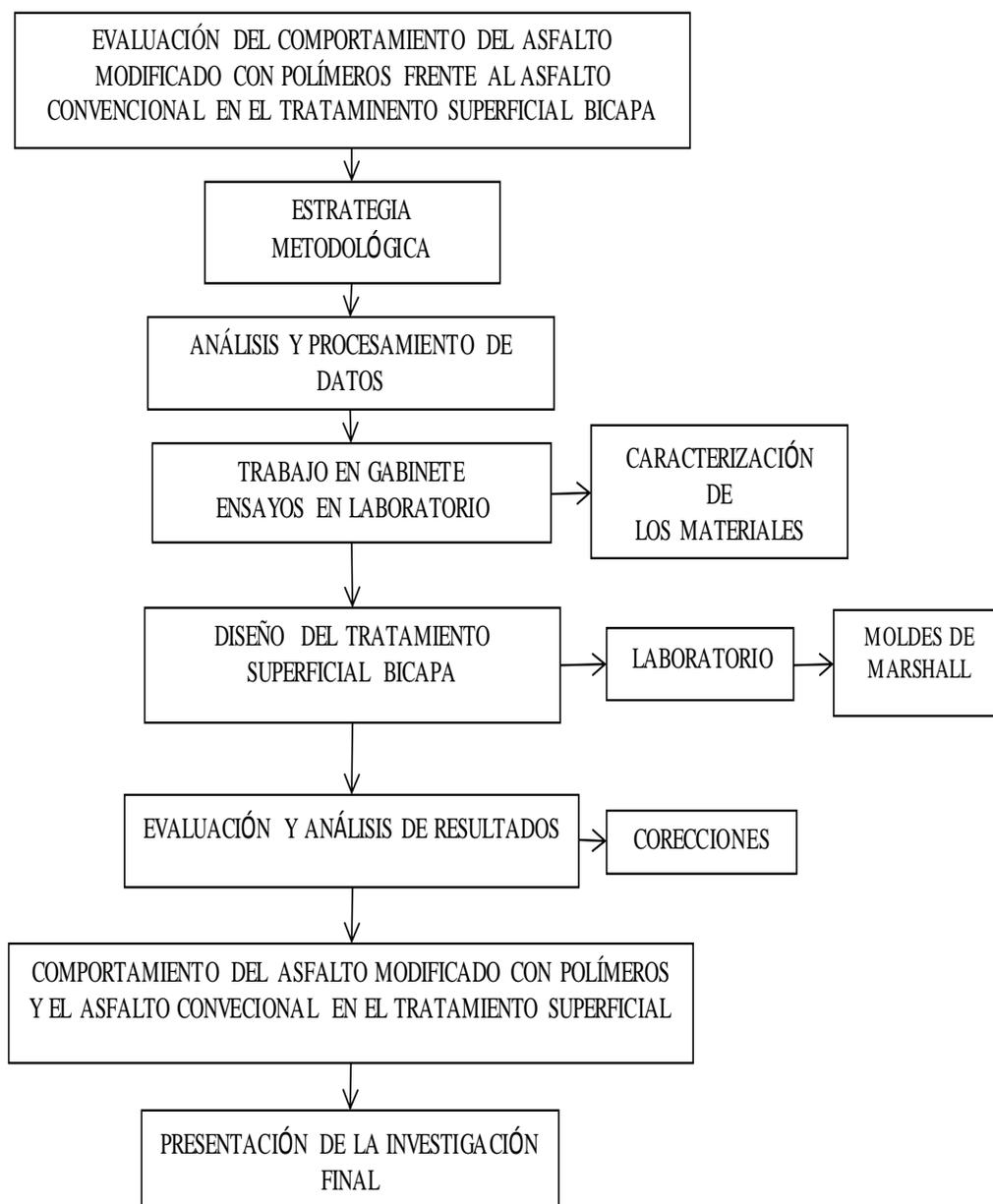
Para la dosificación del tratamiento superficial se van a utilizar las probetas o moldes de Marshall donde se va a desarrollar el proceso de ejecución del tratamiento superficial bicapa que tiene un espesor aproximado de 25 mm, por lo tanto este proceso es aplicable ya que dichas probetas tienen una altura de 80 mm y un diámetro interior de 106 ± 0.01 mm. Según lo especificado en la Norma AASHTO T245-97, para la dosificación del árido y el ligante se realizará en base al MÉTODO DE DISEÑO DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL A0705 descrito en el Manual de Ensayos de Suelos y Materiales asfálticos volumen 4A 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, describe específicamente cada paso que se debe realizar para la dosificación basadas en las AASHTO ESPECIFICACIONES “Standard Method of test for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus” condiciones fisicomecánicas que se desarrollan en el Ensayo del Marshall normal utilizado para la elaboración de cada capa en la compactación de la misma el número de golpes 50 veces debido a que esta mezcla asfáltica no es pesada para la elaboración de las briquetas del tratamiento superficial en estudio.

Para finalmente realizar la evaluación del comportamiento del asfalto modificado con polímeros mediante el ensayo para determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas también conocido como el ensayo de estabilidad y fluencia utilizando el aparato del Marshall (AASHTO T245-97) en donde se colocaran las briquetas del tratamiento superficial bicapa en la prensa con una velocidad adecuada y un carga establecida, se observa la deformación de las briquetas hasta el punto de ruptura, se realiza el mismo procedimiento para el tratamiento superficial con asfalto convencional para comparar los resultados más exactos y poder evaluar mejor el comportamiento del asfalto modificado en el tratamiento superficial.

También se realizan los ensayos del barrido y del vialit para evaluar el desempeño del tratamiento superficial y al mismo tiempo observar las características adhesivas de los agregados pétreos y los ligantes, que son los materiales que forman parte de este tipo de carpeta asfáltica.

Esta investigación se desarrolla experimentalmente en los laboratorios de Asfalto, Suelos, Tecnología de Hormigón de la Universidad “Juan Misael Saracho” en la Facultad Ciencias y Tecnología.

Figura 1.3. Esquema de la Investigación.



Fuente: Elaboración Propia.

Los ensayos que se realizan en laboratorio para la caracterización de los materiales es en base a lo establecido en las Normas AASTHO y la ASTM , también se hace uso del Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos volumen 4A elaborado por la Administración Boliviana de Carreteras, Se usan otras normas o manuales establecidos en otros países debido a que no existe una bibliografía amplia que contenga especificaciones claras para la construcción de un tratamiento superficial, los ensayos que se realizan principalmente son para el agregado pétreo grueso la granulometría, peso específico, peso unitario, desgaste de los Ángeles ,índice de lajas y caras fracturadas.

- Para la agregado fino equivalente de arena, peso específico y absorción y peso unitario
- Para el asfalto convencional y modificado con polímeros, los ensayos de ductilidad, viscosidad, penetración, peso específico, punto de ignición y punto de ablandamiento.
- Para la dosificación del tratamiento superficial bicapa se realizan en las probetas de Marshall como se lo explico anteriormente repitiendo cada ensayo $n=30$ veces para el asfalto convencional y el asfalto modificado con polímeros, siendo un total de ensayos $n=60$ veces para obtener mejores resultados.

Una vez obtenidos los resultados del trabajo en gabinete o en laboratorio se realiza evaluación del comportamiento y el análisis de resultados comparativo, interpretando de los efectos del asfalto modificado con polímeros y el asfalto convencional en el tratamiento superficial bicapa, apoyados en la estadística descriptiva, esto debido a la cantidad de ensayos realizados.

Tabla 1.2. Ensayos de Caracterización de los Materiales del Tratamiento Superficial.

	Ensayos a realizar	Cant.
Agregados	Granulometría	-
	Peso específico del agregado grueso (gravilla)	3
	Peso específico del agregado fino (arena)	3
	Peso unitario de agregado grueso (gravilla)	3
	Peso unitario de agregado fino (arena)	3
	Equivalente de arena	3
	Desgaste de los Ángeles	2
	Porcentaje de caras fracturadas	3
	Índice de lajas	2
	Convencional	
Asfalto	Penetración	3
	Ductilidad	3
	Punto de inflamación	3
	Punto de ablandamiento	3
	Peso específico	3
	Viscosidad	3
	Modificado	
	Índice de penetración	3
	Recuperación elástica (ductilidad)	3
	Peso específico	3
	Punto de inflamación	3
	Punto de ablandamiento	3
	Viscosidad	-
Total		55

Fuente: Elaboración Propia.

1.8.5. Procedimiento para el Análisis y la Interpretación de la Información

En el análisis estadístico se realiza la teoría de errores y el descriptivo con el conjunto de datos de los resultados que se obtienen en investigación.

El análisis estadístico se realiza según el procesamiento de la información obtenida para determinar parámetros estadísticos. Una vez obtenido los resultados de las pruebas en trabajo de gabinete o laboratorio del asfalto modificado con polímeros en el tratamiento superficial bicapa en la comparación con el asfalto convencional, se procede al tabulado y si es necesario corregir los resultados obtenidos en cada ensayo.

De los resultados que tengamos de la estadística realizada, se selecciona el valor más adecuado con este previo análisis. El valor aproximado de las distintas pruebas que se realiza a los materiales que forman parte del tratamiento superficial bicapa, es el promedio de los valores seleccionados.

Se debe elegir un valor donde la resistencia sea tolerable, es decir, mayor a la resistencia mínima del asfalto convencional del tratamiento superficial.

El análisis estadístico se realizara según el procesamiento de la información obtenida para determinar parámetros estadísticos se utilizan:

- **Media aritmética**

$$X = \frac{\sum xi}{n}$$

- **Mediana** valor medio de los resultados

- **Desviación estándar**

$$S = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}{n-1}}$$

- **Coefficiente de Variación**

$$C.V. = \frac{S}{X}$$

1.9. ALCANCE

La presente, investigación se realiza en el Laboratorio de Asfalto y Suelos de la Universidad “Juan Misael Saracho” de la Facultad de Ciencias y Tecnología; para ello nos centramos en cumplir con los objetivos de la investigación de demostrar que el asfalto modificado con polímeros aplicado en un tratamiento superficial bicapa es más eficiente, comparado necesariamente con el asfalto convencional aplicado en el tratamiento superficial en estudio.

Se describe de manera general de que se trata la investigación para la evaluación del comportamiento del asfalto modificado con polímeros en el diseño del tratamiento superficial bicapa comparado con el diseño tradicional en el tratamiento superficial planteando una nueva alternativa que permita conservar y mantener el desempeño de las redes viales.

Se investigan aspectos teóricos, donde se detallan las características y efectos de los materiales que se utilizan en el tratamiento superficial bicapa los agregados pétreos y los distintos asfaltos, el convencional y el modificado con polímeros aplicado en el tratamiento superficial bicapa que es el objeto de la investigación.

La elaboración del diseño del tratamiento superficial bicapa, se efectúa bajo el método de la dimensión mínima promedio el análisis y la evaluación del comportamiento del asfalto modificado con polímeros y el asfalto convencional que son utilizados como ligantes del tratamiento superficial, se realizan mediante el ensayo de estabilidad y fluencia del Marshall, ensayo del Vialit y el ensayo del barrido para la comparación respectiva.

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 y conservación 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 a la necesidad de realizar la modificación de asfaltos con polímeros obtenidos del hule molido de neumáticos 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 persiguen con la modificación de los asfaltos, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamientos) de las mezclas que componen 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 adhesivas¹.

2.2. TRATAMIENTO SUPERFICIAL BICAPA

El tratamiento superficial en forma general se define como una capa de rodadura constituida por una capa de ligante bituminoso seguida de una capa de gravilla debidamente compactada. Son una unidad de obra que ha tenido un desarrollo muy activo y que ha proporcionado una técnica de conservación de carreteras muy adecuada para una amplia gama de aplicaciones. Las aportaciones de los tratamientos superficiales

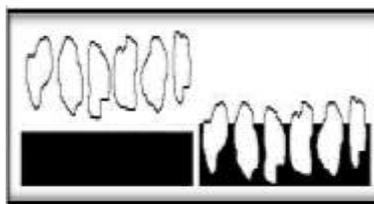
¹ **Fuente:** Ing. Liliana Janet Suárez De la Cruz Mezclas Asfálticas Modificadas con Hule Molido de Neumáticos Perú 2016 (pág.-1).

como capa de rodadura en contacto tanto con el neumático de los vehículos como por soportar las inclemencias climatológicas; pero quizás cabría destacar aquellas relacionadas con la seguridad y la economía, clasificar las aportaciones de mayor a menor importancia sabiendo que en cada caso este orden puede cambiar según el tipo de proyecto. Una de las causas por las que las carreteras más se deterioran es por la entrada de agua en el núcleo el pavimento, bien por un mal drenaje haciendo subir el nivel freático, o bien por entrada de agua a través de la superficie, con un tratamiento superficial impermeabilizamos, como consecuencia de la película de ligante, la superficie, por lo que evitamos esa entrada de agua a través de ella, evitando que el núcleo se deteriore y como consecuencia permanecerá con sus características iniciales durante más tiempo².

Los tratamientos superficiales se clasificación en:

Tratamiento superficial simple: Se define como una aplicación única de asfalto o emulsión asfáltica a cualquier superficie asfáltica o granular nueva o existente, seguida de una capa de agregado de tamaño uniforme variable dependiendo de las condiciones de transito esperadas, se usan principalmente como sello para restaurar la superficie deteriorada de pavimentos antiguos, su espesor aproximado es de 10 a 12,5 milímetros (mm), tamaño máximo del agregado utilizado.

Figura 2.1. Tratamiento Superficial Simple.



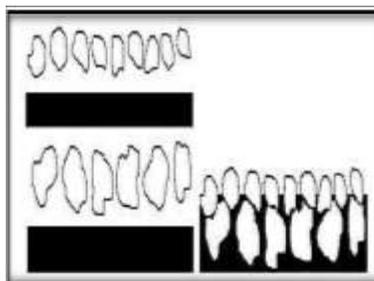
Fuente: Natalia Zúñiga García, Costa Rica.

Tratamientos Superficiales bicapa o dobles: Son dos riegos alternados y uniformemente distribuidos de ligante y agregado sobre una superficie acondicionada previamente. El tamaño medio del agregado de cada distribución sucesiva es la mitad o menos del tamaño medio de la capa precedente se utilizan principalmente en la construcción de calzadas, en obras de mejoramiento estándar de caminos con volúmenes

² **Fuente:** José Antonio Proas texto “Tratamiento Superficial con Gravilla” Año 2018 (pág.- 2).

de tránsito medianos a ligeros, su espesor aproximado es de 20 a 25 mm, tamaño máximo del agregado de la primera aplicación, en algunos casos se emplean como revestimiento de bermas en carreteras de alto tránsito.

Figura 2.2. Tratamiento Superficial Doble.

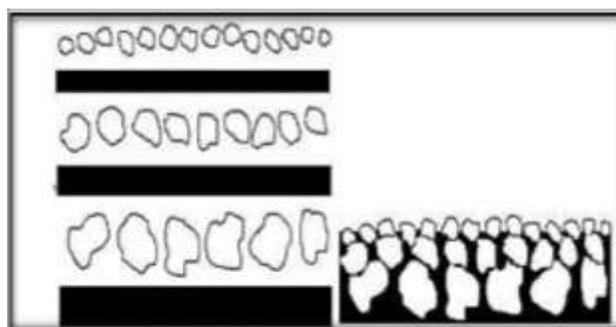


Fuente: Ángela Bernardita Queirolo Menz, Chile.

Tratamientos Superficiales Triples: Corresponde a más de dos tratamientos superficiales simples colocados uno sobre otro, descendiendo el tamaño del agregado en cada aplicación aproximadamente la mitad del tamaño de la capa anterior.

A nivel local se utilizan ocasionalmente para corregir tratamientos superficiales dobles mal terminados y construir calzadas de caminos con volúmenes de tránsito medio, alto en que se haga aconsejable un espesor mayor que el que proporciona un tratamiento superficial bicapa, su espesor puede llegar a ser superior a los 25 mm.

Figura 2.3. Tratamiento Superficial Triple.



Fuente: Ángela Bernardita Queirolo Menz, Chile.

El desarrollo de la investigación se enfoca más en el tratamiento superficial bicapa desde sus características principales funciones ventajas y desventajas.

2.2.1. Funciones del Tratamiento Superficial Bicapa

Las principales funciones de los tratamientos superficiales en forma general ya sea un tratamiento superficial simple, bicapa o triple es la de proteger la superficie de la base estabilizada de la acción erosiva y esfuerzos tangenciales producidos por los neumáticos de los vehículos.

- Proteger la estructura del camino de la acción del clima, principalmente de las infiltraciones de agua que podrían comprometer la estabilidad de las capas granulares.
- Asegurar un nivel de fricción mínimo entre neumático y superficie de rodadura.
- Proveer una superficie económica, para todo tipo de climas, para tráfico liviano.
- Proveer una superficie resistente al deslizamiento.
- Aquellos tratamientos superficiales y pavimentos que se han tornado resbaladizos debido a la exudación del asfalto (flujo de asfalto hacia arriba en un pavimento asfáltico, resultando en una película de asfalto sobre la superficie), desgaste y pulimiento de los agregados pueden ser tratados con agregados resistentes y angulosos para devolver la resistencia al deslizamiento.
- Proveer una capa temporal para una nueva base.
- Recuperar viejos pavimentos deteriorados por envejecimiento y fisuración térmica o por excesivas tensiones. Si bien aporta poca o ninguna resistencia estructural, un tratamiento superficial bicapa puede preservar la capacidad estructural existente al impermeabilizar y servir como una medida adecuada para detener el proceso de fisuración hasta una permanente rehabilitación del pavimento que sea completada.

Su ejecución en forma eficiente permite la obtención de un tratamiento superficial económico, de construcción simple y durable, aplicados sobre una base granular, Su efecto de impermeabilización permite que ésta conserve su capacidad de soporte adecuada.

Un tratamiento superficial bicapa adecuadamente diseñado y construido proporciona un considerable incremento en durabilidad y resistencia en comparación con un tratamiento simple, obteniéndose además, una mayor impermeabilidad, mayor resistencia y durabilidad que proporcionan los tratamientos bicapa los hacen especialmente adecuados

para condiciones de mayor sollicitación de tránsito, pendientes más pronunciadas y climas más severos.³

Figura 2.4. Tratamiento Superficial.



Fuente: <https://www.cueva del civil.com>.

2.2.2. Materiales

Los materiales que se utilizan para realizar un tratamiento superficial en forma general son el ligante y los agregados pétreos, para la selección de ambos se debe cumplir con especificaciones establecidas en normas que se utilizan en nuestro país como ASTM, AASHTO y el Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos elaborados por la Administradora Boliviana.

El tipo de asfalto o agregado para una aplicación específica depende de la disponibilidad de los materiales, clima u objetivo del tratamiento superficial, variables que deben considerarse en la selección de dichos materiales que pueden ser asfalto o cemento asfáltico convencional, modificado con polímeros, emulsiones bituminosas convencionales y modificadas.

Para realizar el tratamiento superficial bicapa se utiliza como ligante el asfalto convencional CA 85/100 y el asfalto modificado con polímeros SBS 60/85 y agregados que cumplan con las especificaciones establecidas, señalando en forma general sus principales características, ventajas y desventajas de estos materiales.

³ **Fuente:** Ing. Jorge Oswaldo Rivera Flores “Metodología para el diseño y construcción de tratamientos superficiales dobles para caminos de bajo volumen de tránsito” Universidad de el Salvador Junio 2016 (pág.- 38).

2.2.2.1. Ligante asfáltico

Para un buen comportamiento del tratamiento superficial, el asfalto a utilizar deberá cumplir al menos con los siguientes requisitos básicos:

- a) Al momento del riego debe ser lo suficientemente fluido tal que permita lograr una aplicación uniforme.
- b) En el momento de aplicar el agregado debe tener la viscosidad adecuada, a manera de desarrollar una adhesión rápida entre ligante y agregado, así como con la superficie existente.
- c) Al momento de dar al tránsito deberá tener la suficiente viscosidad para retener el agregado en su sitio y prevenir desprendimiento de partículas pétreas con el paso de los vehículos.
- d) Al seleccionar el grado de asfalto se deben considerar factores tales como características superficiales, temperatura del aire, humedad.

Cuando se aplique en la cantidad adecuada no debe exudar ni despegarse del agregado con los cambios de clima.

El asfalto es un compuesto termoplástico, derivado de la refinación del petróleo, está compuesto por dos fracciones principales; una fracción pesada denominada asfáltenos, y una ligera denominada máltenos, a su vez la parte malténica se subdivide en tres fracciones principales: parafinas, resinas y aceites aromáticos. Los constituyentes del asfalto interactúan entre sí formando un fluido de comportamiento visco elástico, los materiales asfálticos se emplean en la elaboración de carpetas asfálticas, morteros, riegos y estabilizaciones, ya sea para aglutinar los materiales ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o sub bases. También se puede usar para construir, fabricar o impermeabilizar otras estructuras, tales como algunas obras complementarias de drenaje, entre otras.⁴

⁴ **Fuente:** Guías de Laboratorio “Tratamiento Superficial” Chile Año 2017 (pág.-7).

Tabla 2.1. Ensayos de Laboratorio Normalizados para Asfaltos.

Ensayo de laboratorio para asfaltos	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 201 ASTM D 2170	En el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de una mezcla asfáltica, se ve influenciada por la trabajabilidad del asfalto que tenga dentro de esta misma una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los cementos asfálticos a viscosidad 60°C mide la consistencia de los cementos asfálticos.
Penetración	AASHTO T 49 ASTM D 5	Clasifica los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en decimas de milímetros, valores altos de penetración indicarán consistencias suaves.
Punto de inflamación	AASHTO T 48 ASTM D 92	Tiene por propósito identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta de Cleveland.
Ductilidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	Provee de una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento, bajo condiciones de velocidad y temperatura específica.
Punto de reblandecimiento	AASHTO T 53 ASTM D 36	La temperatura determinada como reblandecimiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanza un determinado estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia de la deformación del cemento asfáltico y además es también una prueba de viscosidad.
Ensayo de flotación	AASHTO T 50 ASTM D 139	Esta prueba caracteriza el comportamiento al flujo o consistencia de ciertos materiales bituminosos, que por su bajo grado de dureza pueden ser ensayados utilizando el método de penetración. Este ensayo es utilizado para medir la consistencia del residuo de destilación de los asfaltos rebajados de fraguado lento
Solubilidad en tricloroetileno	AASHTO T 44 ASTM D 2042	Este ensayo indica la porción de constituyentes cementantes activos en el asfalto ensayado es decir se utiliza para medir la pureza del asfalto. En esta prueba las sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos, se consideran impurezas.
Peso específico	AASHTO T 228 AASHT T 85 AASHTO 84	El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra pero existen dos razones por las cuales se debe conocer su valor y son. <ul style="list-style-type: none"> • Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen. • Es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado. Se determina normalmente por el método del picnómetro
Endurecimiento y envejecimiento	AASHTO T 51 ASTM D 113	Tiene por propósito exponer una o varias muestras a condiciones similares ocurridas durante las operaciones de planta de mezclado en caliente.

Fuente: The Asphalt Institute.

2.2.2.1.1. Asfalto convencional

Son preparados especialmente por presentar cualidades y consistencia propias para su uso directo en la construcción de pavimentos asfálticos.

Es un material ideal para aplicaciones en trabajos de pavimentación por sus propiedades aglutinantes, impermeabilizantes flexibilidad durabilidad y alta resistencia a los ácidos y álcalis en general se clasifican de acuerdo a su consistencia medida por la viscosidad dinámica o absoluta y por su penetración.

De acuerdo a esto los cementos asfálticos (CA) más comunmente usados son los siguientes:

El CA 40/50 en mastic para sellado de juntas de pavimento de hormigón, CA 60/70 en concreto asfáltico, CA 85/100 en concreto asfáltico y el CA 120/150 en los tratamientos superficiales; en esta especificación se refiere a las características de calidad que debe presentar el cemento asfáltico.

Los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes ellos son: viscosidad, viscosidad después del envejecimiento y penetración. Cada sistema abarca diferentes grados, cada uno con diferentes grados de consistencia.

La viscosidad es el sistema más usado en los Estados Unidos el poise es la unidad normal de medida para viscosidad absoluta donde un cemento asfáltico que tiene una viscosidad de 250 poises a 60 °C o 140 °F es conocido como asfalto blando y un cemento asfáltico con una viscosidad de 4000 poises a 60 °C o 140 °F es conocido como asfalto duro.

La viscosidad después del envejecimiento la idea es identificar cuáles son las características de viscosidad después que se ha colocado el asfalto en el pavimento, para poder simular el envejecimiento que ocurre en la planta asfáltica durante el mezclado el asfalto debe ser ensayo en el laboratorio, utilizando un ensayo patrón de envejecimiento.

Finalmente, la penetración que se basa en el ensayo de penetración el cual debe cumplir condiciones específicas donde se va a diferenciar si es un asfalto blando o duro.

Tabla 2.2. Especificaciones del Cemento Asfáltico Convencional.

Ensayos	Limites	Método	Reproductibilidad.	Encontrados
Penetración a 25°C, 100g. 0.1mm (T-201).	85-100	NBR-8576/ASTM D 5/ AASHTO T 201	± 4 dmm.	91
Viscosidad Sayboit Furoi a 135 °C. s (T-72).	85 min.	NBR-14950/ASTM D 68/ AASHTO T 72	± 2 %	120
Ensayo de la mancha @ 20 % Xilot (T-102).	negativo	-/ASTM D 2170/ AASHTO T102	ND	negativo
Punto de ablandamiento °C (T-53).	43 a 46	NBR-6560/ASTM D 36/ AASHTO T 53	± 3 °C	45
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm (T-51).	100 min.	NBR-6293/ASTM D 113/ AASHTO T 51	Consultar NBR.	> 100
Viscosidad de BROOKFIELD a 135 °C Cp.	214 min.	NBR-15184/ASTM D 4402 AASHTO T 316	ND	290
Viscosidad de BROOKFIELD a 155 °C Cp.	37 min.	NBR-15184/ASTM D 4402/ AASHTO T 316	ND	152
Viscosidad de BROOKFIELD a 177 °C Cp.	28 a 114	NBR-15184/ASTM D 4402/ AASHTO T 316	ND	58
Temperatura de mistura °C	Indicativo	Calculo	ND	141 a 147
Temperatura de compactación °C	Indicativo	Calculo	ND	130 a 136
Índice de penetración	-1.5 A 0.5	Calculo/ Calculo	ND	-1.1
Punto de inflamación copa abierta de Cleveland °C. (T-48).	230 min.	NBR-11341/ASTM D 92/ AASHTO T 48	± 18 °C	> 235
Solubilidad en tricloroetileno (T-44).	99 min.	NBR-14865/ASTM D 2042/ AASHTO T 44	± 0.28 %	99,9
Densidad a 25°C (T-228)	0.99 min.	NBR-6298/ AASHTO T 228	± 0.005	1.012
Ensayos sobre el residuo película delgada (TFOT),32 mm, 189°C (AASHTO T 240)				
R(TFOT)-pérdida de masa (T-240)	1max.	NBR-15235/ASTM D 2872/ AASHTO T 240	Consultar NBR.	0.41
R(TFOT)- penetración del residuo, % de la penetración original	50 min.	Calculo	ND.	0.55
R(TFOT)-perdida por calentamiento (T-179) %	1max.	Calculo / AASHTO T 179	± 4 dmm.	0.42
Densidad a 25°C c/25°C (T-228)	1 a 1.05	NBR-6298/ AASHTO T 228	± 0.005	1

Fuente: Guía de Prácticas de Campo y Normas de Calidad UMSA 2006.

Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una gama amplia de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito, es susceptible 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 estas razones se modifica el cemento asfáltico para mejorar sus propiedades mecánicas, en especial su recuperación elástica.

En la actualidad los grandes volúmenes de tráfico sobre los criterios de diseño vehicular y el exceso de carga, así como el incremento en la presión de inflado de las llantas y condiciones climáticas, hacen que utilizar asfaltos convencionales en la construcción de carreteras actualmente no satisfagan sus expectativas tal como cumplir un determinado periodo de servicio, es decir, menor resistencia al envejecimiento, la poca durabilidad de un camino reflejándose en deformaciones y figuraciones dentro de una carpeta asfáltica, sin embargo estos problemas son causados además por la selección de materiales en los diseños, mal proceso de construcción, mantenimiento y por la baja calidad del ligante y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

Por ejemplo con asfaltos convencionales, aún con los grados más duros no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito, especialmente cuando se afrontan condiciones de temperatura alta, además con asfaltos con mayor dureza se corre el riesgo de formaciones de agrietamientos por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas.

Una solución evidente fue mejorar las características de los asfaltos convencionales para mejorar su comportamiento en los pavimentos; ello dio origen a nuevos asfaltos que fueron denominados “asfaltos modificados con polímeros”⁵

⁵ **Fuente:** Revista EIA, ISSN 1794-1237 Diciembre 2009 Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia) “Modelación del Comportamiento Reológico de Asfalto Convencional y Modificado con Polímero Reciclado, Estudiada desde la Relación viscosidad-temperatura” (pág. 125-137).

2.2.2.1.2. Asfalto modificado con polímeros

Se denomina asfaltos modificados a los cuales se les adiciona en forma de disolución, sustancias de alto peso molecular denominadas polímeros, 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 mecánicas y reológicas buscando:

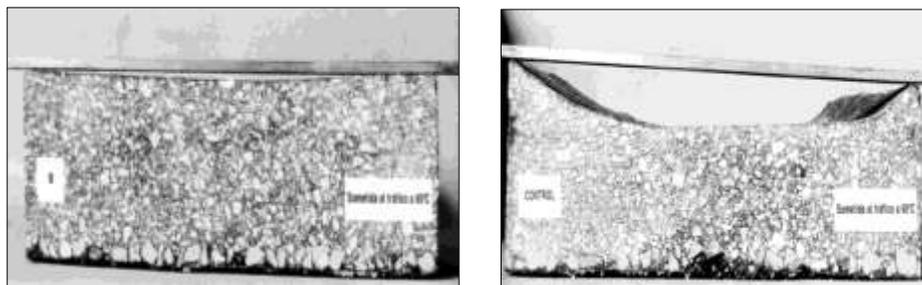
- Disminuir la susceptibilidad térmica, disminuir la fragilidad en el tiempo de frio y aumentar la cohesión en tiempo de calor.
- Disminuir la susceptibilidad a los tiempos de aplicación de la carga.
- Aumentar la resistencia a la deformación permanente y a la rotura en un rango más amplio de temperaturas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

Logrando estos objetivos el asfalto se puede destinar a:

- Recubrimientos para carreteras de alto tráfico.
- 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.

Figura 2.5. Comparación de Asfalto Modificada con Polímero & Convencional.



Fuente: <https://www.monografias.com/trabajos15/asfaltos-modificados/asfaltos-modificados.shtml>.

Como puede observarse existe una gran diferencia entre los resultados obtenidos sobre una muestra de mezcla asfáltica convencional y otra con una mezcla asfáltica modificada con polímeros, la mezcla modificada puede hacer frente al ahuellamiento con una marcada diferencia sobre la otra muestra.

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y la otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella. 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 tanto a bajas como a altas temperaturas, para mezclas resistentes y rugosas para capas delgadas como un tratamiento superficial. La utilización de polímeros en este tipo de mezclas es para aumentar la durabilidad. Estos tipos de mezclas de pequeño espesor surgen, dada la rapidez de aplicación que reduce al mínimo los tiempos de cortes de tráfico; estas se utilizan para trabajos de conservación de rutas y vías urbanas, que exigen mezclas con alta resistencia y con una buena textura superficial, 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.

Entre los cuales tenemos Etileno-acetato de vinilo (EVA), Etileno-acrilato de metilo (EMA), Polietileno que tiene buena resistencia tanto a altas como a bajas temperaturas (PE), Polipropileno (PP) y finalmente el Poliestireno que No son casi usados.

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 más utilizado de los polímeros 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.

Son ejemplos resinas epoxi; éstas se usan en grandes porcentajes, mayores al 20%, son muy costosas y se utilizan para casos especiales (ejemplo: playa de camiones).⁶

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.

El proceso apropiado de modificación es variable de acuerdo al tipo de polímero, polímeros del tipo SBS requieren etapas de molienda y otros como el tipo EVA requieren solamente proceso de agitación.

Se mencionan de manera general las etapas importantes del proceso de modificación.

Para tipo I. SBS:

Etapas 1: evaluar el asfalto base.

Etapas 2: incrementar la temperatura del asfalto.

Etapas 3: proceso de molienda y/o homogeneización asfalto - polímero. Se requiere de un molido de alto corte.

Etapas 4: controlar la calidad a través de microscopía óptica.

Etapas 5: finalización de la reacción. Control de calidad realizando corrida de pruebas físicas para asfaltos modificados después de 24 horas de reacción.

Las temperaturas de mezclado son de 180° C a 190° C. Y el tiempo de mezclado varía dependiendo de la dispersión del polímero.

Para tipo II. Látex SBR.

La operación de modificación se lleva a cabo a una temperatura de 160° C a 170° C la adición del látex se realiza mediante una bomba de diafragma que puede ser adicionada mediante aire o motor eléctrico y el tiempo de agitación depende del equipo empleado.

⁶ **Fuente:** <http://www.monografias.com/trabajos15/asfaltosmodificados/asfaltos-modificados.shtml>

Los tiempos normales para todo el proceso del látex y mezclado oscilan entre 1.5 y 2 horas.

Para tipo III. EVA.

En esta no se requiere un molino, solamente es con agitación y temperatura, en un tiempo corto el polímero se funde y se incorpora al asfalto.

Por lo regular son 2 horas a 180° C, el control de calidad se observa mediante la prueba visual para polímeros del tipo III. Algunos productos de asfalto polimerizado utilizan procesos especiales para lograr compactibilidad entre el polímero y el asfalto. Cuando la tecnología es apropiada, las propiedades del ligante pueden reducir el efecto de las roderas, el desprendimiento de pétreos el agrietamiento térmico o fluencia de la mezcla, así como el incremento en la vida útil del pavimento, debido a una mayor estabilidad y resistencia a la fatiga.

Los polímeros compactibles producen rápidamente un asfalto estable usando técnicas convencionales de preparación. Estos sistemas convencionales son grandes recipientes de mezclado con paletas agitadoras a velocidades lentas o recipientes especiales que favorecen la recirculación con agitadores mecánicos de corte de gran velocidad.

El polímero puede venir en polvo, en forma de pequeñas bolitas (pellets) o en grandes panes; la temperatura de mezclado depende del tipo de polímero utilizado, cada polímero tiene un tamaño de partícula dispersa óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de esta, el polímero solo actúa como un filler (mineral como: cemento, cal talco, sílice, etc.) y por debajo de esta, pasan a estar muy solubilizados y aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.⁷

2.2.2.1.2.1. Ventajas y desventajas

Los asfaltos modificados con polímeros se han empleado con frecuencia en tratamientos superficiales de riego con gravilla aplicados a pavimentos fisurados. Asimismo, han

⁷ **Fuente:** Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco Pavimentos Asfálticos de Alto Modulo México 2016 (Pág-48).

tenido una notable difusión como material para sellado de fisuras y juntas de pavimentos, como tratamiento de impermeabilización de materiales susceptibles al agua y por último como ligante en mezclas asfálticas de distintos tipos, fabricadas en caliente.

Se han realizados varios ensayos como el de “recuperación elástica” basados en el ensayo de ductilidad, que han demostrado que los asfaltos modificados con polímeros son capaces de asimilar mayores tensiones iniciales que las mezclas realizadas con una mezcla convencional.

Los asfaltos modificados con polímeros y las emulsiones con ellos fabricadas, son adecuados para riegos en vías de fuerte intensidad de tráfico y/o en zonas climáticas de temperaturas extremas, porque el ligante debe tener una buena cohesión en un amplio intervalo de temperatura y una buena susceptibilidad térmica, con el fin de evitar exudación del ligante durante el verano, así como la pérdida de gravilla en el invierno.

Ventajas

Se pueden enumerar una serie de ventajas y desventajas de los asfaltos modificados con polímeros que son las siguientes:

-Disminuye la susceptibilidad térmica.

-Se obtienen mezclas más rígidas a altas temperaturas de servicio reduciendo el ahuellamiento.

-Se obtienen mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio reduciendo el fisuramiento.

-Disminuye la exudación del asfalto por la mayor viscosidad de la mezcla, su menor tendencia a fluir y su mayor elasticidad.

a) Mayor elasticidad: debido a los polímeros de cadenas largas.

b) Mayor adherencia: debido a los polímeros de cadenas cortas.

c) Mayor cohesión: el polímero refuerza la cohesión de la mezcla.

d) Mejora la trabajabilidad y la compactación : por la acción lubricante del polímero o de los aditivos incorporados para el mezclado.

e) Mejor impermeabilización: en los sellados bituminosos, pues absorbe mejor los esfuerzos tangenciales, evitando la propagación de las fisuras.

f) Mayor resistencia al envejecimiento: mantiene las propiedades del ligante, pues los sitios más activos del asfalto son ocupados por el polímero.

g) Mayor durabilidad: los ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio, demuestran su excelente resistencia al cambio de sus propiedades características.

-Mejora la vida útil de las mezclas.

-Fácilmente disponible en el mercado.

-Permiten mayor espesor de la película de asfalto sobre el agregado.

-Mayor resistencia al derrame de combustibles.

-Reduce el costo de mantenimiento.

-Disminuye el nivel de ruidos: sobre todo en mezclas abiertas.

-Aumenta el módulo de la mezcla.

-Permite la reducción de hasta el 20% de los espesores por su mayor módulo.

-Mayor resistencia a la flexión en la cara inferior de las capas de mezclas asfálticas.

-Permite un mejor sellado de las fisuras.

-Buenas condiciones de almacenamiento a temperaturas moderadas.

-No requieren equipos especiales.

Desventajas

-Alto costo del polímero.

-Dificultades del mezclado: no todos los polímeros son compatibles con el asfalto base (existen aditivos correctores).

- Deben extremarse los cuidados en el momento de la elaboración de la mezcla.
- Los agregados no deben estar húmedos ni sucios.
- La temperatura mínima de distribución es de 145°C por su rápido endurecimiento.

Es evidente que la mayor desventaja de estos es el alto costo inicial del asfalto modificado; sin embargo, si hacemos un análisis del costo a largo plazo (es decir, la vida útil de la vía), podemos concluir que el elevado costo inicial queda sobradamente compensado por la reducción del mantenimiento futuro y el alargamiento de la vida de servicio del pavimento.

Otras propiedades que el asfalto modificado mejora respecto del asfalto convencional son:

- Mayor intervalo de plasticidad (Diferencia entre el punto de ablandamiento y el Fraass).
- Mayor cohesión.
- Mejora de la respuesta elástica.
- Mayor resistencia a la acción del agua.
- Mayor resistencia al envejecimiento.

Las propiedades que éstos imparten dependen de los siguientes factores:

- Tipo y composición del polímero incorporado.
- Característica y estructura coloidal del asfalto base.
- Proporción relativa de asfalto y polímero.

Para que los asfaltos con polímeros consigan las prestaciones óptimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base (es necesario que los polímeros sean compatible con el material asfáltico), el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje.⁸

2.2.2.1.2.2. Estructura

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases ; una, formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y otra por asfalto, en las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el

⁸ **Fuente:** <http://www.monografias.com/trabajos15/asfaltosmodificados/asfaltos-modificados.shtml>.

asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella. Esta micro morfología bifásica y las interacciones existentes entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto parecen ser la causa del cambio de propiedades que experimentan los asfaltos modificados con polímeros.

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 tanto a bajas como a altas temperaturas.

El proceso de elaboración del asfalto modificado se realiza con los siguientes pasos:

- Se transfiere asfalto al tanque de modificado.
- Una vez terminado el proceso de transferencia de asfalto, se inicia la agitación.
- Se somete el asfalto a calentamiento a una temperatura controlada de 180° C a 190° C
- Se dosifica el polímero dependiendo del volumen del tanque, para preparar un concentrado no superior al 5% de polímero.

El polímero se agrega al molino a una velocidad de 20 a 25 kg. /min.

El asfalto debe mantenerse en un rango de temperatura de 180° C a 190° C al mismo tiempo es agitado por aproximadamente 5 horas en condiciones de agitación constante y en rango de temperatura antes mencionado.

Después de que el periodo de dispersión ha transcurrido, se debe observar que el polímero esté incorporado completamente al asfalto.

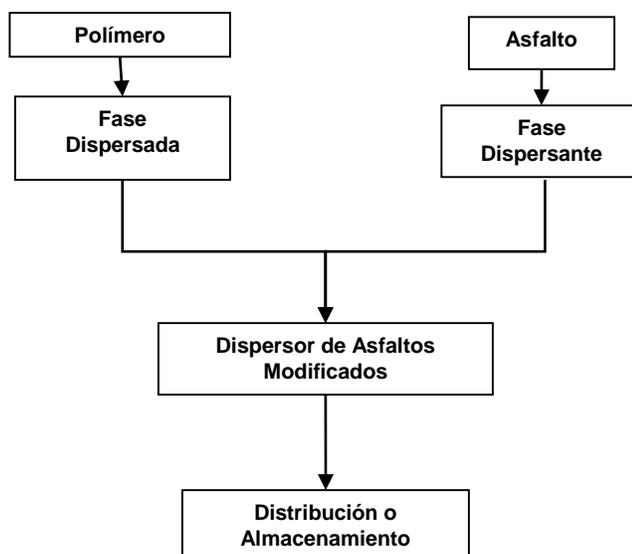
El asfalto se debe controlar a una temperatura de 180° C a 190° C por una hora, antes de pasar al proceso de emulsificación.

Debido al proceso de fabricación, basado en una reacción química permanente, el asfalto modificado no presenta separación del polímero, permitiendo que su manejo sea sin complicaciones además asegura un excelente rendimiento del producto una vez que es colocado.

Para almacenar asfalto que ha sido modificado, no se requieren tanques especiales ni sistemas de agitación sin embargo, es recomendable que los tanques se encuentren limpios, para no diluir el producto y perder alguna de sus propiedades de alto rendimiento.

El asfalto modificado normalmente se mantiene a una temperatura que fluctúa entre los 150° C y 180 ° C al almacenarlo por periodos cortos de tiempo (2 a 3 días). Si por alguna razón se tuviera que almacenar el asfalto por un periodo mayor a 3 días y menor a tres semanas, la temperatura debería mantenerse entre 125° C y 145 ° C, ya que al exponer el asfalto modificado a más de 150° C por periodos largos de tiempo puede provocar, bajo ciertas circunstancias, la ruptura de la estructura del polímero, generando así la degradación del producto, además de que sería una operación muy costosa.

Figura 2.6. Esquema de Fabricación de un Asfalto Modificado con Polímeros por Vía Húmeda.



Fuente: Ing. Liliana Janet Suárez De la Cruz. Control de Calidad de Laboratorio y Planta de Asfaltos Carlos Amorós Heck Contratistas Generales S.A.

El punto crítico para determinar las temperaturas de trabajo (mezclado y tendido) de una mezcla asfáltica, es la manejabilidad del concreto asfáltico durante el proceso de compactación, que debe fluctuar entre los 135° C y 155 ° C.⁹

⁹ **Fuente:** Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco Asfaltos Modificados y Pruebas de Laboratorio para Caracterizarlos México 2004 (pág-42).

Tabla 2.3. Especificaciones del Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.

Ensayo	Método	Unidad	Especificación
Penetración muestra original (100g, 5s, 25°C)	AASHTO T49	0.1 mm	40 - 70
Punto de reblandecimiento A&B, min	AASHTO T 53	°C	60
Fuerza – ductilidad	UNE 13589	°C	≥ 2 a 5 °C
Viscosidad rotacional Brookfield, a 135°C sp. 21, máx.	AASHTO T T2	cP	3000
Viscosidad rotacional Brookfield, a 155°C sp 21, máx.			2000
Viscosidad rotacional Brookfield, a 177 °C, sp 21, máx.			1000
Recuperación elástica 25 °C, 20 cm, min.	AASHTO T 301	%	85
Punto de inflamación – copa abierta de Cleveland, min.	AASHTO T 48	°C	235
Estabilidad de almacenamiento Dif. A y B Dif. Pen.	-	°C	≤ 5 ≤ 9
Punto de fragilidad de Fraas	IP 80 - 53	°C	≤ -12
Ensayo del residuo (RTFOT)			
Ensayo de película delgada rotatoria (variación de masa) – 163 °C, 85 min. Per/Cal, máx.	AASHTO T 240	% de masa	1.0
Porcentaje de penetración original (100g, 5s, 25 °C) min.	AASHTO T 49	%	60
Recuperación elástica, 25 °C, 20 cm, min.	AASHTO T 301	%	80
Reducción del punto de reblandecimiento A&B anillo bola, máx.	AASHTO T 53	°C	5
Aumento punto de reblandecimiento A&B anillo bola, máx.	AASHTO T 53	°C	7

Fuente: [https://www.stratura. /producto/betuflex \(60/85\).](https://www.stratura. /producto/betuflex (60/85).)

El uso de asfaltos modificados con polímeros en tratamientos superficiales, permite una mejor retención del material pétreo, permitiendo a la vez un menor tiempo de espera para su puesta en servicio, y una mejor performance en zonas de altura, debido a que el asfalto modificado ofrece una mayor resistencia a la gradiente térmica, a la radiación ultravioleta, y a la tracción de las ruedas de los vehículos, uno de los elastómeros más empleados es el Estireno-Butadieno-Estireno (SBS). Este tipo de tratamientos superficiales, ofrecen excelentes resultados para vías de fuerte intensidad de tráfico y/o zonas climáticas de temperaturas extremas.

2.2.2.2. Agregados pétreos

Los áridos podrán ser naturales o artificiales, siempre que cumplan con las especificaciones requeridas, no deben ser susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración física-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que se puedan dar en la zona de empleo. Considerando su posición en la calzada, en contacto directo con los neumáticos y la intemperie, el agregado seleccionado para el tratamiento debe cumplir ciertas exigencias normativas y características en cuanto a tamaño, dureza, forma, limpieza y propiedades superficiales.

El agregado debe ser tan uniforme como sea económicamente practicable de manera que el tratamiento superficial tenga esencialmente una sola capa de partículas. La mayoría de los agregados duros pueden usarse con éxito para tratamientos superficiales.

La resistencia a la abrasión de los agregados puede ser medida con el ensayo de los Ángeles ASTM C131; AASTO T96 para tratamientos superficiales, el desgaste por abrasión no debe superar el 40%.

a) Forma: Es una característica importante por dos motivos: primero, porque las partículas minerales que tienen forma poco cúbica tienden a romperse con más facilidad que las cúbicas y, segundo, porque cuanto más lajosas o achatadas sean las partículas, más habrá que variar las reglas normales de dosificación, ya que tienden a apoyarse sobre la mayor dimensión y por lo tanto, en la dosificación habrá que hablar de la “media dimensión menor”, en lugar de la dimensión media.

b) 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.

c) Granulometría: se elegirán según el cuadro recomendado en el pliego general pero también según los tamaños que tengamos en la zona, siempre utilizando ciertas normas.

No repetir tamaños de capas de un mismo tratamiento superficial

El tamaño más grueso de agregado se utiliza para la primera capa del tratamiento superficial

Las especificaciones granulométricas de los agregados indicando el tipo de material y su respectiva gradación corresponderán a lo establecido en los estudios del proyecto o será la que determine el supervisor.

Tabla 2.4. Rangos de Gradación para Tratamientos Superficiales.

N° de tamiz estándar	Abertura (mm).	Designación de la granulometría					
		A	B	C	D	E	F
1 ½ "	37.5	100					
1 "	25	90-100	100				
¾ "	19	0-35	90-100	100			
½ "	12.5	0-12	0-35	90-100	100		
⅜ "	9.5	-	0-12	0-35	85-100	100	100
N° 4	4.75	-	-	0-12	0-35	85-100	85-100
N° 8	2.36	-	-		0-8	0-23	-
N° 200	0.075	-	0-1	0-1	0-1	0-1	0-10

Fuente: Manual de Especificaciones para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR– 2010).

d) Limpieza: la falta de limpieza del árido puede ser causa determinante de una mala adhesividad por lo tanto, se presenta una pérdida prematura de gravilla, también puede contribuir a una rotura demasiado rápida de la emulsión, consiguientemente, a una mala terminación del tratamiento superficial y en todos los casos dudosos es aconsejable proceder a un lavado previo de los áridos.

e) Resistencia al Pulido: es necesario indicar la gran importancia que en los tratamientos superficiales tiene la conservación de la textura superficial de los áridos.

El “Transport and Road Research Laboratory” ha desarrollado un ensayo de pulido acelerado que ha sido adoptado por numerosas administraciones. En este ensayo, mediante la aplicación de dos abrasivos y el paso de una rueda neumática sobre las probetas formadas por un mosaico de partículas minerales, se determina la evolución del coeficiente de rozamiento medio con un péndulo a lo largo de 6 horas. El valor final es el Coeficiente de Pulido Acelerado (C.P.A), en los riegos, según la responsabilidad, se exigen valores comprendidos entre 0.4 y 0.55%.

f) Adherencia: la buena adherencia entre agregado y el ligante, la capacidad para conservarla, son esenciales para obtener un buen tratamiento superficial. La adherencia, sin embargo, puede ser afectada por condiciones climáticas de humedad y/o suciedad en los agregados, que deben ser controladas para asegurar el éxito del tratamiento.

h) Activación: frente a determinadas condiciones de humedad y contaminación del agregado, o en carreteras de elevada intensidad de tránsito, con el objetivo de favorecer la adherencia entre el ligante y el agregado, es posible la utilización de activantes.

Los activantes son productos que permiten mejorar el contacto entre el árido y el ligante, asegurando una buena adherencia.

Entre los métodos de activación que suele utilizarse se destacan:

Los más destacados son los siguientes:

- Pre tratamiento o mojado previo de los áridos con un activante.
- Pre envuelto del árido con ligante fluido.

-Activación en masa del ligante a emplear.

i) Desintegración del agregado: La desintegración de los agregados se determinará mediante el ensayo de durabilidad ASTM C 88; AASHTO T 104, en el cual la norma exige que para la pérdida en sulfato de sodio (Na_2SO_4), se aceptará un 12% como máximo y para la pérdida en sulfato de magnesio ($MgSO_4$), un 18% como máximo.

j) Cubicidad de Partículas: La Cubicidad de los agregados pétreos se determinará mediante los ensayos siguientes:

-Partículas Chancadas % mínimo 7.

-Partículas Lajeadas % máximo 10.

k) Propiedades Químicas: La adhesividad está condicionada por las características minerales del árido y por la composición del ligante. Aparte de ello colaboran en el fenómeno de adhesividad otra serie de factores físicos como son la textura superficial del árido y su limpieza, En todos estos aspectos sería deseable lograr una caracterización química y mineralógica del árido más completa y científica que la obtenida mediante los actuales conceptos de áridos calizos o silicios, los cuales son insuficientes para preconizar una buena o mala adhesividad con emulsiones. Otro factor muy importante, derivado de la propia composición del árido, es el de su inalterabilidad¹⁰.

¹⁰ **Fuente:** Ing. Nancy Aguilar Mestas, Ing. Gina Christal Salas Chávez “Comparación Entre el Tratamientos Superficiales Bicapa en la Rehabilitación de una Carretera” Universidad Católica de Santa María Arequipa-Perú 2012 (Pág.- 42).

Tabla 2.5. Ensayos de Laboratorio Normalizados para Agregados.

Ensayo 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 la carpeta asfáltica es de primordial importancia, porque en función de ellas se conoce de antemano que clase de textura tendrá la carpeta.
Desgaste de los Ángeles	AASHTO T 96 ASTM C 131	El objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica es esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da idea de la forma en la que se comportan los agregados bajo efectos de la abrasión causada por el tráfico, además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando sulfato de sodio	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, el valor del error permisible no debe ser mayor de 0,5%.
Equivalente de arena	AASHTO T 176 ASTM 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido de separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena.
Cubicidad de partículas	ASTM D 692	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que deben evitarse partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos y finos	AASHTO T84 AASHTO T 85 ASTM C – 127 ASTM C – 128	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyente, no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contiene las partículas que son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con la condición será cuando se evalúe el comportamiento del agregado con el agua durante un periodo largo tal que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.
Peso unitario y vacío	AASHTO T 19 ASTM C 29M	En la práctica el valor de peso unitario es, muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de mezclas de agregados para mezclas de superficie en pavimentos, puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del proctor) en la cual se grafican las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las coordenadas.

Fuente: The Asphalt Institute.

2.3. MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN PARA UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL BICAPA

Para determinar las cantidades de ligante asfáltico y agregado a utilizar, existen diversos métodos, basados fundamentalmente en resultados y observaciones prácticas.

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 bicapa o un tratamiento superficial triple.

2.3.1. Método de la Dimensión Mínima Promedio

Este método está basado en el desarrollado por el County Roads Board de Victoria, Australia y modificado por N. W. Mcleod, el cual se desarrolló a partir de la hipótesis del neozelandés F.M Hanson; al igual que el método de la Shell, siendo el método que se utiliza actualmente en Chile. Sin embargo, si se utiliza agregado graduado no se cumple necesariamente con los contenidos de vacíos observados por Hanson, por esto se realiza una corrección en función del contenido real de vacíos del agregado.

a) Dosis de agregado: el agregado una vez compactado, debe cubrir uniformemente la superficie del pavimento. Por ello, el cálculo de esta dosis se basa solamente en condiciones geométricas del mismo (tamaño y densidad).

Para determinar la dosis de agregado en kg/m², se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = M ((1 - 0.4V) H \times Drs. \times E)$$

$$H = \frac{Tm}{1.09 + (0.0118 \times IL)}$$

$$V = 1 - \frac{Das}{Drs}$$

Donde:

C= Dosis de agregado en kg/ m²

M= factor de corrección evaluado en base del clima y el tránsito recomendado en el país entre un rango de 0.9-1. Según la experiencia utilizan 1.

V= Vacíos en el agregado, condición suelta (expresado en forma decimal).

D_{as} = Densidad aparente suelta del árido (kg/dm^3).

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

E = Factor de desperdicio, corrige la dosis por rebote de partículas y depende del tamaño del agregado.

H = Dimensión mínima promedio (mm).

T_m = Tamaño medio del agregado, abertura del tamiz teórico por el cual pasa el 50% del agregado (mm).

IL = Índice de lajas (%).

Tabla 2.6. Factor de Desperdicio.

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 Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos volumen 4A.

b) Dosis de ligante: su cálculo se basa en parámetros geométricos del agregado y Parámetros del ligante.

Para determinar la tasa de aplicación de ligante en sellos simples, se utiliza la siguiente Ecuación:

$$B = Kx \left(\frac{0,40xHxTxV + S + A}{R} \right)$$

Donde:

B = Dosis de ligante en ($1/\text{m}^2$).

K = Factor de corrección que debe ser evaluado por experiencia del diseñador con base en el clima. 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.

H = Dimensión mínima promedio (mm).

T= Factor de tráfico que incorpora el efecto del tráfico en el embebido del agregado

V= Vacíos en el agregado, en condición suelta (expresado en forma decimal)

S= Factor de corrección por textura superficial (l/m^2).

A= Factor de corrección por absorción de asfalto en el agregado (l/m^2). Este factor se desprecia salvo que el agregado sea claramente absorbente.

R= Porcentaje de asfalto residual de la emulsión (expresado en forma decimal).

Tabla 2.7. Factor Tránsito de Corrección por Nivel de Tráfico.

Tráfico (veh./día)	Factor (T)
<100	0.85
100 - 500	0.75
500 - 1000	0.70
1000 - 2000	0.65
> 2000	0.60

Fuente: Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos volumen 4A.

Tabla 2.8. Factor de Corrección S por Textura Superficial.

Textura superficial	Corrección S (l/m^2)
Pavimento asfáltico con exceso de asfalto superficial	Hasta -0.3
Pavimentos asfálticos de textura cerrada	0.00
Pavimentos asfálticos de textura abierta	0.1-0.5
Base granular imprimida	0.0-0.2

Fuente: Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos volumen 4A.

Es necesario realizar una corrección adicional para incorporar el efecto del tráfico pesado, ya que el factor T de corrección por tráfico sólo incorpora el efecto del número de vehículos que circulan por la vía, independientemente de su peso. El Factor de

corrección T, deberá ser definido con base en estudios sobre el comportamiento de sellos para distintas condiciones de tráfico.

Dosis de ligante en condiciones especiales: Se recomienda disminuir la dosis de ligante hasta en un 10% en condiciones donde el sello sea más susceptible a exudar, tales como:

- Pendientes pronunciadas (>8-10%). En el carril de ascenso, el tráfico lento aumenta la tendencia a exudar.
- Caminos con elevado flujo de vehículos pesados.

Para el diseño de tratamientos bicapa o triples, el Instituto del Asfalto presenta un método basado en el diseño de tratamientos simples:

Dosis de agregados: Los parámetros que se toman en cuenta son los siguientes

- Diseñar cada capa del tratamiento como si fuera un tratamiento simple.
- Cada capa debe tener un tamaño nominal no superior a la mitad del tamaño nominal de la capa inferior.
- No se debe corregir por pérdida de agregados.
- Corregir la dosis en terreno usando el factor M (clima y tránsito).

Dosis de ligante: Los parámetros que se toman en cuenta son los siguientes

- Diseñar cada capa del tratamiento como si fuera un tratamiento simple
- Después de la primera capa, no se debe corregir por textura superficial.
- Corregir la dosis en terreno usando el factor K (clima).

Tabla 2.9. Distribución de Dosis Total del Ligante, en Capas Individuales.

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

Fuente: Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos Volumen 4A.

2.3.2. Regla del Décimo

También conocido con el nombre del método de Linckenhey este método se basa en los siguientes parámetros:

D = tamaño máximo de agregado (mm)

d = tamaño mínimo de agregado (mm)

$$\Delta = \frac{(D + d)}{2}$$

Δ = tamaño medio (mm)

Q = cantidad de agregados necesarios (kg/m²)

L = cantidad de ligante asfáltico residual necesario (L/m²)

Con esta metodología, existen dos condiciones básicas; una se utiliza cuando el agregado tiene un Δ mayor que 10 mm, y la otra, cuando Δ es menor de 10 mm.

Δ mayor de 10 mm

La dosificación de agregado y ligante teórico viene dada por

$$Q = 0.9 \times \Delta \text{ (kg/m}^2\text{)}, \text{ y } L = 0.10 \times Q \text{ (l/m}^2\text{)}$$

Δ menor de 10 mm

La dosificación de agregado y ligante teórico viene dada por

$$Q = 3 + 0.7 \times \Delta \text{ (kg/m}^2\text{)}, \text{ y } L = 0.10 \times Q \text{ (l/m}^2\text{)}.$$

Dado que la formulación teórica va acompañada del ajuste en la obra, deberán tenerse en cuenta las siguientes reglas prácticas:

- Sobre superficies agrietadas, porosas o absorbentes, en climas fríos y tránsitos bajos, conviene aumentar la cantidad.
- Sobre superficies muy cerradas o exudadas, en climas cálidos y tránsitos altos es aconsejable disminuir la cantidad.

Los incrementos de la dosificación pueden variar entre 5 al 15% de ligante residual.

En relación con los tratamientos dobles, otras recomendaciones en cuanto al tiempo cálido es conveniente aumentar la cantidad de la primera aplicación de ligante, y por tanto disminuir la cantidad de la segunda aplicación, en proporciones que pueden oscilar entre el 15% y el 25%.

2.3.3. Metodología ASTM

La norma ASTM D-1369 provee de cantidades de materiales para tratamientos superficiales simples y múltiples. Los parámetros de los materiales necesarios para seleccionar las dosificaciones son: la granulometría (práctica D – 448) y el peso unitario suelto, estas dosificaciones se obtienen mediante tablas de datos obtenidos de dosificaciones típicas utilizadas en distintos proyectos.

Tabla 2.10. Cantidades de Materiales para Tratamientos Superficiales.

Tipo	Tratamiento superficial	Agregados		Ligante asfáltico
	Aplicación	Tamaño máximo nominal (mm)	Tasa de aplicación típica (m ³ / m ²)	Tasa de aplicación típica (L/ m ²)
Simple	Primera capa	25 a 12,5	0,017	1,90
		19 a 9,5	0,012	1,60
		12,5 a 4,75	0,008	1,04
		9,5 a 2,36	0,006	0,86
		4,8 a 1,2	0,004	0,59
Doble	Primera capa	25 a 12,5	0,017	1,90
	Segunda capa	2,5 a 4,75	0,008	1,18
	Primera capa	10 a 9,5	0,012	1,68
	Segunda capa	9,5 a 2,36	0,006	0,91
Triple	Primera capa	25 a 12,5	0,017	1,90
	Segunda capa	12,5 a 4,75	0,008	1,18
	Tercera capa	4,75 a 1,18	0,004	0,63
	Primera capa	19 a 9,5	0,012	1,68
	Segunda capa	9,5 a 2,36	0,006	0,91
	Tercera capa	4,75 a 1,18	0,004	0,63

Fuente: ASTM, 2006.

Los valores de la tabla son diseños típicos y no necesariamente obtenibles para la precisión indicada, la experiencia ha demostrado que estas cantidades deben de ser incrementadas ligeramente (5% a 10%) cuando el ligante asfáltico a utilizar fue manufacturado para aplicaciones con poco o sin calor.

2.3.4. Metodología de Texas DOT

Conocida también con el nombre del método de Kearby modificado, para realizar el diseño del Tratamiento Superficial deben seguir los siguientes pasos:

La dosis del agregado se determine mediante la fórmula:

$$Q = k$$

$$S = \frac{W}{k}$$

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 Texas DOT 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:

$$L = ExVxT+P$$

Donde:

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

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

$$E = dxe$$

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

$$d = 1000 x \frac{k}{w}$$

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 2,7.

S= factor de corrección por textura superficial (L/m²).

Tabla 2.11. Factor de Corrección S por Textura Superficial.

Textura superficial	Corrección S (l/m ²)
Negra, exudada	-0.04 a -0.27
Suave, no porosa	0.00
Levemente porosa y oxidada	0.14
Con agujeros leves, oxidada	0.27
Muy porosa	0.40

Fuente: Instituto del Asfalto, 1979.2006.

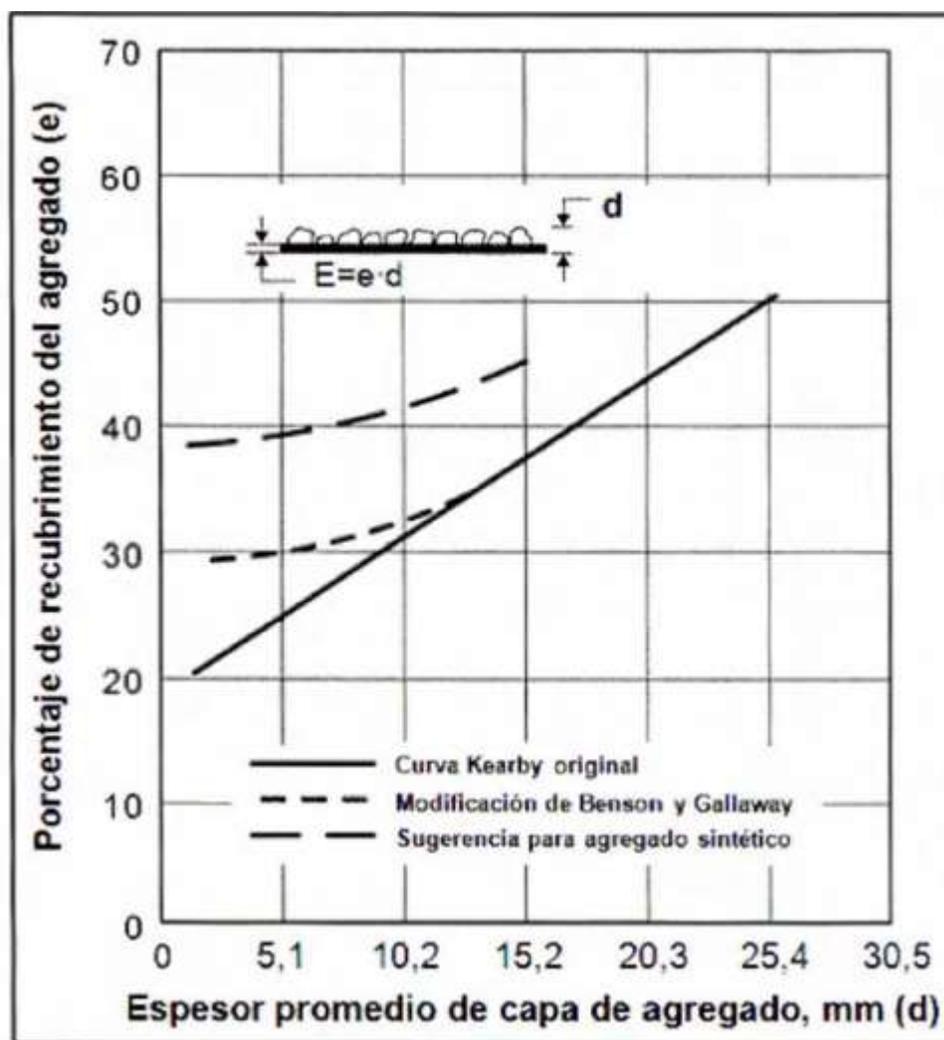
En el caso que se utilicen emulsiones asfálticas, es necesario realizar la siguiente corrección:

$$L_{emulsion} = L + k \times \left(\frac{L}{\% \text{ Asfalto residual}} - L \right)$$

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 2.7. Relación entre Porcentaje de Recubrimiento y el Espesor Promedio de Capa de Agregado.



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

2.3.5. Método de Hanson

Según los principios establecidos por Hanson, la dimensión mínima promedio será el promedio del espesor final del tratamiento superficial y el volumen final corresponderá a 20% de vacíos y 80% de la dimensión mínima promedio con esto se puede obtener la tasa de aplicación de agregado mediante la siguiente ecuación:

$$Q = 0,80 \times G \times H \times E$$

Donde:

Q = dosis del agregado en (kg/ m²).

G = gravedad específica bruta seca.

H = dimensión mínima promedio del agregado (mm).

$$H = \frac{Tm}{1,139285+0,011506(FI)}$$

Tm = tamaño medio del agregado, abertura del tamiz teórico por el cual pasa el 50 % del agregado (mm).

FI = índice de Flakiness (%), porcentaje en peso de partículas que tienen su dimensión mínima inferior a 0,6 veces la dimensión media del agregado.

E = factor de desperdicio de la tabla 2,6.

La dosis de ligante se obtiene de la cantidad de vacíos, que corresponden al 20% de la dimensión mínima promedio, y del porcentaje de vacíos que deben ser llenados con asfalto, que depende de la cantidad de tráfico que se tenga, según indican los principios de Hason, la tasa de aplicación del ligante se calcula con la siguiente ecuación:

$$L = 2,20xHxT + P$$

Donde:

L = dosis de aplicación de asfalto en (L/m²).

H = dimensión mínima promedio del agregado (mm).

T = factor de tráfico, mostrado en la Tabla 2,7.

P = factor de corrección por textura superficial en (L/m²). Mostrado en la Tabla 2,11.

El procedimiento empleado por el Laboratorio Nacional de Vialidad es el método de la DIMENSIÓN MÍNIMA PROMEDIO A0705 descrito en el Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos volumen 4A elaborado por la Administración Boliviana de Carreteras¹¹.

¹¹ **Fuente:** Ing. Fabricio Leiva Villacorta Año 2016 Estudio Comparativo de Metodologías de Diseño de Tratamientos Superficiales; Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME). (pág.- 2).

2.4. DEFINICIÓN DE LOS ENSAYOS DESARROLLADOS EN EL TRATAMIENTO SUPERFICIAL BICAPA

Los ensayos desarrollados en esta investigación son los más destacados para evaluar el comportamiento y desempeño del tratamiento superficial en estudio.

Para evaluar el tratamiento superficial bicapa se realiza el ensayo de estabilidad y fluencia de Marshall y para evaluar el desempeño del tratamiento los ensayos del Barrido y del Vialit.

2.4.1. Ensayo del Barrido

El ensayo del barrido está regulado por la norma ASTM D 7000 y fue desarrollado para evaluar el desempeño de un tratamiento superficial en su etapa inicial donde el tiempo de curado es la variable más importante.

La prueba consiste en elaborar un tratamiento superficial simple, a partir del ligante asfáltico que será evaluado y un agregado con una granulometría estándar. Cada espécimen se elabora a escala reducida, procurando emular su proceso constructivo en campo, y tiene una geometría circular con un diámetro de $28 + 3$ mm.

El desempeño de cada muestra se mide al someter cada espécimen al efecto abrasivo de un cepillo, que conectado a una batidora simula el efecto del barrido en un tratamiento superficial. Finalmente se cuantifica la pérdida de agregado por diferencia de peso.

Figura 2.8. Ensayo del Barrido.



Fuente: manual de tratamiento superficial (propuesta).

2.4.2. Ensayo de Vialit

Este ensayo está regulado por el Departamento de Transporte de California y describe el procedimiento que debe seguirse para valorar la adhesividad así como la resistencia al desprendimiento existente entre el agregado y los ligantes, mediante la placa de vialit.

El ensayo, se aplica a los materiales empleados en tratamientos superficiales, consiste en incrustar 100 partículas de agredo sobre una película de ligante asfáltico extendido en una placa metálica. Una vez curado el ligante, se coloca la muestra en un congelador y se deja de enfriar a $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante media hora, Posteriormente se posiciona la placa invertida sobre tres apoyos verticales y se somete al impacto producido por la caída de una bola de acero, Finalmente se valora el estado de la muestra al considerar la entidad de partículas desprendidas¹².

Figura 2.9. Ensayo del Vialit.



Fuente: Universidad de Costa Rica Facultad de Ingeniería.

¹² **Fuente:** Ing. José Pablo Aguilar Moya “Manual para el diseño del tratamiento superficial Universidad De Costa Rica Facultad de Ingeniería” Universidad de Costa Rica Año 2016 (pág.- 32).

2.4.3. Ensayo de Estabilidad y Fluencia

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

-**Estabilidad Marshall:**

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

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

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es frecuentemente una medida de su calidad: sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente, las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

-**Fluencia Marshall:**

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

Las mezclas asfálticas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall, son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio, aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito¹³.

¹³ **Fuente:** Instituto Chileno del Asfalto “Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en caliente” Año 1982 (pág. – 70).

Figura 2.10. Ensayo Estabilidad y Fluencia.



Fuente: Elaboración Propia.

2.5. EQUIPOS DE CONSTRUCCIÓN DE UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL

En forma general el equipo necesario para la ejecución de un tratamiento superficial es el siguiente:

a) Equipo de limpieza

Las barredoras mecánicas se utilizan para limpiar la superficie de la calzada, antes de iniciar la ejecución del riego. Es un equipo muy útil, ya que barrer la calzada a mano es lento y costoso.

b) Equipos menores

Tales como palas, cepillos, rastrillos, regaderas, etc..., necesarios para lograr la mayor eficacia en el trabajo.

c) Distribuidor de asfalto

Es quizás el equipo más importante, se deben tener especiales precauciones para lograr una aplicación constante y uniforme.

- La bomba de asfalto y los indicadores de presión en perfecto estado.
- El tacómetro y el velocímetro bien calibrados.
- La flauta de distribución y las boquillas de salida bien limpias.
- La apertura y cierre de las boquillas deben ser instantáneos para evitar demasiado desperdicio que afecten el buen acabado.
- Los conos que forman las boquillas deben ser iguales e independientes. Es necesario verificar que los orificios de salida estén paralelos y formando un ángulo de 20° con el eje de la flauta.
- La altura de la flauta con relación a la calzada, está relacionada con la distancia entre ejes de las boquillas, generalmente 10 cm. Es por tanto fijar la altura de la flauta a 20 o 30 cm, para obtener la superposición requerida de los conos de distribución. Se considera como altura óptima 20 cm.

d) Esparcidos de gravillas

Los que se usan con mayor frecuencia son los siguientes:

- **Fijos:** Que se montan sobre las volquetas, removiendo la tapa trasera de éstas. Al marchar hacia atrás la volqueta descarga la gravilla directamente sobre el piso.
- **Mecánicos:** Consisten en esencia, en una caja metálica con una abertura inferior ajustable, montada sobre llantas y que se acopla a la volqueta.
- **Autopropulsados:** Eliminan los inconvenientes derivados de los acoplamientos y desacoplamientos de las volquetas y permiten una distribución continua y uniforme con gran rendimiento.

f) Equipo de transporte

Se emplean volquetas de la capacidad requerida.

g) Equipo de compactación

Generalmente se utilizan dos tipos de compactadores:

-De rodillos neumáticos o compactadores de llanta.

-De rodillos metálicos o cilindros.

La compactación de un tratamiento superficial corresponde nada más que a un acomodamiento de la gravilla. Los mejores resultados se obtienen por el empleo de compactadores de llanta, preferiblemente autopropulsados. Con estos se logra una distribución uniforme de la presión aplicada, aun en el caso de que la superficie sea ligeramente irregular, además no producen trituración de los agregados pétreos.

Los cilindros metálicos tienen la desventaja de triturar la gravilla de menor dureza.

La presión aplicada no es uniforme porque el rodillo metálico se apoya sobre la gravilla de mayor tamaño, sin lograr compactar zonas con pequeñas depresiones y partículas de menor tamaño. En consecuencia, si no es posible disponer de un compactador de llantas, debería recurrirse a un pequeño cilindro tándem de 5 o 6 toneladas, evitando los cilindros de tres ruedas, las cuales afectan considerablemente los agregados y dejan huellas lineales sobre los riegos.

h) Equipo auxiliar

Carro tanque con sistema de calentamiento para alimentar al carro tanque irrigador.

2.6. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL

En el proceso de construcción de los tratamientos superficiales en forma general necesita de un equipo importante y complejo que requiere siempre establecer un plan bien estudiado antes de iniciar los trabajos.

-El orden de ejecución de las diferentes secciones para limitar al máximo los desplazamientos del equipo de compactación.

-El momento de la limpieza de cada sección a fin de que ésta operación no preceda demasiado de la distribución del ligante, ni tampoco demasiado corto para que retrase los avances.

-El número y volumen de volquetas en función de la dosificación del material pétreo.

-La capacidad del carro tanque irrigador.

-La longitud de las secciones que deben recubrirse de tal forma que se pueda desocupar totalmente en lo posible el contenido de la volqueta, sin dejar parte de la sección cubierta con ligante desprovista de agregado.

-La importancia del cargador de gravilla que no retrase el suministro de las mismas.

El proceso de construcción de un tratamiento superficial simple es el mismo que para un tratamiento superficial bicapa, ya que ambos necesitan de una capa de ligante seguida de una de agregado pétreo la diferencia está en que el simple sólo requiere de una capa de rodadura a diferencia del tratamiento superficial bicapa son dos capas de rodadura debidamente compactadas, utilizando los mismos materiales, maquinarias y herramientas para su ejecución. Lo mismo ocurre con el tratamiento superficial triple que se realizan en tres capas de rodadura diferenciando el espesor entre estos tratamientos superficiales.

Esta investigación se enfoca exclusivamente en el tratamiento superficial bicapa como la primera fase de ejecución se tiene la preparación de la calzada.

2.6.1. Preparación de la Calzada

Se comprueba previamente mediante ensayos de laboratorio que la superficie sobre la cual se va a efectuar el tratamiento superficial cumpla con las condiciones de calidad y compactación especificadas y que no contenga exceso de humedad.

En caso contrario debe procederse a escarificar y re compactar la superficie hasta lograr las condiciones exigidas. Cuando se considere aceptable se procede a la limpieza, utilizando barredoras mecánicas, cepillos de mano y un compresor para retirar el polvo, desechos y materiales sueltos o adheridos que puedan perjudicar la calidad del riego. Aunque la emulsión es menos frágil al polvo, es aconsejable insistir en la necesidad de una perfecta limpieza de calzada, condición indispensable para lograr una buena fijación y una buena adherencia con los agregados ya que se ha comprobado efectivamente que el polvo absorbe una cantidad considerable de ligantes.

Al colocar un tratamiento superficial, en un pavimento existente, éste no debe presentar deterioros significativos, en caso de que el pavimento éste muy deteriorado se debe tomar las medidas necesarias para corregir el problema mediante soluciones como bacheo formal o sello de grietas.

2.6.2. Elaboración de Juntas

Las juntas en tratamientos superficiales deben ser elaboradas cuidadosamente. Si una junta se construye de forma errónea pueden presentarse un traslape de tratamientos superficiales o que una parte de la superficie quede sin recubrir; en ambos casos se da una pérdida de servicialidad, ya que el conductor notará el cambio en la regularidad superficial del tratamiento.

En los tratamientos superficiales se realizan juntas transversales y longitudinales, las primeras consisten en extender una tira de papel grueso, cartón u otro tipo de material transversalmente cada vez que se reanude el trabajo para que este reciba el ligante antes de empezar el tramo. De esta forma, las juntas transversales quedaran con una junta transversal limpia y bien hecha conteniendo la cantidad de ligante y agregado requerido.

En las juntas longitudinales es necesario tener una precisión para poder realizar el traslape de las capas para que éste reciba el ligante y el agregado necesario y no proveer de una sub-dotación de ligante y agregado. De esta manera las juntas longitudinales quedarán con una junta transversal limpia y bien hecha, conteniendo la cantidad de ligante y agregado requerido.

2.6.3. Distribución del ligante

La distribución propiamente dicha, consiste en recubrir la calzada según la dosificación prevista, se ejecuta con un carro tanque provisto de su correspondiente equipo de irrigación y como el que se utiliza comunmente para distribución de asfalto líquido.

En la operación de distribución del ligante, se debe buscar preferencialmente:

- Una regularidad de riego tanto longitudinal como transversal.
- Iniciación y terminación correctas de la longitud de riego para lograr un perfecto acabado. Ésto se puede lograr colocando papel común tanto al inicio como al final de la longitud de riego.
- Para lograr una distribución correcta y que el valor de la dosificación regular, en el sentido longitudinal se debe tener especial cuidado en controlar la presión de la bomba y la velocidad del carro tanque mediante el tacómetro.

-La regularidad en el sentido transversal se asegura mediante la correcta utilización de la rampa de distribución, la colocación de las boquillas y la altura sobre la superficie.

Para realizar el control en la distribución del ligante se realizan mayormente tres controles, el primero en el sistema de válvula que gobierna el flujo de material asfáltico, otro es un tacómetro en la bomba y finalmente es un batómetro con un odómetro que indica el número de metro por minuto y la distancia recorrida.

A pesar de los controles precisos que hay en un distribuidor, es siempre aconsejable verificar la distribución unitaria de aplicación en el campo, ésto puede hacerse con una bandeja plana de metal, cuya área sea exactamente a un metro cuadrado, se pesa la bandeja y se coloca en la superficie a ser regada, inmediatamente después de que el distribuidor ha pasado, se retira la bandeja y se vuelve a pesar, la diferencia entre ambos es el peso del ligante asfáltico.

Figura 2.11. Distribuidor de Asfalto.



Fuente: TxDOT, 2010.

2.6.4. Distribución de Agregados Pétreos

El distribuidor de agregados sigue en orden de importancia al distribuidor de asfalto, aplica una cantidad uniforme de agregados con una distribución unitaria especificada.

Para calibrar el equipo, se hacen varias pasadas a diferentes velocidades y aperturas de la compuerta sobre charolas que se pesan para determinar si la cantidad puesta es la necesaria para el proyecto; con esto se puede determinar rápidamente la abertura y la

velocidad para aplicar la hilada de agregado con la distribución unitaria especificada por metro cuadrado.

La gravilla se debe distribuir inmediatamente después del riego del ligante asfáltico con los esparcidores mecánicos o autopropulsados a fin de que se logre una buena adherencia de los granos y ligante. Cuando sea necesario se complementará la extensión de los agregados con el paso de una rastra de cepillos. Los esparcidores de gravilla deben avanzar marcha atrás, a fin de evitar el contacto de las llantas con el material asfáltico sin recubrir. Inmediatamente después de la extensión del agregado, se procederá a su compactación.

Figura 2.12. Distribuidor de Agregado.



Fuente: TxDOT, 2010.

2.6.5. Compactación

Experimentalmente se ha comprobado que el proceso de compactación debe iniciarse con un compactador neumático autopropulsado, para conseguir que la gravilla se acomode y logre una mejor distribución de esfuerzos sobre los agregados, además de evitar que el material falle y forme una película de finos que puede influir negativamente en la aplicación del siguiente riego bituminoso.

La compactación debe empezarse del borde exterior hacia adentro, traslapando cuando menos la tercera parte de la franja anterior. Luego la compactación se continuará con un compactador tándem de rueda lisa de 5 a 6 toneladas.

En tratamientos superficiales de más de un riego no es aconsejable dejar el tráfico sobre la primera capa, ya que puede sufrir daños de consideración por acción de las frenadas o arrancadas de los vehículos. Es conveniente por consiguiente ejecutar el segundo riego lo más pronto posible.

-El objeto de la compactación es asegurar un estrecho contacto entre el ligante y el agregado pétreo que permita una buena adhesividad.

-La primera capa de gravilla debe compactarse ligeramente, no más que dos pasadas, para evitar que se triture la gravilla. Hay que tener en cuenta que no se trata de una verdadera compactación, sino de un acomodamiento de los agregados.

-La segunda capa debe ser compactada con un máximo de tres o cuatro pasadas del cilindro para evitar la trituración de los agregados.

Para los tratamientos superficiales, los rodillos neumáticos dan mejores resultados fuerzan la penetración del agregado dentro del ligante asfáltico, sin triturar sus partículas.

Figura 2.13. Compactador de Rodillo Neumático.



Fuente: TxDOT, 2010.

2.6.6. Retiro de sobrantes

El retiro de residuos de agregados debe efectuarse lo más pronto posible para evitar:

- Que se ejerzan una acción de desgaste con los materiales que quedaron adheridos por acción misma del tráfico que son peligrosos para la circulación de los vehículos.
- Que se opongan al escurrimiento o libre flujo de aguas lluvias hacia las obras de drenaje¹⁴.

Figura 2.14. Tratamiento Superficial.



Fuente: José Antonio Soto Proas.

¹⁴ **Fuente:** Ing. Esp. Edween Mauricio Guerrero Veloza “Tratamiento Superficial con Emulsión Asfáltica” Universidad Militar Nueva Granada Año 2014 (pág. - 8).

3.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

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 el tratamiento superficial bicapa (ligante asfáltico y agregados pétreos), la segunda corresponde a la dosificación del tratamiento para realizar las probetas que contemplara el tratamiento, el cual se evaluara mediante el ensayo de Marshall (para la medición de la estabilidad y fluencia) y los ensayos de Vialit, el barrido (para evaluar el desempeño del tratamiento superficial). Se realiza la dosificación del tratamiento superficial bicapa utilizando el asfalto convencional (85-100) y el asfalto modificado con polímeros SBS (60-85), con el fin de mejorar el comportamiento que tiene durante su vida útil.

Se busca realizar la comparación del tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto convencional y el asfalto modificado con polímeros, evaluando el comportamiento y el desempeño mediante el ensayo de estabilidad y fluencia la medición de la resistencia y la deformación, la adherencia entre los agregados pétreos y los ligantes asfálticos, mediante los ensayos del Vialit y el ensayo del barrido; demostrando que si se usa el asfalto modificado con polímeros en la dosificación del tratamiento superficial bicapa, 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 tránsito.

3.1.1. Ubicación del Proyecto

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 Noreste del Departamento de Tarija, entre los paralelos de 20°56' ; 21°36' de latitud sur y los 64°05' ; 65°13' de longitud oeste, tiene una extensión de 4861 Km².

Figura 3.1. Ubicación de Tarija.



Fuente: Google Earth.

3.2. MATERIALES DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL BICAPA

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 Ensayos de suelos y Materiales Asfálticos volumen 4A elaborado por la Administración Boliviana de Carreteras (ABC).

Para el presente proyecto se hará uso de materiales existentes en el departamento de Tarija, los mismos que se ajustan dentro de las normativas vigentes.

3.2.1. Ligante Asfáltico

3.2.1.1. Cemento asfáltico convencional

El cemento asfáltico convencional (85/100) proveniente del Brasil de la industria BETUNEL, fue proporcionado por la alcaldía municipal de Tarija, mediante una solicitud dirigida al gerente de esta entidad, siguiendo una serie de pasos para lograr la obtención del mismo.

Es un material asfáltico de uso vial con una composición muy compleja de compuestos orgánicos de elevado peso molecular y una proporción relativamente grande de hidrocarburos con un número de carbonos en su mayor parte superior a C_{25} (alta relación

entre carbono- hidrógeno), también contiene pequeñas cantidades de otros metales como níquel, hierro o vanadio.

Se obtiene como el residuo no volátil de la destilación del petróleo crudo o por separación como el refinado de un aceite residual en un proceso de desasfaltado o descarbonización, éstos son aplicados por dilución al agregado para la producción de pavimentos asfálticos de uso vial, es un producto de excelente calidad de penetración, adherencia y resistencia para climas templados.

Normalmente se almacenan arriba de los 100°C y el contacto con agua puede conducir a una expansión violenta, peligro de salpicaduras y desbordamiento por ebullición; aunque no están clasificados como inflamables, estos pueden arder ya que son materiales hidrocarbonados.

Para la manipulación de este material se debe tomar en cuenta principalmente la temperatura máxima segura en la cual se va a trabajar la cual debe estar a 30°C por debajo del punto de inflamación, evitar el sobrecalentamiento para minimizar la producción de humos, protegerse el rostro, manos, brazos y cuerpo en general.

Vale hacer notar que la ventilación debe ser adecuada, deben ser manejados a la menor temperatura posible teniendo en cuenta su uso eficiente; se almacenan en contenedores debidamente cerrados y etiquetados. Los asfaltos calientes no deben ser contenidos en un depósito húmedo, ya que el vapor de agua puede provocar erupciones violentas.

Figura 3.2. Ubicación Planta de la Alcaldía.



Fuente: Google Earth.

Tabla 3.1. Especificaciones del Cemento Asfáltico Convencional 85/100.

Ensayos	Limites	Método	Reproductibilidad.	Encontrados
Penetración a 25°C, 100g. 0.1mm (T-201).	85-100	NBR-8576/ASTM D 5/ AASHTO T 201	± 4 dmm.	91
Viscosidad Sayboit Furoi a 135 °C. seg. (T-72).	85 min.	NBR-14950/ASTM D 68/ AASHTO T 72	± 2 %	120
Ensayo de la mancha @ 20 % Xilot (T-102).	negativo	-/ASTM D 2170/ AASHTO T102	ND	negativo
Punto de ablandamiento °C (T-53).	43 a 46	NBR-6560/ASTM D 36/ AASHTO T 53	± 3 °C	45
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm (T-51).	100 min.	NBR-6293/ASTM D 113/ AASHTO T 51	Consultar NBR.	> 100
Viscosidad BROOKFIELD a 135 °C Cp.	214 min.	NBR-15184/ASTM D 4402 AASHTO T 316	ND	290
Viscosidad BROOKFIELD a 155 °C Cp.	37 min.	NBR-15184/ASTM D 4402/ AASHTO T 316	ND	152
Viscosidad BROOKFIELD a 177 °C Cp.	28 a 114	NBR-15184/ASTM D 4402/ AASHTO T 316	ND	58
Temperatura de mistura °C	Indicativo	Calculo	ND	141 a 147
Temperatura de compactación °C	Indicativo	Calculo	ND	130 a 136
Índice de penetración	-1.5 A 0.5	Calculo/ Calculo	ND	-1.1
Punto de inflamación copa abierta de Cleveland °C. (T-48).	230 min.	NBR-11341/ASTM D 92/ AASHTO T 48	± 18 °C	> 235
Solubilidad en tricloroetileno (T-44).	99 min.	NBR-14865/ASTM D 2042/ AASHTO T 44	± 0.28 %	99,9
Densidad a 25°C (T-228)	0.99 min.	NBR-6298/ AASHTO T 228	± 0.005	1.012
Ensayos sobre el residuo película delgada (TFOT),32 mm, 189°C (AASHTO T 240)				
R(TFOT)-pérdida de masa (T-240)	1max.	NBR-15235/ASTM D 2872/ AASHTO T 240	Consultar NBR.	0.41
R(TFOT)- penetración del residuo, % de la penetración original	50 min.	Calculo	ND.	0.55
R(TFOT)-perdida por calentamiento (T-179) %	1max.	Calculo / AASHTO T 179	± 4 dmm.	0.42
Densidad a 25°C c/25°C (T-228)	1 a 1.05	NBR-6298/ AASHTO T 228	± 0.005	1

Fuente: Betunel. /producto/Betunel (85/100).

3.2.1.2. Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros

El cemento asfáltico modificado con polímeros (60/85) con el nombre betuflex proveniente del Brasil de STRATURA ASFALTOS, fue proporcionado por el Servicio Departamental de Caminos SEDECA de Tarija encargados de la red vial del departamento.

Este material fue obtenido mediante una solicitud al director del SEDECA la cual fue dirigida a la planta asfáltica ubicada en la comunidad de Charajas.

Figura 3.3. Ubicación de la Planta de Charajas.



Fuente: Google Earth.

Es un material visco elástico, ya que tiene ambas propiedades de un material viscoso como el aceite de motor o de modo más realista el agua y un material elástico como el caucho. Éste depende de la temperatura y del tiempo de carga. Contiene un polímero elastómero SBS (estireno-butadieno-estireno) que presentan características de desempeño como reducida sensibilidad térmica, alto punto de ablandamiento, resistencia a tensiones térmicas y mecánicas repetidas, tales como la elasticidad y resistencia al envejecimiento.

Tabla 3.2. Especificaciones del Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros.

Ensayo	Método	Unidad	Especificación
Penetración muestra original (100g, 5s, 25°C)	AASHTO T 49	0.1 mm	40 - 70
Punto de reblandecimiento A&B, min	AASHTO T 53	°C	60
Fuerza – ductilidad	UNE 13589	°C	≥ 2 a 5 °C
Viscosidad rotacional Brookfield, a 135 °C, sp. 21, máx.	AASHTO T 2	cP	3000
Viscosidad rotacional Brookfield, a 155 °C, sp 21, máx.			2000
Viscosidad rotacional Brookfield, a 177 °C, sp 21, máx.			1000
Recuperación elástica 25 °C, 20 cm, min.	AASHTO T 301	%	85
Punto de inflamación – copa abierta de Cleveland, min.	AASHTO T 48	°C	235
Estabilidad de almacenamiento Dif. A y B Dif. Pen.	-	°C	≤ 5 ≤ 9
Punto de fragilidad de Fraas	IP 80 - 53	°C	≤ -12
Ensayo del Residuo (RTFOT)			
Ensayo de película delgada rotatoria (variación de masa) – 163 °C, 85 min. Per/Cal, máx.	AASHTO T 240	% de masa	1.0
Porcentaje de penetración original (100g, 5s, 25 °C) min.	AASHTO T 49	%	60
Recuperación elastiaca, 25 °C, 20 cm, min.	AASHTO T 301	%	80
Reducción del punto de reblandecimiento A&B anillo bola, máx.	AASHTO T 53	°C	5
Aumento punto de reblandecimiento A&B anillo bola, máx.	AASHTO T 53	°C	7

Fuente: stratura. /producto/betuflex (60/85).

Presenta desempeño y durabilidad superior en servicios de pavimentación, reduciendo costos de mantenimiento y niveles de accidentes de carretera, siendo una solución efectiva en términos de costo/beneficio en servicios asfálticos, tal como concreto y microconcreto bituminoso mecanizado en caliente y para condiciones severas de clima, tráfico en carreteras y vías urbanas, revestimientos asfálticos discontinuos aumentando la seguridad y la durabilidad del revestimiento, reduciendo problemas en días lluviosos.

La temperatura típica de mezclado recomendada para el asfalto modificado, fluctúa entre 150 °C y 180 °C lo que dependerá de las condiciones de cada obra en particular. Mayormente se aplica para climas calientes, donde es usado en altos volúmenes de tráfico y áreas con gran porcentaje de vehículos de carga.

3.2.1.3. Diferencias que existen entre los cementos asfálticos (85-100) y (60-85)

Las principales diferencias que existen entre ambos cementos asfálticos son en su composición y sus propiedades físicas y químicas.

En razón que los asfaltos presentan un comportamiento viscoelástico, la adición de polímeros incrementa su componente elástica. Los ensayos típicos de “penetración” y “punto de ablandamiento”, no miden elasticidad ni recuperación elástica, características típicas de los asfaltos modificados, de ahí que debe recurrirse a otros tipos de ensayos. Un método que ha sido adoptado en nuestro país es el de “recuperación elástica” basada en el ensayo convencional de “ductilidad”.

La principal diferencia entre ambos cementos asfálticos 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:

- a) Método de ensayo de penetración (ASTM D5; AASHTO T49-97).
- b) Método para determinar la ductilidad (ASTM D113; AASHTO T51-00).
- c) Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01; AASHTO T79-96).

- d) Método para determinar la viscosidad cinemática (ASTM D2170; AASHTO T201-01).
- e) Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato del anillo y la bola (ASTM D 36; AASHTO T53-96).
- f) Método para determinar la densidad (ASTM D140; AASHTO T229-97) o el ensayo para determinar la gravedad específica (ASTM D 70-76; AASHTO T228-93).

Figura 3.4. Asfalto Convencional 85/100.



Fuente: Elaboración Propia.

Para el asfalto modificado con polímeros lo que se recomienda realizar son dos ensayos principales:

- a) Método de ensayo de recuperación elástica para asfaltos modificados (ASTM D 6084-06; AASHTO T 301-99).
- b) Método para determinar el índice de penetración en asfaltos modificados (UNE 104-281).

Figura 3.5. Asfalto Modificado con Polímero SBS BETUFLEX 60/85.



Fuente: Elaboración Propia.

Se han realizado varios ensayos que han demostrado que las mezclas asfálticas realizadas con asfaltos modificados con polímeros son capaces de asimilar mayores tensiones iniciales que con los asfaltos convencionales.

Los asfaltos modificados con polímeros presentan un cambio en cuanto a su viscosidad-temperatura, sobre todo en el cambio de las temperaturas de servicio, permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto convencional tanto a bajas como altas temperaturas. La adherencia, la elasticidad y la durabilidad son ventajas esenciales ya que presentan menores pérdidas de agregado pétreo, menores deformaciones debido a su elasticidad que no permite la ruptura de la mezcla asfáltica realizada.

La mayor diferencia que existe es en su reología, sus características de flujo, particularmente su susceptibilidad térmica, la viscosidad cambia drásticamente, la penetración cambia tan solo pocos grados. La modificación del asfalto convencional causa cambios significativos en la relación esfuerzo-deformación, recuperación elástica cuando la carga desaparece y añade estabilidad al asfalto.

3.2.2. Agregados Pétreos

El agregado pétreo utilizado en el proyecto, es proveniente del tramo Piedra Larga-Puerta al Chaco correspondiente a la chancadora de la Asociación Accidental Andaluz encargada de la ejecución de este tramo.

Para que el agregado utilizado en la construcción de tratamientos superficiales tenga un buen desempeño, éste debe cumplir con las características de limpieza, tenacidad y forma

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 3.6. Chancadora para la Provisión de Material.



Fuente: Elaboración Propia.

Estos materiales a utilizar serán analizados en Laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfaltos de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho”, los cuales serán descritos a continuación.

Figura 3.7. Agregado Pétreo Grueso.

Fuente: Elaboración Propia.

Los agregados obtenidos para la dosificación del tratamiento superficial bicapa deben cumplir con las especificaciones establecidas entre los rangos de gradación según la siguiente tabla.

Tabla 3.3. Rangos de Gradación para Tratamientos Superficiales Simple y Multicapas.

N° de tamiz estándar	Abertura (mm).	Designación de la granulometría					
		A	B	C	D	E	F
1 ½ "	37.5	100					
1 "	25	90-100	100				
¾ "	19	0-35	90-100	100			
½ "	12.5	0-12	0-35	90-100	100		
3/8 "	9.5	-	0-12	0-35	85-100	100	100
N° 4	4.75	-	-	0-12	0-35	85-100	85-100
N° 8	2.36	-	-		0-8	0-23	-
N° 200	0.075	-	0-1	0-1	0-1	0-1	0-10

Fuente: Manual de Especificaciones para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR– 2010).

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La caracterización de los materiales es una tarea importante que deben cumplir el ligante asfáltico y los agregados pétreos con las especificaciones o parámetros establecidos en las distintas normas mencionadas, la compatibilidad y las propiedades de estos materiales va a definir el desempeño y el comportamiento del tratamiento superficial.

3.3.1. Caracterización del Cemento Asfáltico Convencional (85/100)

Los ensayos que se realizan para la caracterización están descritos en el Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos volumen 4ª de nuestro país elaborado por la Administración Boliviana de Carreteras (ABC).

3.3.1.1. Ensayo de penetración (ASTM D5; AASHTO T49-97)

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

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

Figura 3.8. Determinación de la Penetración de la Muestra.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultado obtenido de la Penetración (Anexo I)

Tabla 3.4. Ensayo de Penetración.

Promedio	Especificaciones	
	min.	max.
96 mm.	85 mm.	100 mm.

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.1.2. Ductilidad (ASTM D113; AASHTO T51-00)

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

Al menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a un temperatura establecida de $25 \pm 0,5$ °C y a una velocidad de 5cm. /min $\pm 5\%$ para otras temperaturas se debe especificar la velocidad.

Figura 3.9. Ensayo de Ductilidad.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultado obtenido de la Ductilidad (Anexo I)

Tabla 3.5. Ensayo de Ductilidad.

Promedio	Especificaciones	
	min.	max.
103cm	100 cm	-

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.1.3. Ensayo del punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01; AASHTO T79-96).

El método define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para productos de 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.

Figura 3.10. Realización del Ensayo de Punto de Inflamación.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos del punto de inflamación mediante el vaso abierto de Cleveland (Anexo I)

Tabla 3.6. Ensayo de Punto de Inflamación.

Promedio	Especificaciones	
	min.	max.
310 °C	230 °C	-

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.1.4. Viscosidad cinemática (ASTM D2170; AASHTOT201-01).

Este método abarca los procedimientos para determinar la viscosidad cinemática de asfaltos líquidos, aceites de caminos y residuos destilados de asfaltos líquidos, todos a 60 °C y de cementos asfálticos a 135 °C, en el rango de 30 a 100.000 cst.

Los datos de este método pueden usarse para calcular la viscosidad cuando la densidad del material a la temperatura del ensayo es conocido o puede determinarse.

Figura 3.11. Muestra para la Elaboración del Ensayo.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultado obtenido de viscosidad cinemática (Anexo I)

Tabla 3.7. Resultados del Ensayo de Viscosidad.

Promedio	Especificaciones	
	min.	max.
325 mm ² /s	170 cst.	-

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.1.5. Punto de ablandamiento con el aparato del “anillo y la bola”

(ASTM D 36; AASHTO T53-96)

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

En general, con materiales de este tipo, el ablandamiento no ocurre a una temperatura definida a medida que la temperatura aumenta, el material cambia gradual e imperceptiblemente, de un estado quebradizo o excesivamente espeso y de poca fluidez, a líquidos blandos y menos viscosos.

Por esta razón, la determinación del punto de ablandamiento se debe efectuar mediante un método arbitrario bien definido.

Figura 3.12. Determinación del Punto de Ablandamiento.



Fuente: Elaboración Propia.

**Resultados obtenidos del punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola
(Anexo I)**

Tabla 3.8. Ensayo de Punto de Ablandamiento.

Promedio	Especificaciones	
	Min.	Max.
44 °C	43 °C	53 °C

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.1.6. Método para determinar el peso específico

(ASTM D70-76; AASHTO T228-93)

Establece el procedimiento para determinar el peso específico o la densidad relativa de los asfaltos, mediante el uso de picnómetro a la temperatura requerida.

Figura 3.13. Muestras para Determinar el Peso Específico.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos del peso específico (Anexo I)

Tabla 3.9. Ensayo de Peso Específico.

Promedio	Especificaciones	
	Min.	Max.
1,028 g/cm ³	1 g/cm ³	1,05 g/cm ³

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2. Caracterización del Cemento Asfáltico Modificado con Polímero (60/85)

Para los asfaltos modificados se recomienda realizar dos ensayos según el Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos volumen 4A elaborado por la Administración Boliviana de Carreteras (ABC). Son los de recuperación elástica para asfaltos modificados (ASTM D 6084-06; AASTHO T 301-99) y el método para determinar el índice de penetración (UNE 104-281).

Figura 3.14. Asfalto Modificado con Polímeros Planta de Charajas - SEDECA.



Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2.1. Ensayo de recuperación elástica (ASTM D 6084-06; AASTHO T301-99)

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 cementos y emulsiones asfálticas modificadas. El ensayo se efectúa a una temperatura de $13 \pm 0,5$ °C y una velocidad de 5 cm/min \pm 5%.

Figura 3.15. Procedimiento para Obtener la Recuperación Elástica.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos del ensayo de recuperación elástica (Anexo I)

Tabla 3.10. Ensayo de Recuperación Elástica.

Promedio	Especificaciones	
	Min.	Max.
95%	85%	-

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2.2. Índice de penetración (UNE 104-281)

Este método describe el procedimiento a seguir para la determinación del índice de penetración IP de los ligantes asfálticos 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.

Figura 3.16. Determinación del Ensayo de Penetración.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos del índice de penetración (Anexo I)

Tabla 3.11. Ensayo del Índice de Penetración.

Promedio	Especificaciones	
	Min.	Max.
0,26	-	-

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3. Caracterización de los Agregados Pétreos

El tamaño de los agregados se escogió en función a las franjas establecidas en manuales de especificaciones para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR- 2010) que se utilizan en Costa Rica.

Para la elaboración del tratamiento superficial se utilizan dos tipos de agregado grueso la grava para la primera capa y la gravilla para la segunda capa, también se realiza la caracterización de agregado más fino correspondiente a la arena para incorporar un mínimo porcentaje de adherencia en la dosificación de la primera y la segunda capa del tratamiento

3.3.3.1. Granulometría (ASTM E40 C136; AASHTO T27-99)

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Figura 3.17. Tamizado de los Agregados Pétreos Gruesos.



Fuente: Elaboración Propia.

A) Granulometría del agregado grueso (Anexo II)

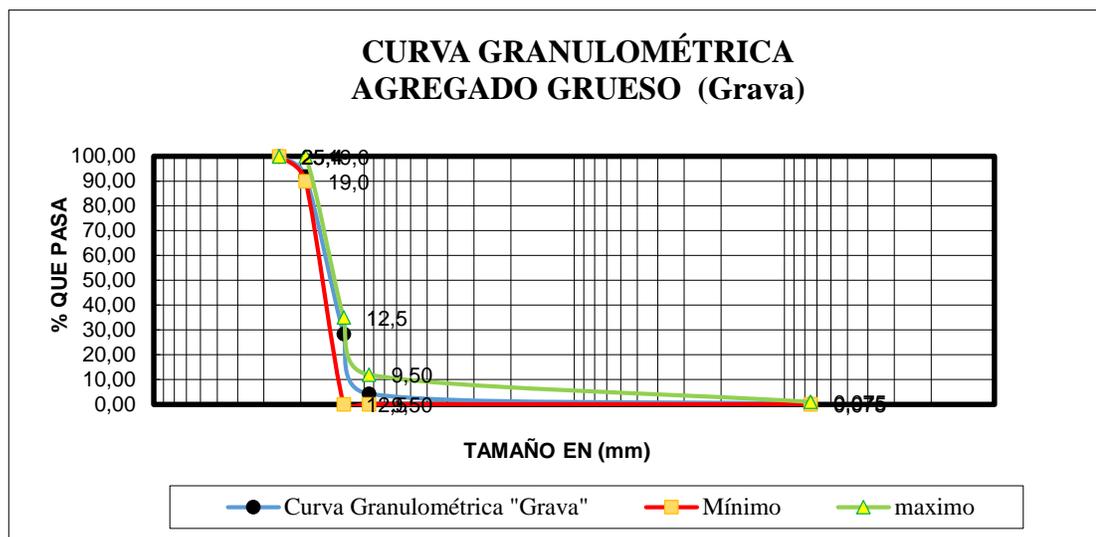
Se muestra la distribución granulométrica para realizar la primera capa del tratamiento superficial bicapa utilizadas en esta investigación, que se encuentra establecida dentro de las especificaciones establecidas, la grava utilizada para la primera capa está en el rango de gradación “B”.

Tabla 3.12. Resultados de la Granulometría Gradación “B”.

Peso total (g)		5000,3	Especificación
Tamices	Tamaño (mm)	% Que pasa del total	Gradación “B”
1"	25,4	100,00	100
3/4"	19	91,91	90-100
1/2"	12,5	28,40	0-35
3/8"	9,50	4,26	0-12
Nº4	4,75	0,10	-
Nº8	2,36	0,10	-
Nº16	1,16	0,10	-
Nº30	0,60	0,10	-
Nº50	0,30	0,10	-
Nº100	0,15	0,10	-
Nº200	0,075	0,10	0-1
Base	-	0,03	

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.18. Curva Granulométrica del Agregado Grueso Gradación "B".



Fuente: Elaboración Propia.

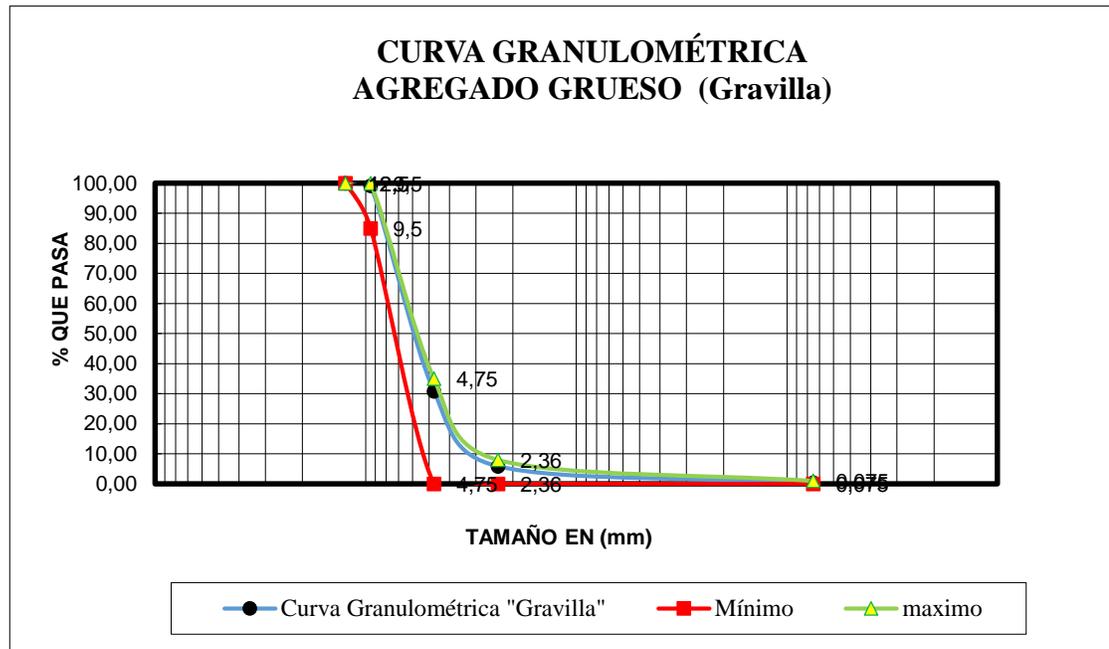
B) Granulometría del agregado grueso (Anexo II)

Tabla 3.13. Resultados de la Granulometría Gradación "D".

Peso total (g)		5000,3	Especificación
Tamices	Tamaño (mm)	% Que pasa del total	Gradación "D"
1/2"	12,5	100,00	100
3/8"	9,50	99,16	85-100
N°4	4,75	30,79	0-35
N°8	2,36	5,84	0-8
N°16	2,00	1,64	-
N°30	0,60	1,05	-
N°50	0,30	0,91	-
N°100	0,15	0,70	-
N°200	0,075	0,40	0-1
Base	-	0,17	

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.19. Curva Granulométrica del Agregado Grueso Gradación “D”.



Fuente: Elaboración Propia.

Se muestra la distribución granulométrica para realizar la segunda capa del tratamiento superficial bicapa, utilizada en esta investigación, que se encuentra establecida dentro de las especificaciones establecidas, la gravilla utilizada para la segunda capa está en el rango de gradación “D”

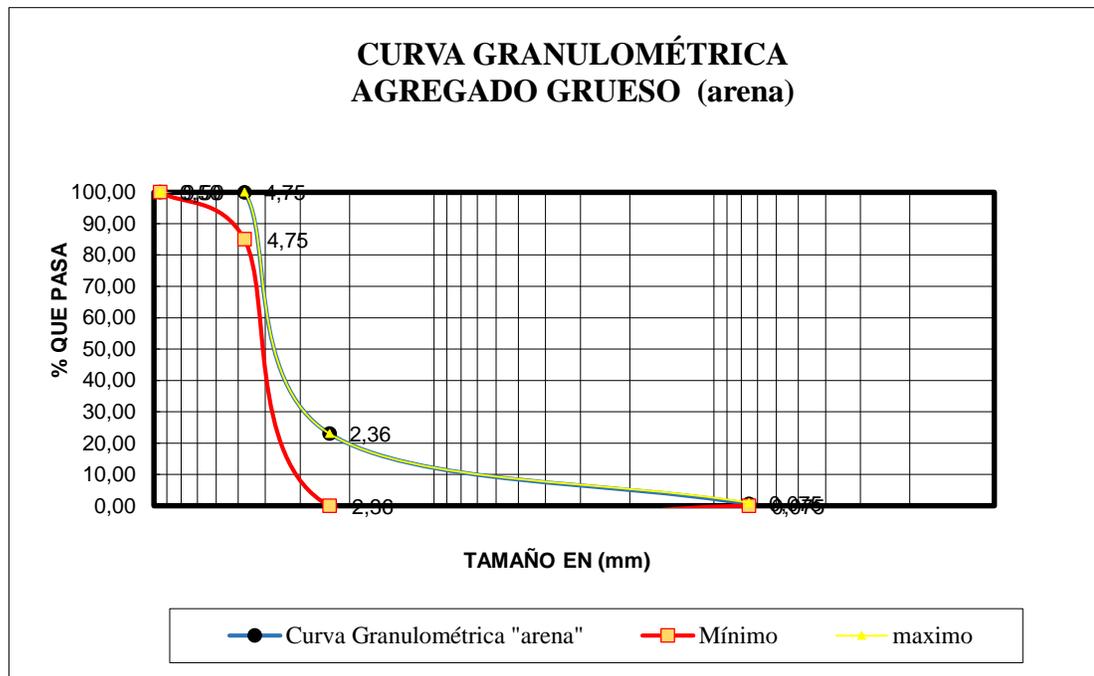
C) Granulometría del agregado fino (Anexo II)

Se muestra la distribución granulométrica del agregado más fino, que se encuentra establecida dentro de las especificaciones establecidas, que está en el rango de gradación “E”.

Tabla 3.14. Resultados de la Granulometría Gradación "E".

Peso total (g)		5000,4	Especificación
Tamices	Tamaño (mm)	% Que pasa del total	Gradación "E"
3/8"	9,50	100,00	100
N°4	4,8	99,91	85-100
N°8	2,36	23,02	0-23
N°10	2	16,63	-
N°16	1,18	12,29	-
N°30	0,60	8,05	-
N°50	0,30	4,47	-
N°100	0,15	2,31	-
N°200	0,075	0,54	0-1
BASE	-	0,30	

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.20. Curva Granulométrica del Agregado Fino Gradación "E".

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3.2. Peso específico y absorción del agregado grueso

(ASTM C127; AASHTO T85)

Este ensayo tiene por objetivo la determinación del peso específico a “granel” y el peso específico aparente, y el porcentaje de absorción del agregado grueso.

Figura 3.21. Peso Sumergido del Agregado Grueso.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos del Peso específico y absorción del agregado grueso

(Anexo II)

Tabla 3.15. Ensayo Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso.

Material	Peso específico a granel (g/cm ³)	Peso específico saturado con Sup. seca (g/cm ³)	Peso específico aparente (g/cm ³)	% de absorción
Grava	2,60	2,64	2,71	1,56
Gravilla	2,56	2,59	2,64	1,23

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.22. Agregados Gruesos



Fuente: Elaboración Propia

3.3.3.3. Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM C128; AASHTO T84)

Este ensayo tiene por objetivo la determinación del peso específico a “granel” y el peso específico aparente, y el porcentaje de absorción del agregado fino.

Figura 3.23. Peso Específico del Agregado Fino.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos del peso específico y absorción agregado fino (Anexo II)

Tabla 3.16. Ensayo del Peso Específico y Absorción del Agregado Fino.

Peso específico a granel (g/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (g/cm ³)	Peso específico aparente (g/cm ³)	% De absorción
2,63	2,67	2,72	1,22

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3.4. Peso unitario de los agregados gruesos (ASTMC 29M-97; AASHTO T-19)

Este método de ensayo cubre la determinación del peso unitario suelto y compactado de los agregados gruesos grava y gravilla.

Figura 3.24. Peso Unitario del Agregado Grueso.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos del peso unitario de agregado grueso (Anexo II)

Tabla 3.17. Ensayo del Peso Unitario Suelto y Compactado del Agregado Grueso.

Material	Peso unitario suelto (g/cm ³)	Peso unitario compactado (g/cm ³)
Grava	1,43	1,51
Gravilla	1,42	1,57

Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos del peso unitario de agregado fino (Anexo II)

Figura 3.25. Peso Unitario del Agregado Fino.



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.18. Ensayo del Peso Unitario Suelto y Compactado del Agregado Fino.

Peso unitario suelto (g/cm ³)	Peso unitario compactado (g/cm ³)
1,51	1,74

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3.5. Equivalente de arena (ASTM D 2419; AASHTO T 176)

Este método establece un procedimiento rápido para determinar la calidad que tiene un suelo que se va emplear en las capas de un pavimento; esta calidad es desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica.

Establece un procedimiento rápido para determinar las proporcionar relativas de finos plásticos o arcillosos principalmente en áridos que pasan al tamiz N° 4 (4,75mm).

Figura 3.26. Muestra de Arena Introducida en las Probetas.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos del equivalente de arena (Anexo II)

Tabla 3.19. Ensayo del Equivalente de Arena.

Equivalente de arena (%)	Norma
76,4	>50%

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3.6. Desgaste de los agregados mediante la máquina de los Ángeles (ASTM E131; AASHTO T96-99)

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste, plano de debilitamiento, plano de cristalización, forma de las partículas, cuyo objetivo es determinar la dureza de los agregados que se emplean en mezclas asfálticas.

Figura 3.27. Material Seleccionado para el Ensayo.



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.20. Pesos del Agregado Grueso y Número de Esferas para el Desgaste de los Ángeles.

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (g)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Número de esferas		12	11	8	6
N° de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		30	15	15	15

Fuente: Norma ASTM, C131.

Resultados obtenidos del desgaste de los agregados mediante la máquina de los ángeles (Anexo II)

Tabla 3.21. Ensayo de Desgaste de los Ángeles (gravilla).

Gradación	Peso inicial (g)	Peso final (gr)	% De desgaste (%)	Especificación ASTM
A				35% Max
B	5000,8	3665,8	26,70	35% Max
C	5000,5	3821,7	23,57	35% Max
D				35% Max

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3.7. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D5821-95)

Este ensayo determina el porcentaje, en peso, del material que presente una o más caras fracturadas de la muestra del agregado grueso.

Figura 3.28. Caras Fracturas del Agregado Grueso.

Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos del porcentaje de caras fracturadas (Anexo II)

Tabla 3.22. Ensayo del Porcentaje de Caras Fracturadas Grava.

Ensayo N°	1	2	3
Peso inicial (g)	1000,2	1000,6	1000,5
Peso fracturadas [F] (g)	744,5	802,3	799,4
Peso cuestionables [Q] (g)	101,2	103,3	102,5
Peso no fracturadas [N] (g)	154,5	95	98,6
% caras fracturadas	79,49	85,34	85,02
Promedio (%)	83,29		

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.23. Ensayo del Porcentaje de Caras Fracturadas Gravilla.

Ensayo N°	1	2	3
Peso inicial (g)	1000,6	1000,2	1000,4
Peso fracturadas [F] (g)	831,4	844,3	838,4
Peso cuestionables [Q] (g)	75,2	77,6	91,1
Peso no fracturadas [N] (g)	94	78,3	70,8
% caras fracturadas	86,85	88,29	88,37
Promedio (%)	87,84		

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3.8. Índice de lajas de los agregados pétreos (AASHTO C-142)

Este ensayo define el índice de lajas como el porcentaje en peso de partículas que tienen un espesor (dimensión mínima) inferior a 0,6 veces la dimensión media de la fracción de árido considerada, este método se emplea principalmente en áridos aplicados a tratamientos superficiales.

Figura 3.29. Determinación del Índice de Lajas.



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados obtenidos método para determinar el índice de lajas (Anexo II)

Tabla 3.24. Ensayo del Índice de Lajas.

Graduación del agregado	Peso de agregado utilizado	Peso Retenido en Tamiz Ranurado	Peso que Pasa Tamiz Ranurado	Índice de Lajas
	g	g	g	%
Gradación B	1000,2	830,18	170,02	17
Gradación D	1000,1	897,09	103,01	10,3

Fuente: Elaboración Propia.

3.4. DOSIFICACIÓN DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL BICAPA

Se procede a realizar la dosificación del tratamiento superficial mediante el método de la dimensión mínima promedio especificado en el Manual de Diseño de Carreteras volumen 4A elaborado por la Administración Boliviana de Carreteras (ABC) basado para su dosificación en los parámetros indicados según las especificaciones descritas.

Los agregados pétreos utilizados en el tratamiento superficial bicapa deben cumplir las especificaciones establecidas en la Tabla 3.3 que son los rangos de graduación 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 árido para un tratamiento superficial simple; como en nuestro caso se trata de un tratamiento superficial bicapa se repite el procedimiento para cada capa del tratamiento superficial bicapa 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 asfalto para el tratamiento haciendo variar porcentualmente según la tabla establecida en el Manual de la ABC.

La ecuación para determinar la dosis de agregado (kg/m^2) basada en otros parámetros como el factor de corrección, vacíos en el agregado, dimensión mínima promedio, Densidad real seca y densidad aparente del agregado, factor de desperdicio que depende de la dimensión mínima promedio.

$$C = M ((1 - 0.4V) H \times Drs. \times E)$$

La ecuación para determinar la dosis de ligante asfáltico (l/m^2) tanto para el asfalto convencional y modificado con polímeros, basado en varios parámetros o factor de corrección, dimensión mínima promedio y vacíos en el agregado entre otros.

$$B = Kx \left(\frac{0,40xHxTxV + S + A}{R} \right)$$

Una vez determinada las cantidades necesarias de ligante y agregado utilizados para cada capa del tratamiento superficial bicapa, según el método utilizado para la dosificación se realiza la proporcionalidad entre los valores conocidos y el área de las briquetas de Marshall para obtener las cantidades reales que se van a utilizar para la elaboración del tratamiento en el laboratorio.

En el caso del agregado fino se va a utilizar en un porcentaje mínimo en la base de las probetas como un esparcido para evitar que exista pérdida del asfalto, también para que exista mayor adherencia entre la primera y la segunda capa del tratamiento superficial según lo recomendado por la experiencia de proyectistas con experiencia respecto a este tema.

Los cálculos más detallados de la dosificación del tratamiento superficial bicapa están descritos paso a paso en el Anexo III.

Tabla 3.25. Granulometría del Agregado Utilizado en el Tratamiento Superficial Bicapa.

N° tamiz estándar	Abertura (mm.)	Porcentaje que pasa (por peso)			
		B		D	
		Agregado utilizado	Especificación	Agregado utilizado	Especificación
1"	25.4	100.00	100		
3/4"	19	91.91	90-100		
1/2"	12,5	28.40	0-35	100,00	100
3/8"	9,50	4.26	0-12	99,16	85-100
N°4	4,75	0.10	-	30,79	0-35
N°8	2,36	0.10	-	5,84	0-8
N°10	2,00	0.10	-	1,64	-
N°30	0,60	0.10	-	1,05	-
N°50	0,30	0.10	-	0,91	-
N°100	0,15	0.10	-	0,70	-
N°200	0,075	0.10	0-1	0,40	0-1

Fuente: Elaboración Propia.

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

Tabla 3.26. Distribución de Dosis total del Ligante, en Capas Individuales.

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

Fuente: Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos volumen 4A.

Tabla 3.27. Dosificación del Tratamiento Superficial Bicapa Convencional.

Capas	Material	Cantidad
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 40% del total	16,07
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 55% del total	19,64
	agregado (g/m ²)	90,52
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 41% del total	14,64
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 56% del total	20,00
	agregado (g/m ²)	90,52
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 42% del total	15,00
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 57% del total	20,36
	agregado (g/m ²)	90,52
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 43% del total	15,36
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 58% del total	20,71
	agregado (g/m ²)	90,52
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 44% del total	15,71
	agregado (g/m ²)	184,52
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 59% del total	21,07
	agregado (g/m ²)	90,53
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 45% del total	16,07
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 60% del total	21,43
	agregado (g/m ²)	90,52

Fuente: Elaboración Propia.

La cantidad de asfalto se distribuye según lo establecido en la tabla para la primera capa 40 a 45 % del total, para la segunda de un 55 a 60 % del total, el espesor del tratamiento superficial bicapa tiene que llegar a 2.5 cm, según lo establecido en las normas.

Tabla 3.28. Dosificación del Tratamiento Superficial Bicapa Modificado.

Capas	Material	Cantidad
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 40% del total	14,93
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 55% del total	18,25
	agregado (g/m ²)	90,52
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 41% del total	13,32
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 56% del total	18,58
	agregado (g/m ²)	90,52
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 42% del total	13,94
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 57% del total	18,91
	agregado (g/m ²)	90,52
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 43% del total	14,27
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 58% del total	19,25
	agregado (g/m ²)	90,52
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 44% del total	14,60
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 59% del total	19,58
	agregado (g/m ²)	90,52
1ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 45% del total	14,93
	agregado (g/m ²)	184,21
2ª aplicación	asfalto (g/m ²) a 60% del total	19,91
	agregado (g/m ²)	90,52

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.30. Compactación del Tratamiento Superficial Bicapa.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.31. Desmoldado de las Briquetas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.32. Briquetas del Tratamiento Superficial Bicapa Convencional.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.33. Briquetas del Tratamiento Superficial Bicapa Modificado.



Fuente: Elaboración Propia.

3.4.1. Ensayo de Estabilidad y Fluencia

El objetivo principal de realizar este laboratorio es el de conocer la estabilidad y la fluencia o deformación de las briquetas realizadas anteriormente, el comportamiento de la densidad, el % de vacíos de la mezcla total.

Figura 3.34. Determinación de la Estabilidad y Fluencia.



Fuente: Elaboración Propia.

A continuación en las tablas siguientes se observan los resultados obtenidos de la estabilidad, fluencia densidades y el porcentaje % de vacíos de las mezclas.

En la Tabla 3.29 se encuentran los resultados de la planilla del Marshall del tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto convencional (85/100).

Tabla 3.29. Resultados del Tratamiento Superficial Convencional.

Contenido de cemento asfáltico residual	Contenido de agregado pétreo	Densidad promedio (g/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
11,00	89,00	1,856	18,60	8.149,83	3,39
11,20	88,79	1,861	18,16	8.199,96	3,44
11,48	88,52	1,866	17,62	8.249,12	3,78
11,61	88,39	1,868	17,38	8.270,48	4,02
11,81	88,19	1,868	17,14	8.270,29	4,25
12,01	87,99	1,866	17,01	8.245,80	4,25
Cálculos en función a la ecuación	X	11,78	12,01	11,72	11,90
	Y máx.	1,8698	16,9850	8.268,9085	4,21

Fuente: Elaboración Propia.

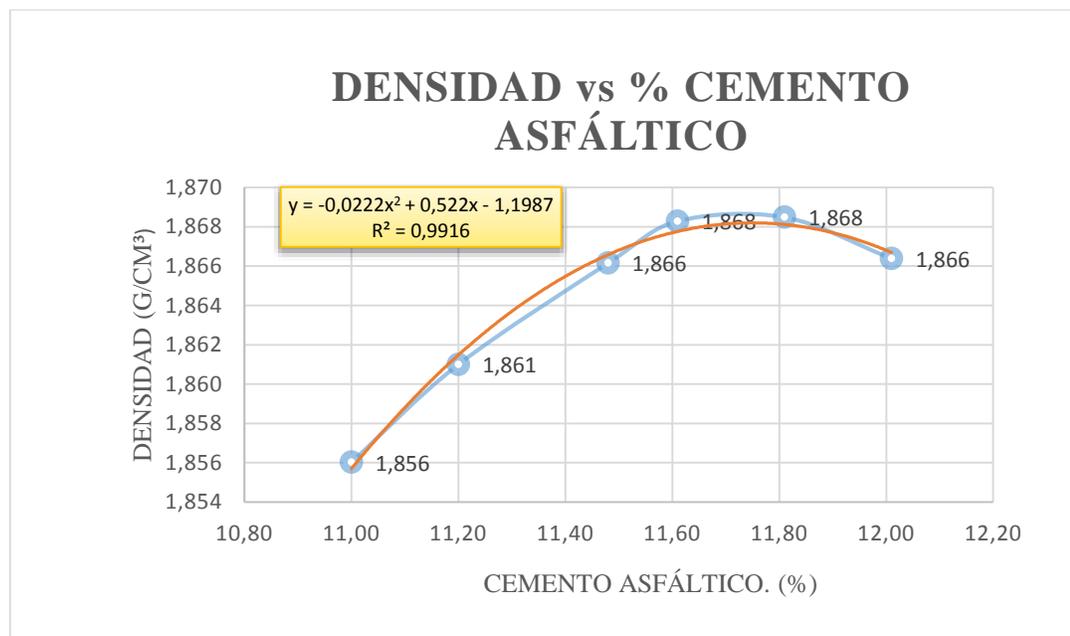
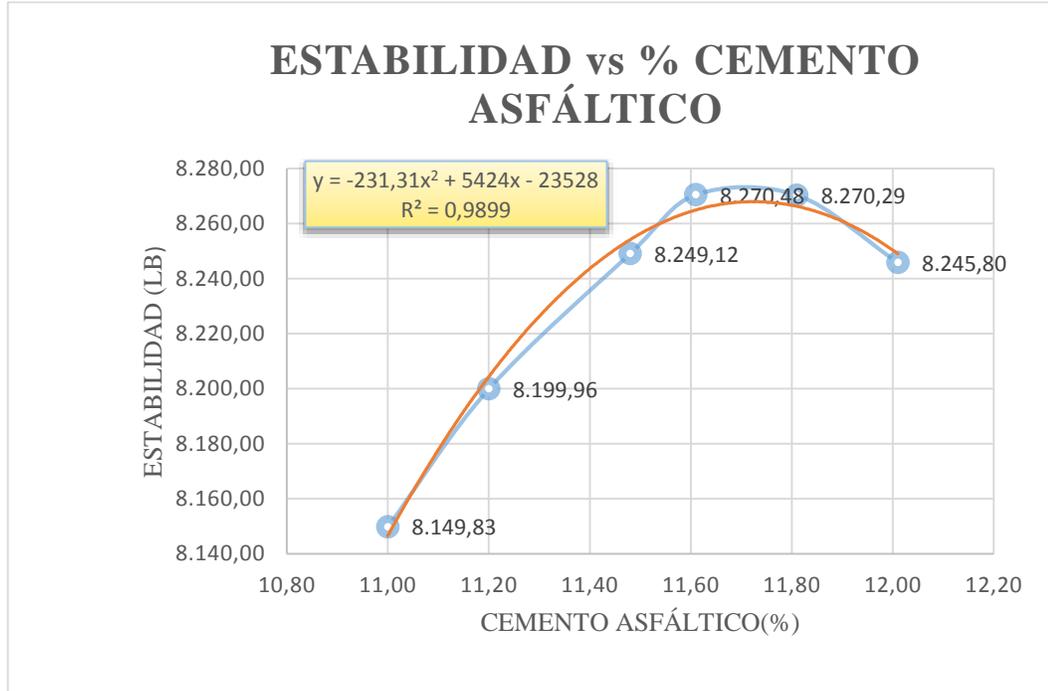
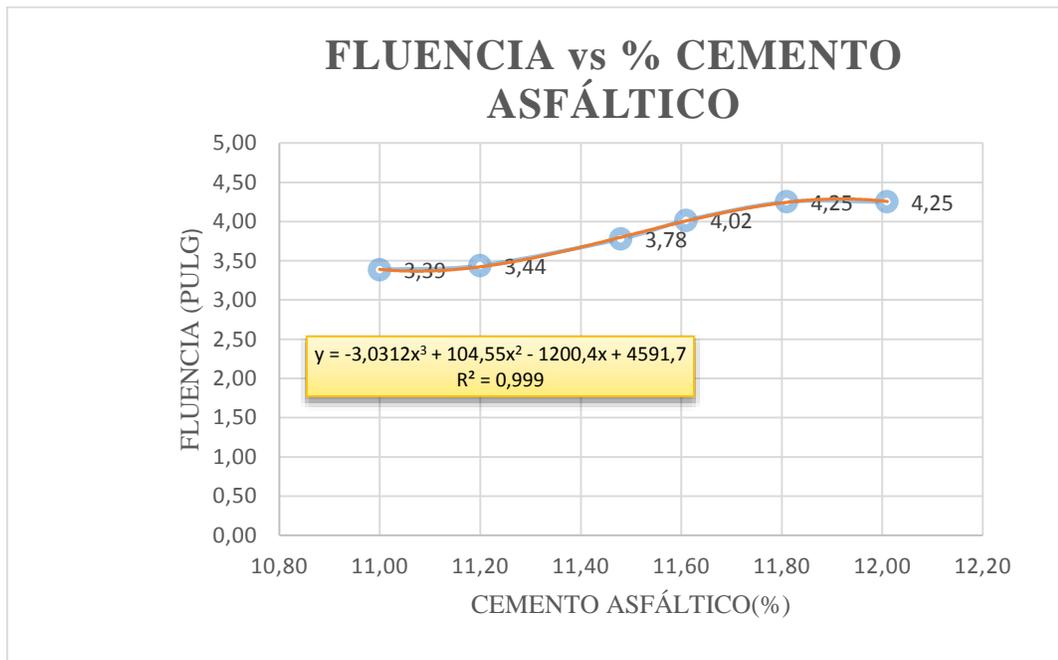
Figura 3.35. Densidad Promedio del Tratamiento Superficial Convencional.

Figura 3.36. Estabilidad del Tratamiento Superficial Convencional.



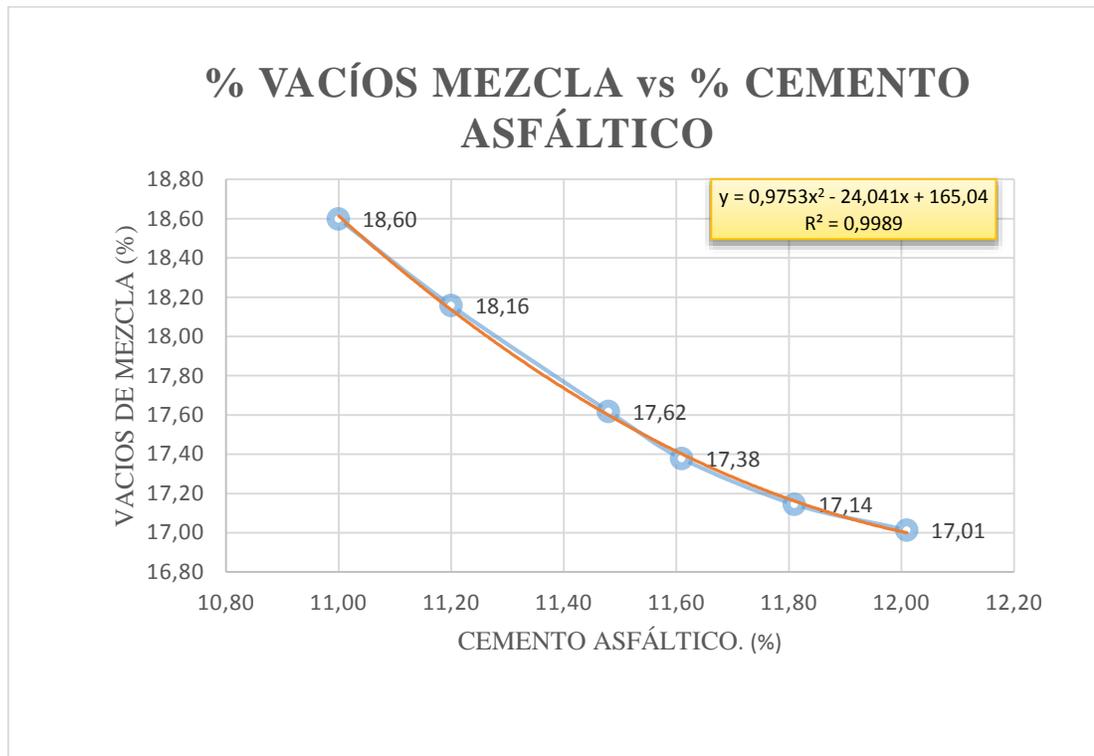
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.37. Fluencia del Tratamiento Superficial Convencional.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.38. Porcentaje (%) de Vacíos de la Mezcla del Tratamiento Superficial Convencional.



Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 3.30 se encuentran los resultados obtenidos de la planilla de Marshall del tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto modificado con polímeros, la estabilidad y la fluencia las propiedades más importantes para evaluar en este proyecto de investigación.

Tabla 3.30. Resultados del Tratamiento Superficial Modificado.

Contenido de cemento asfáltico residual	Contenido de agregado pétreo	Densidad promedio (g/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
10,29	89,71	1,93	16,19	10.919,23	4,37
10,40	89,60	1,94	15,72	10.965,58	4,46
10,68	89,32	1,95	14,93	11.064,44	4,80
10,87	89,13	1,95	14,50	11.068,23	5,04
11,06	88,94	1,96	14,15	11.028,51	5,12
11,25	88,75	1,96	13,95	10.960,52	5,20
Cálculos en función a la ecuación	X	11,16	11,24	10,81	11,28
	Y máx.	1,9552	13,9512	11.070,7797	5,12

Fuente: Elaboración Propia.

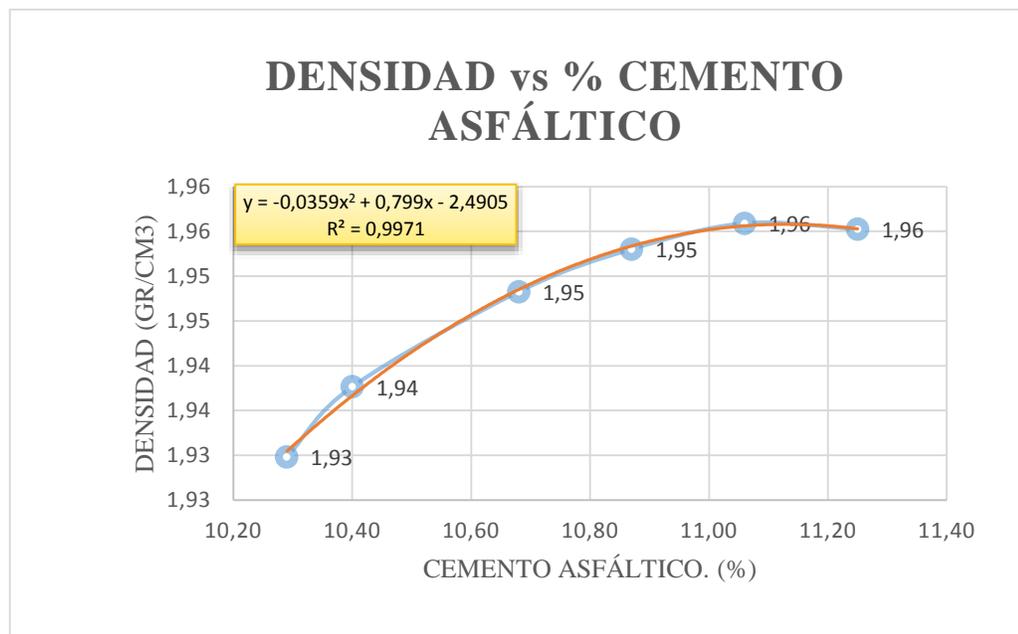
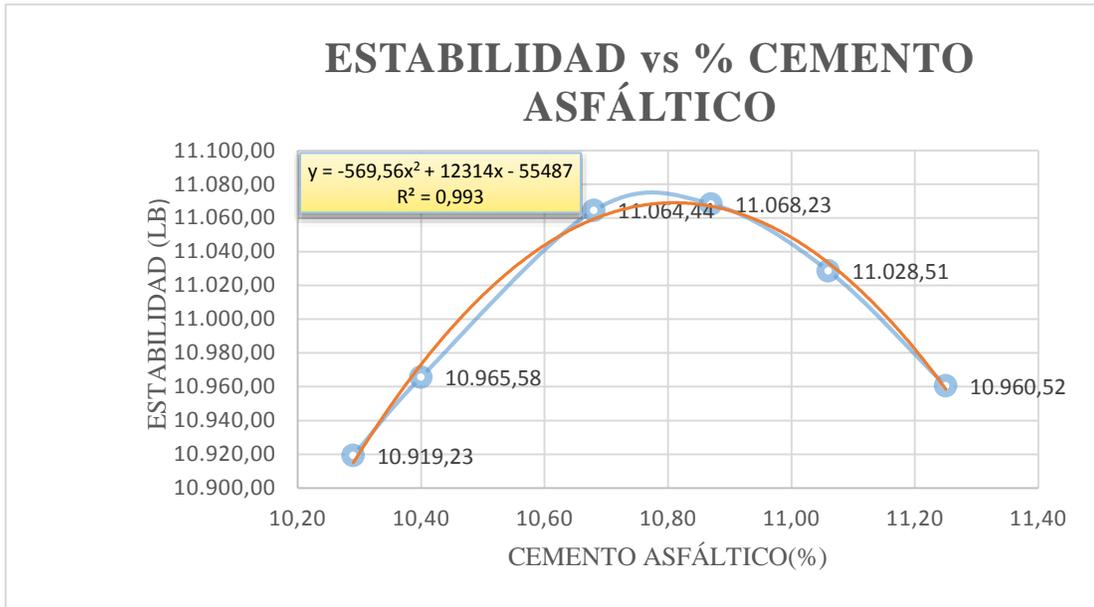
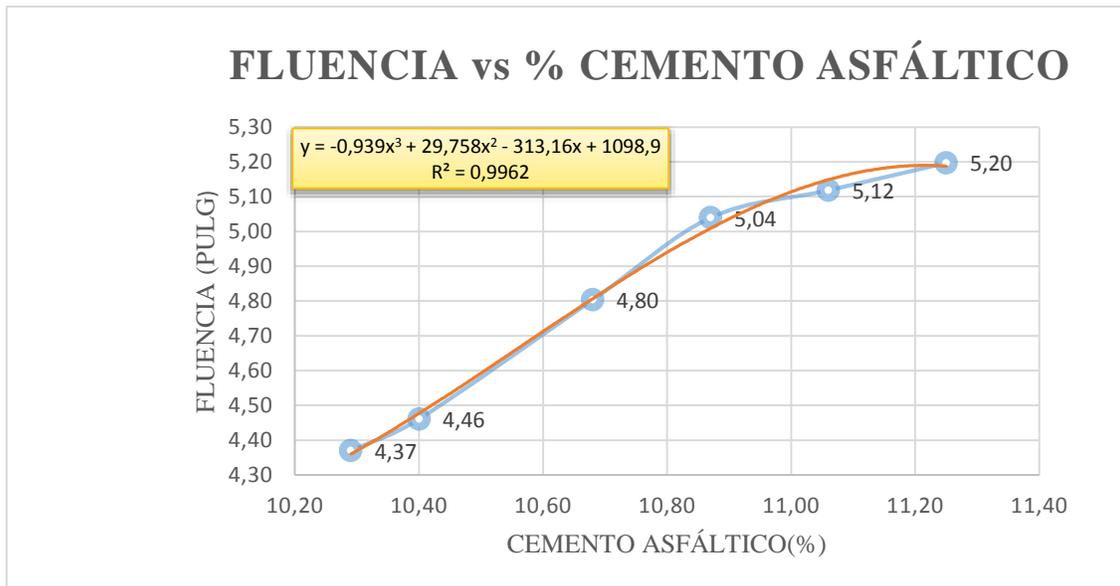
Figura 3.39. Densidad del Tratamiento Superficial Modificado con Polímeros.

Figura 3.40. Estabilidad del Tratamiento Superficial Modificado con Polímeros.



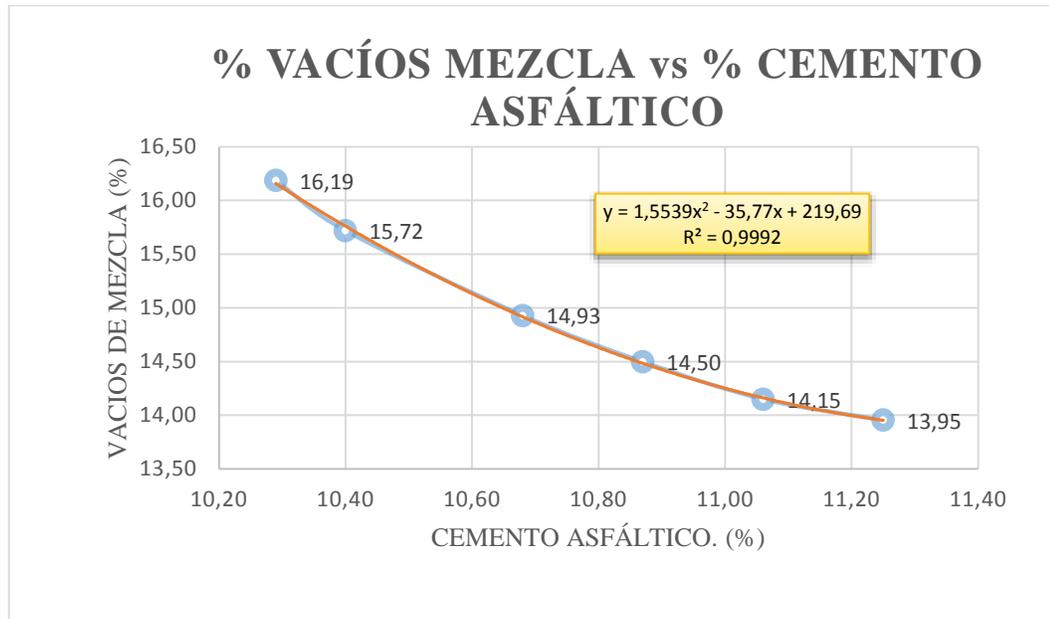
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.41. Fluencia del Tratamiento Superficial Modificado con Polímeros.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.42. Porcentaje (%) de Vacíos de la Mezcla del Tratamiento Superficial Modificado con Polímeros.



Fuente: Elaboración Propia.

Desarrollado para evaluar el tratamiento superficial bicapa con asfalto convencional y asfalto modificado con polímeros, comparando cuál de los dos tratamientos resiste una carga máxima y presenta una mayor deformación que va a experimentar la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad hasta el instante que se produce la falla.

3.4.2. Ensayo del Vialit

Este ensayo fue desarrollado para evaluar la adherencia del agregado utilizado y los ligantes asfálticos, así como también la resistencia al desprendimiento entre estos mediante la placa del vialit.

El procedimiento empleado en este ensayo está conforme a los lineamientos establecidos por el Departamento de Transporte de California.

Para obtener la dosificación de los materiales del tratamiento superficial bicapa se realizó el mismo procedimiento que en la elaboración de las briquetas o probetas de Marshall con

la única diferencia que para determinar las proporciones del material varía el área del molde en el cual se va a emular el tratamiento superficial para realizar el ensayo.

Figura 3.43. Dispositivo del Ensayo de Vialit.



Fuente: Elaboración Propia.

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

$$\% \text{ pérdida o desprendimiento} = \frac{P_{maev} - P_{mdev}}{P_{ag}} * 100$$

Donde se toma en cuenta el peso de la muestra antes del ensayo de Vialit, Peso de la muestra después del ensayo de Vialit y el peso del agregado colocado inicialmente.

La cantidad de asfalto se distribuye en un 45% del total para la primera aplicación y un 60% del total para la segunda aplicación.

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

Tabla 3.31. Dosificación del Ensayo del Vialit Convencional.

Tratamiento superficial convencional		Cantidad de agregado utilizado según el tipo de granulometría	
Material	Asfalto (g/m ²)	Agregado B (g/m ²)	Agregado D (g/m ²)
1ª aplicación	168,7	1934,33	-
2ª aplicación	225,01	-	950,53

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.32. Dosificación del Ensayo del Vialit Modificado.

Tratamiento superficial modificado con polímeros		Cantidad de agregado utilizado según el tipo de granulometría	
Material	Asfalto (g/m ²)	Agregado B (g/m ²)	Agregado D (g/m ²)
1ª aplicación	158,80	1934,33	-
2ª aplicación	209,06	-	950,53

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.44. Distribución del Agregado en el Ensayo de Vialit.

Fuente: Elaboración propia.

**a) Para el tratamiento superficial bicapa con cemento asfáltico convencional
(85/100)**

Tabla 3.33. Resultados del Ensayo de Vialit Convencional.

Nº muestra	Porcentaje de desprendimiento de agregado				
	Primera capa		Segunda capa		Total
	g	%	g	%	%
1	49,70	2,36	41,60	3,54	5,90
2	45,90	2,18	55,64	4,73	6,92
3	51,99	2,47	60,80	5,17	7,64
4	60,52	2,88	51,60	4,39	7,27
5	32,18	1,53	43,68	3,72	5,25
6	47,85	2,28	55,10	4,69	6,96
7	43,30	2,06	63,49	5,40	7,46
8	51,48	2,45	59,24	5,04	7,49
9	53,20	2,53	44,82	3,81	6,34
10	48,69	2,32	39,71	3,38	5,69
11	58,96	2,80	58,10	4,94	7,75
12	59,20	2,81	61,37	5,22	8,04
13	48,24	2,29	40,97	3,49	5,78
14	61,85	2,94	49,28	4,19	7,13
15	52,20	2,48	58,61	4,99	7,47
Media	51.02	2.43	52.27	4.45	6.82
Total	%	100			93.18 %
	%	6.82			

Fuente: Elaboración Propia.

b) Para el tratamiento superficial bicapa con cemento asfáltico modificado con polímeros (60/85)

Tabla 3.34. Resultados del Ensayo de Vialit Modificado.

N° muestra	Porcentaje de desprendimiento de agregado				
	Primera capa		Segunda capa		Total
	g	%	g	%	%
1	35,10	1,68	32,29	2,78	4,46
2	36,50	1,74	37,05	3,20	4,94
3	33,85	1,62	31,04	2,68	4,29
4	27,90	1,33	33,46	2,89	4,22
5	35,36	1,69	35,30	3,04	4,73
6	33,40	1,60	27,72	2,39	3,99
7	30,72	1,47	36,41	3,14	4,61
8	36,22	1,73	37,49	3,23	4,96
9	34,40	1,64	29,10	2,51	4,15
10	29,90	1,43	34,21	2,95	4,38
11	31,70	1,51	37,63	3,25	4,76
12	34,61	1,65	31,42	2,71	4,36
13	38,73	1,85	36,00	3,10	4,95
14	36,34	1,74	26,25	2,26	4,00
15	31,24	1,49	36,56	3,15	4,65
Media	33,73	1,61	33,46	2,89	4.49
Total	%	100			95.51 %
	%	4.49			

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.3. Ensayo de Barrido

El ensayo de barrido, estandarizado por la norma ASTM D7000, sirve como parámetro para medir el desempeño del tratamiento superficial en su etapa inicial, es utilizado para aproximar el tiempo de apertura al tránsito luego de colocar el tratamiento superficial.

Figura 3.45. Ensayo del Barrido ASTM D7000.



Fuente: NCHRP, 2011.

Con este ensayo se simulara el barrido de la superficie en campo; esta metodología también es utilizada para evaluar la pérdida de agregado y la sensibilidad de esta a la variación de la cantidad de ligante aplicado.

Al igual que en el ensayo del Vialit en este ensayo, el cálculo de la cantidad de ligante y agregados se realizó usando la misma metodología.

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

$$\% \text{ perdida} = \frac{(P_{mabi} - P_{mbi}) + (P_{mbi} - P_{mbf}) * 1.33}{P_{ault}}$$

Donde se toma en cuenta el peso de la muestra antes del barrido inicial, peso de la muestra después del barrido inicial, peso de la muestra después del barrido final y el peso del agregado colocado inicialmente.

Tabla 3.35. Dosificación del Ensayo del Barrido Convencional.

Tratamiento superficial convencional		Cantidad de agregado utilizado según el tipo de granulometría	
Material	Asfalto (g/m ²)	Agregado B (g/m ²)	Agregado D (g/m ²)
1ª aplicación	88,98	1019,88	-
2ª aplicación	118,63	-	501,17

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.36. Dosificación del Ensayo del Barrido Modificado.

Tratamiento superficial modificado con polímeros		Cantidad de agregado utilizado según el tipo de granulometría	
Material	Asfalto (g/m ²)	Agregado B (g/m ²)	Agregado D (g/m ²)
1ª aplicación	82,67	1019,88	-
2ª aplicación	110,23	-	501,17

Fuente: Elaboración Propia.

La cantidad de asfalto se distribuye en un 45% del total para la primera aplicación y un 60% del total para la segunda aplicación.

Figura 3.46. Muestra del Ensayo del Barrido.

Fuente: Elaboración Propia.

a) **Para el tratamiento superficial bicapa con cemento asfáltico convencional
(85/100)**

Tabla 3.37. Resultados del Ensayo de Barrido Convencional.

Ensayo	Tratamiento superficial bicapa				% de la pérdida del agregado
	Primera capa (g)	Segunda capa (g)	Unidad : Gramos		
Nº	Barrido inicial (Bi)	Barrido inicial (Bi)	Total de material desprendido	Peso de la muestra después del (Bi)	
1	20,70	29,60	50,38	1678,36	4,55
2	16,58	23,48	40,06	1688,60	4,56
3	35,50	18,40	53,90	1674,76	4,55
4	26,00	32,92	58,92	1669,74	4,55
5	18,90	28,90	47,80	1680,86	4,56
6	20,60	25,13	45,73	1682,93	4,56
7	24,59	36,82	61,41	1667,25	4,55
8	29,35	32,68	62,03	1666,63	4,55
9	25,20	38,60	63,80	1664,86	4,55
10	19,80	28,64	48,44	1680,22	4,56
11	23,65	31,12	54,77	1673,89	4,55
12	18,90	28,22	47,12	1681,54	4,56
13	26,28	33,52	59,80	1668,86	4,55
14	22,60	29,40	52,00	1676,66	4,55
15	18,31	26,35	44,66	1684,00	4,56
Media	22,68	29,14	52,25	1675,93	4,55

Fuente: Elaboración Propia.

b) Para el tratamiento superficial bicapa con cemento asfáltico modificado con polímeros (60/85)

Tabla 3.38. Resultados del Ensayo de Barrido Modificado.

Ensayo	Tratamiento superficial bicapa				% de la pérdida del agregado
	primera capa (g)	segunda capa (g)	Unidad : Gramos		
N°	Barrido inicial (Bi)	Barrido inicial (Bi)	total de material desprendido	peso de la muestra después del (Bi)	
1	38,40	37,50	75,90	1638,05	4,50
2	17,60	38,62	56,22	1657,73	4,51
3	32,36	25,35	57,71	1656,24	4,51
4	25,54	39,11	64,65	1649,30	4,51
5	34,25	40,70	74,95	1639,00	4,50
6	32,67	44,36	77,03	1636,92	4,50
7	38,62	31,52	70,14	1643,81	4,50
8	36,40	40,12	76,52	1637,43	4,50
9	30,15	37,82	67,91	1646,04	4,50
10	27,40	36,05	63,45	1650,50	4,51
11	29,34	37,82	67,16	1646,79	4,50
12	26,90	34,62	61,52	1652,43	4,51
13	30,48	27,42	57,90	1656,05	4,51
14	26,74	36,85	63,59	1650,36	4,51
15	29,15	39,00	68,15	1645,80	4,50
media	29,89	36,10	66,51	1647,08	4,50

Fuente: Elaboración propia.

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

3.4.4. Resultados Obtenidos de los Ensayos Realizados

Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de los cementos asfálticos que forman parte del tratamiento superficial bicapa.

Tabla 3.39. Caracterización Cemento Asfáltico 85/100.

Ensayo	Unidad	Valor numérico
penetración	mm.	96
ductilidad	cm.	103
Punto de inflamación	° C	310
Viscosidad cinemática	mm ² /s	325
Punto de ablandamiento	° C	44
Gravedad específica	g/cm ³	1,028

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.40. Caracterización Cemento Asfáltico 60/85.

Ensayo	Unidad	Valor numérico
Recuperación elástica	%	95
Índice de penetración	-	0.26

Fuente: Elaboración Propia.

De igual forma, se muestran los resultados de la caracterización de los agregados pétreos que son utilizados en la dosificación del tratamiento superficial bicapa.

Tabla 3.41. Caracterización de los Agregados Pétreos.

Ensayo	Unidad	parámetros	Grava	Gravilla	Arena
granulometría	g	-	Franja "B"	Franja "D"	Franja "E"
Peso específico y de absorción	g/cm ³	seco	2,60	2,56	2,63
		Superficialmen te seco	2,64	2,59	2,67
		aparente	2,71	2,64	2,72
		% de absorción	1,56	1,23	1,22
Peso unitario	g/cm ³	Suelto	1,43	1,39	1,51
		compactado	1,51	1,57	1,74
Equivalente de arena	%	-	-	-	76,4
Desgaste de los agregados	%	-	26,70	23,57	-
Porcentaje de caras fracturadas	%	-	83,29	87,84	-
Índice de lajas	%	-	17,0	10,3	-

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.4.1. Ensayos realizados para la evaluación del comportamiento y desempeño del tratamiento superficial bicapa

Una vez realizado todo el trabajo de laboratorio aplicando el método de Marshall para ambas dosificaciones, se procede a dar a conocer los resultados para realizar un comparativo de sus propiedades.

De igual forma, se evalúan los resultados obtenidos de los ensayos para evaluar el desempeño del tratamiento superficial.

Las siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de los ensayos de estabilidad y fluencia, ensayo del Vialit y finalmente el ensayo del barrido.

Tabla 3.42. Resultados de la Evaluación del Tratamiento Superficial Bicapa.

Ensayo	Unidad	Tratamiento superficial bicapa convencional	Tratamiento superficial bicapa modificado
Estabilidad	Lb	8268,91	11070,78
Fluencia	Pulg.	4,21	5,12
Vialit	%	93,18	95,51
Barrido	%	4,55	4,50

Fuente: Elaboración Propia.

3.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se va a analizar los resultados obtenidos de los ensayos realizados para evaluar el comportamiento del ligante asfáltico en el tratamiento superficial bicapa, realizando una comparación de sus propiedades; de igual forma se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos para evaluar el desempeño del tratamiento superficial bicapa.

3.5.1. Ensayo de Estabilidad y Fluencia

En este ensayo las principales propiedades que se van a evaluar son la estabilidad y la fluencia, observando de igual forma como se comportan las densidades y el porcentaje (%) de vacíos total de la mezcla, realizando una comparación de las muestras elaboradas con asfalto convencional y asfalto modificado con polímeros, determinando cuál de los ligantes asfálticos es el más apropiado para la construcción de un tratamiento superficial bicapa.

Se fabricaron treinta probetas para el tratamiento superficial bicapa convencional y treinta para el tratamiento superficial modificado, con contenidos de asfaltos diferentes según la el método de la dimensión mínima promedio para la dosificación según la Tabla 3.26 que

establece los rangos de porcentaje (%) de asfalto a utilizar en función a las capas establecidas del tratamiento superficial para la primera capa en un rango de 40 a 45 % y para la segunda de 55 a 60 % del total del cemento asfáltico determinado para la dosificación.

Como primer punto se va a analizar la estabilidad del tratamiento superficial bicapa como se presentan en la siguiente tabla.

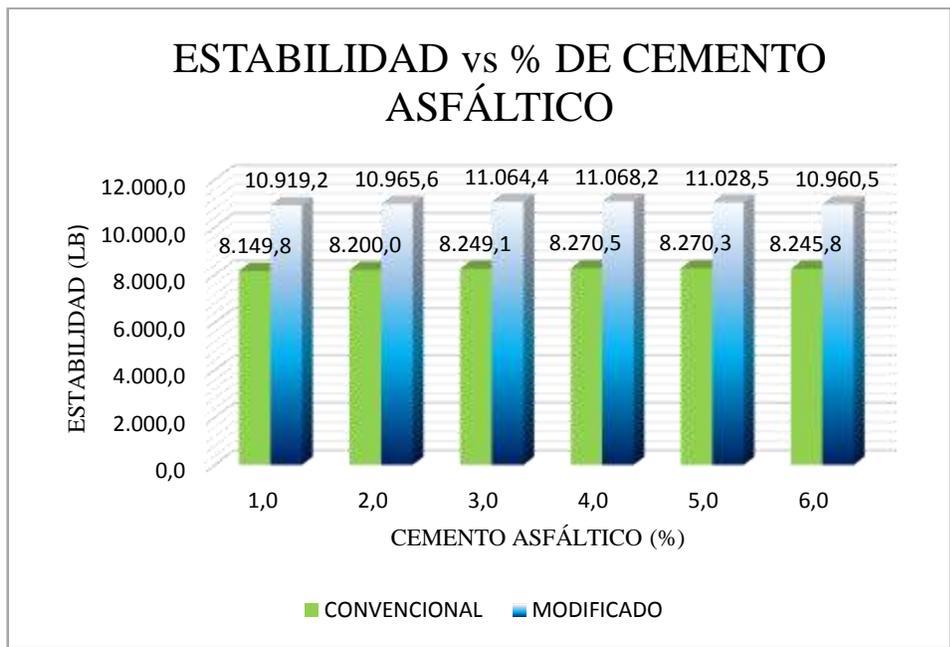
Tabla 3.43. Resultados de la Evaluación de las Estabilidades.

Tratamiento convencional	Tratamiento modificado
Estabilidad(lb)	Estabilidad(lb)
8149,83	10919,23
8199,96	10965,58
8249,12	11064,44
8270,48	11068,23
8270,29	11028,51
8245,80	10960,52
11,72	10,81
8268,91	11070,78

Fuente: Elaboración Propia.

La propiedad que permite que un pavimento pueda resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones es la estabilidad; en la investigación se puede apreciar el incremento significativo de la estabilidad del tratamiento superficial bicapa preparado con asfalto modificado con polímeros, como se verifica en la Figura 3.47 mejora significativamente esta propiedad.

Figura 3.47. Diagrama Comparativo de la Estabilidad.



Fuente: Elaboración Propia.

La diferencia porcentual que existe entre las estabilidades es aproximadamente 25.31% como se muestra en la Figura 3.48 mejorando considerablemente esta propiedad.

Figura 3.48. Diagrama Comparativo de las Estabilidades Máximas.



Fuente: Elaboración Propia.

Brindándole mejor comportamiento al tratamiento superficial bicapa al estar expuesto a altas temperaturas.

Desarrollando estabilidades corregidas superiores que no están dentro del rango establecido según la normativa de Marshall para mezclas densas, afectado principalmente por el factor de corrección que se utiliza en función de la altura de las probetas que en este caso es una altura mínima, debido al espesor del tratamiento superficial bicapa.

De esta comparación se deduce que el asfalto modificado con polímero sería el más adecuado para la construcción del tratamiento superficial, por los altos valores de estabilidad presentados.

Con los resultados de la Tabla 3.44 se va a realizar la gráfica para hacer el análisis de resultados de la fluencia o flujo (0.01 pulg).

Tabla 3.44. Resultados de la Evaluación de la Fluencia.

Tratamiento convencional	Tratamiento modificado
Fluencia (Pulg)	Fluencia (Pulg)
3,39	4,37
3,44	4,46
3,78	4,80
4,02	5,04
4,25	5,12
4,25	5,20
11,90	11,28
4,21	5,12

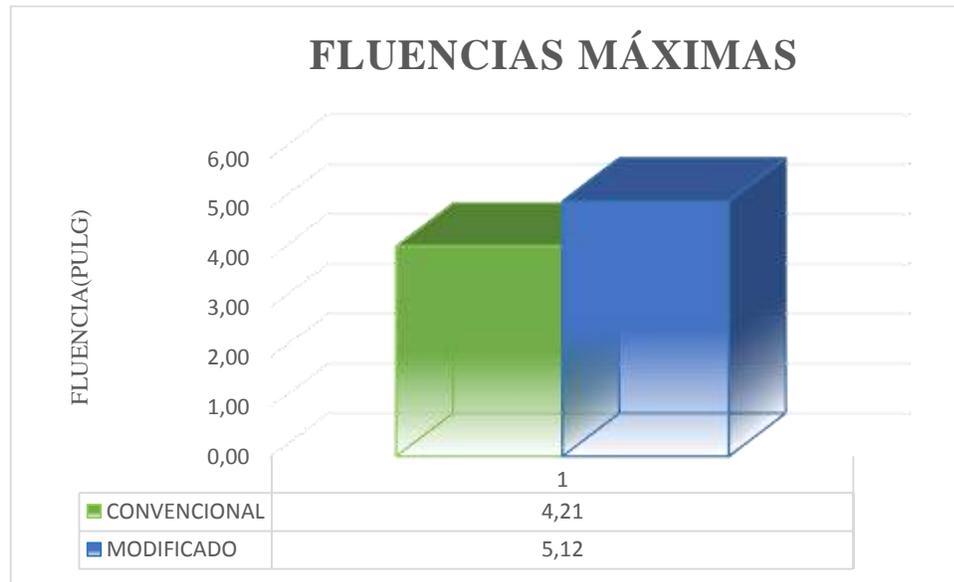
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.49. Diagrama Comparativo de la Fluencia.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.49 se aprecia el incremento del flujo en ambas mezclas del tratamiento superficial bicapa a medida que va aumentando el porcentaje de asfalto, notándose que con el asfalto modificado con polímeros desarrollo una fluencia superior que no se encuentra dentro de los rangos establecidos para una mezcla asfáltica densa, por las razones explicadas anteriormente para la estabilidad, ya que se trata de un tratamiento superficial que tiene un espesor aproximado de 2.5 cm.

En la gráfica se observa el comportamiento que puede tener esta propiedad mecánica a mayor fluencia que presenta una briqueta mayor va ser la carga que va soportar el tratamiento superficial bicapa.

Figura 3.50. Diagrama Comparativo de las Fluencias Máximas.

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 3.50 se muestran las fluencias máximas, la diferencia porcentual que existe entre ambas es de 17.77 % se comporta en función a la estabilidad a mayor estabilidad mayor fluencia, la ventaja de utilizar como ligante de un tratamiento superficial el asfalto modificado con polímeros es de que se va a deformar la carpeta por las cargas que debe soportar esta mezcla, volviendo a su posición original debido al polímero que tiene incluido el asfalto modificado que mejora el comportamiento durante la vida útil de la mezcla siendo capaz de absorber las tensiones sin que se produzca la rotura.

La estabilidad y la fluencia son propiedades muy importantes cuando se trata de un mezcla asfáltica; de igual forma se va a analizar el comportamiento de la densidad y el porcentaje total (%) de vacíos de la mezcla total del tratamiento superficial bicapa.

En la tabla 3.45 se realiza la comparación de las densidades del tratamiento convencional y modificado con polímeros presentándose diferentes densidades en función a los porcentajes de asfalto utilizados para la dosificación según el método de Marshall.

Tabla 3.45. Resultados de la Evaluación de la Densidad.

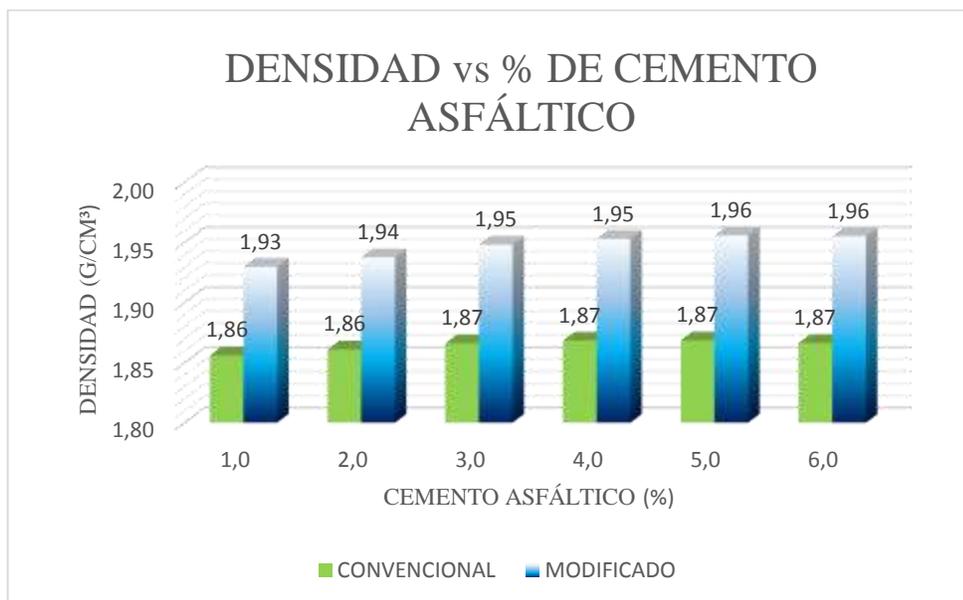
Tratamiento convencional	Tratamiento modificado
Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
1,86	1,93
1,86	1,94
1,87	1,95
1,87	1,95
1,87	1,96
1,87	1,96
11,78	11,16
1,87	1,96

Fuente: Elaboración Propia.

Se puede determinar que el tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto modificado con polimeros tiene un incremento aproximado 4% con referencia a las densidades del tratamiento superficial realizado con asfalto convencional.

De igual forma la densidad máxima del tratamiento realizado con asfalto modificado con polimeros es mayor y al ser mayor los porcentajes de vacíos de la muestra también reducen comparado con el tratamiento convencional.

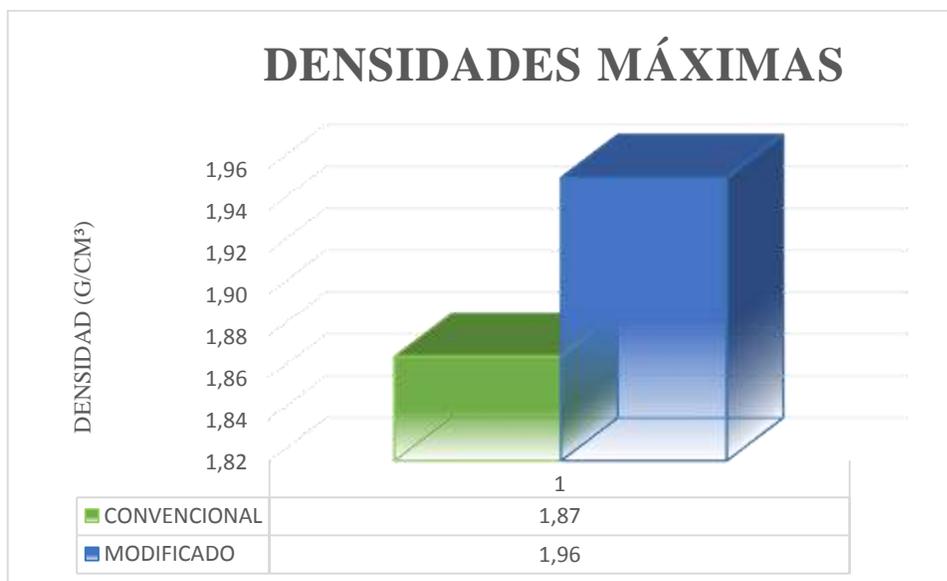
Figura 3.51. Diagrama Comparativo de la Densidad.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.52 se muestran las densidades máximas, la diferencia porcentual es de 4.59% mayor que la convencional se llega a una conclusión de que a mayor porcentaje (%) de asfalto en la dosificación la densidad se va incrementando.

Figura 3.52. Diagrama Comparativo de las Densidades Máximas.

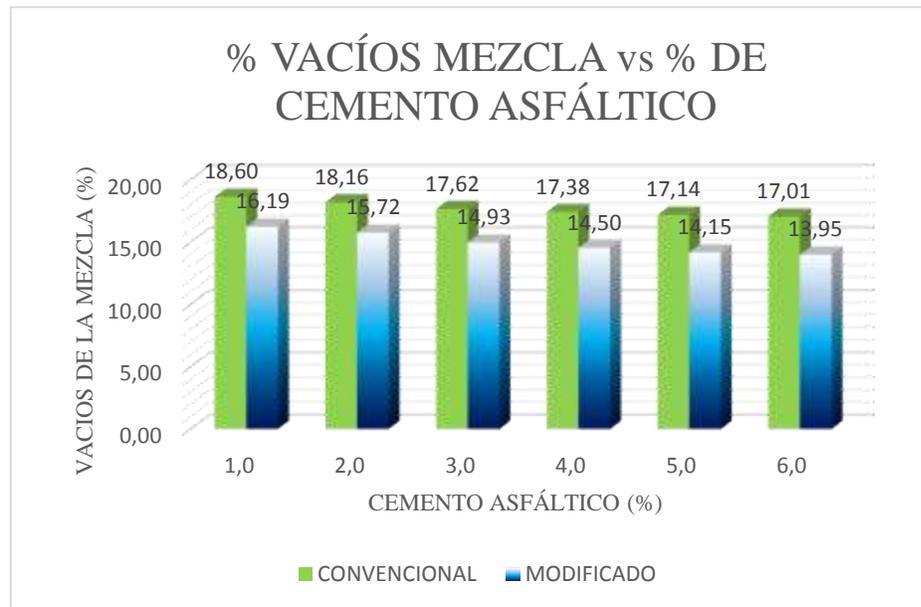


Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.46. Resultados de la Evaluación de Porcentaje de Vacíos de la Mezcla.

Tratamiento convencional	Tratamiento modificado
Vacíos de la mezcla (%)	Vacíos de la mezcla (%)
18,60	16,19
18,18	15,72
17,62	14,93
17,38	14,50
17,14	14,15
17,01	13,95
12,01	11,24
16,98	13,95

Fuente: Elaboración Propia.

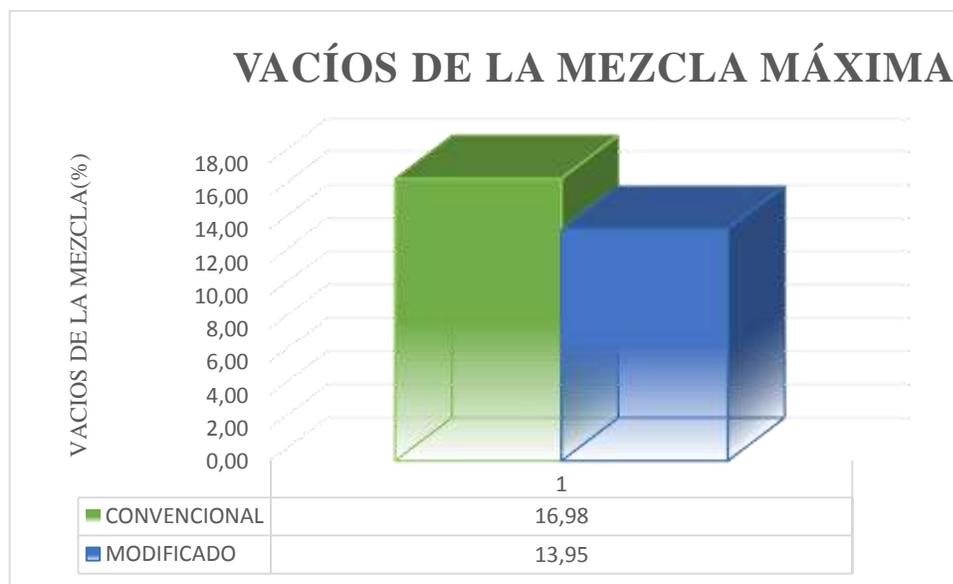
Figura 3.53. Diagrama Comparativo del Porcentaje de Vacíos de la Mezcla (%).

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 3.46 se muestra que el porcentaje (%) de vacíos en el tratamiento superficial realizado con asfalto modificado con polimeros es menor que en el tratamiento convencional.

Se estima que debido a los polimeros añadidos en el asfalto modificado reducen los vacíos, en la Figura 3.53 se observan los menores porcentajes de vacíos en función a las densidades máximas.

Figura 3.54. Diagrama comparativo del porcentaje de vacíos de la mezcla máximos (%).



Fuente: Elaboración Propia.

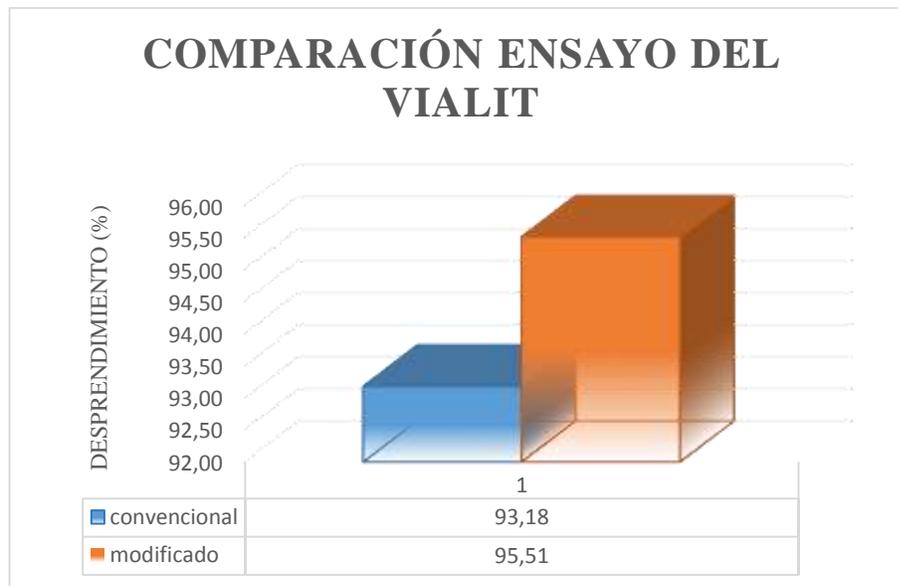
La diferencia porcentual entre el porcentaje de vacíos de la mezcla del tratamiento superficial convencional es mayor 17.84% en la Figura 3.54 lo que demuestra que el tratamiento superficial realizado con asfalto modificado con polímeros es más conveniente por el menor contenido de vacíos que presenta, favoreciendo al ligante asfáltico, ya que se va a presentar mayores características adhesivas entre los materiales que forman parte del tratamiento.

3.5.2. Ensayo del Vialit

Para determinar cuál de los dos ligantes asfálticos provee una mejor adherencia, se realizó la comparación de los resultados de ambos tratamientos en donde se hizo la evaluación

del material desprendido en cada ensayo. También se evaluó la condición del agregado desprendido, llegando a la conclusión que no conviene para la construcción de los tratamientos superficiales usar un ligante que no tenga buena adherencia con los agregados.

Figura 3.55. Diagrama Comparativo del Ensayo del Vialit.



Fuente: Elaboración Propia.

De la Figura 3.55 se observan las muestras elaboradas con el asfalto convencional con un porcentaje de desprendimiento de 93.18%; este porcentaje de desprendimiento ésta entre los rangos de 90 a 95 % de desprendimiento del agregado, lo que indica adherencia regular entre los agregados pétreos y el asfalto convencional.

Las muestras elaboradas con el asfalto modificado con polímeros con un porcentaje de desprendimiento del 95.51 %, este porcentaje indica una buena adherencia entre el agregado y el asfalto modificado con polímeros, ya que se encuentra por encima del 95% del agregado desprendido.

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 cemento asfáltico convencional presenta sensibilidad a la temperatura, lo cual provoca que el desprendimiento sea un poco mayor comparado con el asfalto modificado con polímeros.

3.5.3. Ensayo del Barrido

Haciendo una comparación de los resultados obtenidos con ambos tipos de asfalto, en la Figura 3.56. Se observa la diferencia en los resultados de ambos ligantes, en la cual se aprecia la diferencia porcentual del asfalto modificado con polímeros que presenta menor pérdida de agregado con 4,50 % y el asfalto convencional de 4,55 % con un porcentaje de casi el 1%, mayor siendo la mejor alternativa para la construcción del tratamiento superficial bicapa destacando el desempeño que presenta este asfalto modificado con polimeros en su etapa inicial del tratamiento.

Figura 3.56. Diagrama Comparativo del Ensayo del Barrido.



Fuente: Elaboración Propia.

De aquí se concluye que el asfalto modificado con polímeros presenta un mayor desempeño en la construcción del tratamiento superficial bicapa. Ya que en los ensayos realizados para evaluar cuál de los dos tipos de asfaltos presentaba un mayor desempeño

para la construcción de tratamientos superficiales. Los resultados que se obtuvieron con el asfalto modificado fueron mayores al del asfalto convencional.

Por estos resultados mostrados, el asfalto modificado es el más adecuado para la construcción de tratamientos superficiales.

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis estadístico es la base de una investigación científica que va a determinar el impacto de la investigación, evaluando la calidad y analizando los resultados obtenidos. Existen diferentes maneras de realizar un análisis estadístico, depende del tipo de variables a analizar, pueden ser cualitativos y cuantitativos en función de estas variables se definen las técnicas estadísticas a analizar.

En nuestro caso las variables a analizar son cuantitativas porque es información numérica que se va a analizar, por lo que se debe realizar la interpretación de los datos y resultados obtenidos en la información.

3.6.1. Tratamiento de Datos y Determinación de Errores

En muchas ocasiones, los resultados obtenidos de los datos se interpretan mejor con ayuda de una representación gráfica, además este procedimiento muestra una tendencia que permite estimar los valores a otros puntos diferentes a los experimentales o demuestra una determinada relación matemática entre las variables representadas.

Las medidas experimentales están afectadas de cierta imprecisión en sus valores debido a las imperfecciones del aparato o limitaciones de nuestros sentidos, dando lugar a los errores que se definen como la diferencia entre el valor verdadero y obtenido experimentalmente. Estos pueden ser errores sistemáticos que permanecen constantes a lo largo de todo el proceso afectando a todas las medidas de un modo definido.

Dentro de estos errores están los errores instrumentales que se presentan debido a los aparatos de medida. También se presentan los errores accidentales son aquellos que se producen en las variaciones que pueden darse entre observaciones sucesivas realizadas por un mismo operador, la exactitud es el grado de concordancia entre el valor verdadero

y el experimental, la precisión es el grado de concordancia entre una medidas y otras de la misma magnitud, realizadas en condiciones relativamente iguales.

La sensibilidad de un aparato es el valor mínimo de la magnitud que es capaz de medir, también se presenta el error absoluto que se define como una medida “x” de determinada magnitud, es la diferencia entre dicho valor verdadero de la medida, este cuantifica la desviación en términos absolutos respecto al valor verdadero. No obstante también, en ocasiones es más interesante resalta la importancia relativa de esa desviación por ello se define el error relativo como el cociente entre el error absoluto y el valor verdadero que suele expresarse porcentualmente.

En esta investigación se va a calcular el error absoluto y el error relativo matemáticamente. El error absoluto viene a coincidir habitualmente con la sensibilidad del aparato que es la medida más pequeña que puede definir un aparato y no cometer error.

El error relativo es comparar la medida pequeña determinada del error absoluto con el valor verdadero de la medida realizada el promedio del error relativo no debe ser mayor al 5%, asegurando de que la probabilidad es del 95% de confiabilidad en la determinación de los ensayos por tanto el error relativo no puede salir mayor a este parámetro, caso contrario indicara que los resultados obtenidos son inaceptables.

3.6.1.1. Ensayo de estabilidad y fluencia

Se van a determinar los errores en los ensayos realizados para evaluar los resultados obtenidos del tratamiento superficial bicapa tanto en el ensayo de estabilidad y fluencia de igual forma para los ensayos realizados para evaluar el desempeño del tratamiento.

Como primer punto vamos a analizar estadísticamente la estabilidad y la fluencia del tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto convencional como se observa en la tabla 3.47 la determinación del error absoluto y relativo de la estabilidad.

El error absoluto de la estabilidad es (522.86 ± 0.81) lb interpretado como el rango del valor verdadero, el error absoluto determina un intervalo de incerteza comparando con la sensibilidad del aparato de Marshall calibrado en laboratorio por los encargados obtuvieron un calibración de "0" comparando con lo que se determinó se demuestra que no se cometieron errores severos, siendo rangos aceptables.

El error relativo de la estabilidad es de 0.16 % que es un valor aceptable ya que en una medición siempre se cometen errores.

Tabla 3.47. Error Absoluto y Relativo de la Estabilidad Convencional.

N° de briqueta	Denominación	Estabilidad (Lb)	Media (X)	Error absoluto (Ea)	Error Relativo (Er)	Error porcentual (Er%)
1	1A	549	510,57	0,63	0,001224368	0,12243681
2	1B	523				
3	1C	474				
4	1D	514				
5	1E	496				
1	2A	575	518,65	0,75	0,001451735	0,145173491
2	2B	512				
3	2C	498				
4	2D	498				
5	2E	514				
1	3A	546	527,82	0,38	0,000710687	0,071068728
2	3B	500				
3	3C	535				
4	3D	510				
5	3E	550				
1	4A	520	523,53	2,27	0,004330931	0,433093118
2	4B	482				
3	4C	610				
4	4D	545				
5	4E	472				
1	5A	545	525,50	0,50	0,000949859	0,094985912
2	5B	528				
3	5C	521				
4	5D	550				
5	5E	486				
1	6A	492	531,36	1,44	0,002715715	0,271571516
2	6B	525				
3	6C	610				
4	6D	515				
5	6E	522				
Promedio		522,86	522,86	0,81	0,001554535	0,155453472

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.48. Error Absoluto y Relativo de la Fluencia Convencional.

N° de briqueta	Denominación	Fluencia (mm)	Media (X)	Error absoluto (Ea)	Error relativo (Er)	Error porcentual (E%)
1	1A	110	84,99	1,01	0,011849239	1,184923931
2	1B	80				
3	1C	70				
4	1D	80				
5	1E	90				
1	2A	110	99,60	0,40	0,004028226	0,402822592
2	2B	90				
3	2C	110				
4	2D	90				
5	2E	100				
1	3A	110	95,44	0,56	0,005833733	0,583373324
2	3B	100				
3	3C	100				
4	3D	80				
5	3E	90				
1	4A	110	100,59	1,41	0,014066568	1,406656791
2	4B	80				
3	4C	130				
4	4D	100				
5	4E	90				
1	5A	120	106,81	1,19	0,011167948	1,116794827
2	5B	110				
3	5C	130				
4	5D	90				
5	5E	90				
1	6A	100	107,20	0,80	0,007463937	0,746393679
2	6B	130				
3	6C	110				
4	6D	90				
5	6E	110				
Promedio		98,81	98,81	0,82	0,008298127	0,829812664

Fuente: Elaboración Propia.

De la misma forma, se analiza la fluencia en la Tabla 3.48 el error absoluto determinado es de (98.81 ± 0.82) mm, interpretado como el rango del valor verdadero midiendo el error absoluto un intervalo de incerteza demuestra que no se cometieron errores severos donde los resultados se encuentran en rangos aceptables.

El error relativo de la fluencia es de 0.83 % que es un valor aceptable ya que en una medición siempre se cometen errores, este error es mayor que el de la estabilidad; la causa probable son los errores cometidos en la lectura inicial de la fluencia asociado con la manipulación del aparato y la postura que se tomó al realizar la medición, haciendo relación con el error de paralaje.

Para el tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto modificado con polímeros se analiza estadísticamente el error absoluto y el error relativo en la Tabla 3.49, el error absoluto determinado de la estabilidad es de (700.83 ± 0.18) Lb interpretado como el rango del verdadero medido.

El error absoluto determina un intervalo de incerteza demuestra que no se cometieron errores severos, comparando con la sensibilidad del aparato los resultados se encuentran en rangos aceptables.

El error relativo de la estabilidad es de 0.026 % que es un valor mínimo comparado con los resultados obtenidos anteriormente de la estabilidad del tratamiento superficial bicapa convencional presenta menos errores.

El error relativo porcentual se encuentra por debajo del rango establecido que es el 5% demostrando que los resultados obtenidos son confiables, lo que demuestra que en la hora de realizar la lectura no se presentaron errores consecuentes.

Tabla 3.49. Error Absoluto y Relativo de la Estabilidad Modificada.

N° de briqueta	Denominación	Estabilidad (Ib)	Media (X)	Error absoluto (Ea)	Error relativo (Er)	Error porcentual (E%)
1	1A	730	695,37	0,63	0,000911436	0,091143632
2	1B	695				
3	1C	680				
4	1D	725				
5	1E	650				
1	2A	690	699,86	0,14	0,000204173	0,020417331
2	2B	710				
3	2C	680				
4	2D	720				
5	2E	700				
1	3A	690	701,82	0,18	0,000260007	0,026000686
2	3B	720				
3	3C	700				
4	3D	720				
5	3E	680				
1	4A	700	699,86	0,14	0,000204173	0,020417331
2	4B	690				
3	4C	710				
4	4D	720				
5	4E	680				
1	5A	712	703,64	0,16	0,000230643	0,023064324
2	5B	680				
3	5C	708				
4	5D	724				
5	5E	695				
1	6A	715	704,51	0,09	0,000124833	0,012483259
2	6B	698				
3	6C	714				
4	6D	686				
5	6E	710				
Promedio		700,83	700,83	0,18	0,000256446	0,025644622

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.50. Error Absoluto y Relativo de la Fluencia Modificada.

N° de briqueta	Denominación	Fluencia (mm)	Media (X)	Error absoluto (e)	Error relativo(E)	Error porcentual (E%)
1	1A	110	110,80	0,20	0,001820899	0,18208994
2	1B	115				
3	1C	120				
4	1D	100				
5	1E	110				
1	2A	130	125,58	0,42	0,003350822	0,335082203
2	2B	140				
3	2C	110				
4	2D	120				
5	2E	130				
1	3A	120	121,77	0,23	0,001916328	0,191632809
2	3B	130				
3	3C	110				
4	3D	120				
5	3E	130				
1	4A	140	127,45	0,55	0,004281121	0,4281121
2	4B	110				
3	4C	120				
4	4D	140				
5	4E	130				
1	5A	130	129,85	0,15	0,001187652	0,11876518
2	5B	140				
3	5C	130				
4	5D	120				
5	5E	130				
1	6A	130	131,78	0,22	0,001634159	0,163415859
2	6B	140				
3	6C	130				
4	6D	140				
5	6E	120				
Promedio		124,34	124,34	0,27	0,002144082	0,214408173

Fuente: Elaboración Propia

De la misma forma, se analiza la fluencia en la Tabla 3.50 el error absoluto es de (124.34 ± 0.27) mm interpretado como el rango del valor verdadero, determinando el error absoluto un intervalo de incerteza demuestra que no se cometieron errores severos donde los resultados se encuentra en rangos aceptables.

El error relativo de la fluencia es de 0.21 % que es un valor aceptable ya que en una medición siempre se cometen errores, este error es mayor que el de la estabilidad. La causa probable son los errores cometidos en la lecturación inicial de la fluencia asociado con la manipulación del aparato y la postura que se tomó al realizar la medición haciendo relación con el error de paralaje.

3.6.1.2. Ensayo del Vialit

De igual forma que en el ensayo de estabilidad y fluencia se determina el error absoluto y el error relativo del ensayo del Vialit.

Para el ensayo del Vialit realizado con asfalto convencional con polímeros se analiza estadísticamente el error absoluto y el error relativo en la tabla 3.51, el error absoluto determinado del porcentaje de desprendimiento del agregado es de (6.82 ± 0.05) % interpretado como el rango del verdadero valor medido.

El error absoluto es un pequeño porcentaje que se presenta en el ensayo empírico realizado en donde no se presenta la sensibilidad del equipo.

El error relativo determinado es de 0.01% lo que significa que no se cometieron errores a gran escala lo que demuestra la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 3.51. Error Absoluto y Relativo del Ensayo del Vialit Convencional.

N° de briqueta	Porcentaje(%) de desprendimiento
1	5,90
2	6,92
3	7,64
4	7,27
5	5,25
6	6,96
7	7,46
8	7,49
9	6,34
10	5,69
11	7,75
12	8,04
13	5,78
14	7,13
15	7,47
Media (x)	6,82
Error absoluto (Ea)	0,05
Error relativo (Er)	0,01
Error porcentual (Ep%)	0,79

Fuente: Elaboración Propia

El análisis estadístico también fue realizado para el ensayo del vialit realizado con asfalto modificado con polímeros en la Tabla 3.52 se determinó el error absoluto y el error relativo

El error absoluto determinado del porcentaje de desprendimiento del agregado es de (4.49 ± 0.01) % interpretado como el rango del verdadero valor medido.

Tabla 3.52. Error Absoluto y Relativo del Ensayo del Vialit Modificado.

N° de briqueta	Porcentaje(%) de desprendimiento
1	4,46
2	4,94
3	4,29
4	4,22
5	4,73
6	3,99
7	4,61
8	4,96
9	4,15
10	4,38
11	4,76
12	4,36
13	4,95
14	4,00
15	4,65
Media (x)	4,49
Error absoluto (Ea)	0,01
Error relativo (Er)	0,003
Error porcentual (Ep %)	0,26

Fuente: Elaboración Propia.

El error relativo determinado es de 0.003 % lo que significa que no se cometieron errores a gran escala comparado con el ensayo del Vialit realizado con asfalto convencional se verifica que la práctica fue desarrollada de una manera más correcta, ya que los resultados obtenidos de los errores indica que no se cometieron errores significativos y que nuestras mediciones obtenidas son aceptables.

3.6.1.3. Ensayo del Barrido

Para el ensayo del barrido se realizó el mismo análisis que en el anterior ensayo, como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 3.53. Error Absoluto y Relativo del Ensayo del Barrido Convencional.

N° de briqueta	Porcentaje (%) de pérdida de agregado
1	4,55
2	4,56
3	4,55
4	4,55
5	4,56
6	4,56
7	4,55
8	4,55
9	4,55
10	4,56
11	4,55
12	4,56
13	4,55
14	4,55
15	4,56
Media (x)	4,55
Error absoluto (Ea)	0,0000023284
Error relativo (Er)	0,00000051142
Error porcentual (Ep %)	0,0000511420

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 3.53 el error absoluto del porcentaje de pérdida del agregado del ensayo del barrido es de (4.55 ± 0.0000023) % interpretado como el rango del verdadero valor medido, este resultado expresa que no se cometieron errores en el ensayo, no tiene una calibración del equipo ya que es un ensayo empírico.

El error relativo determinado es de 0.00000051 % lo que significa que no se cometieron errores en la práctica y que no es necesario aplicar la teoría de errores a estos ensayos.

Tabla 3.54. Error Absoluto y Relativo del Ensayo del Barrido Modificado.

N° de briqueta	Porcentaje(%) de pérdida de agregado
1	4,50
2	4,51
3	4,51
4	4,51
5	4,50
6	4,50
7	4,50
8	4,50
9	4,50
10	4,51
11	4,50
12	4,51
13	4,51
14	4,51
15	4,50
Media (x)	4,50
Error absoluto (Ea)	0,0000022154
Error relativo (Er)	0,00000049183
Error porcentual (Ep %)	0,000049183

Fuente: Elaboración Propia.

De la misma forma se evalúa estadísticamente el ensayo del barrido realizado con asfalto modificado con polímeros en la Tabla 3.54 obteniendo el error absoluto del porcentaje de pérdida del agregado es de (4.50 ± 0.0000022) % interpretado como el rango del verdadero valor medido, este resultado expresa que no se cometieron errores en el ensayo, no tiene una calibración del equipo ya que es un ensayo empírico.

El error relativo determinado es de 0.00000049 % lo que significa que no se cometieron errores en la práctica y que no es necesario aplicar la teoría de errores a estos ensayos.

3.6.2. Estadística Descriptiva

El análisis descriptivo incluye estadígrafos o estadísticos como el rango, el mínimo, el máximo y la frecuencia.

También incluye medidas de tendencia central como la media, mediana, moda desviación estándar y algunos otros que nos dicen acerca de la forma que tienen nuestros datos.

Medidas de tendencia central pueden dar una idea general de cómo responden los participantes en la recogida de datos que son la mediana, la media, la moda.

Medidas de dispersión que son medidas que nos indican que tan cerca o alejados se encuentran nuestros datos entre las más importantes son la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

3.6.2.1. Estadística descriptiva de la estabilidad y fluencia convencional

En la estadística descriptiva se determinó medidas de posición tales como la media, la mediana, error típico y la moda, también medidas de dispersión como el rango, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de asimetría y finalmente las medidas de forma como la curtosis.

Tabla 3.55. Estadística Descriptiva de la Estabilidad Convencional.

Medidas de la Estabilidad (Lb)	
Media	523,90
Error típico	6,22
Mediana	520,50
Moda	514
Desviación estándar	34,08
Varianza de la muestra	1161,13
Curtosis	1,08
Coeficiente de asimetría	0,93
Rango	138
Mínimo	472
Máximo	610
Suma	15717
Cuenta	30

Fuente: Elaboración Propia.

Se van a analizar las variables de estabilidad y fluencia en el tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto convencional en la Tabla 3.55 se observa todos los parámetros determinados para analizar estadísticamente la estabilidad.

La media o promedio es la medida de posición que determina la tendencia central el valor determinado es de 523.90 lb que es el valor de equilibrio que representa a todos los demás valores de la estabilidad.

El error típico o error estándar es de 6.22 que cuantifica cuánto se apartan los valores de la media, que en nuestro caso son los valores determinados de la estabilidad, construyendo un intervalo de confianza señalando la dispersión de estos valores el cual es el error cometido en la realización de las medidas de la estabilidad.

La mediana es de 520.50 lb determinada en base de las frecuencias indicando el número central del 50% de los datos de las estabilidades, se encuentra casi en el pico del histograma en la frecuencia máxima.

La moda es de 514 lb otra medida de posición que se interpreta como el valor que ocurre con mayor frecuencia del conjunto de datos medidos de la estabilidad, que corresponde a la mayor frecuencia.

La desviación estándar es una medida de dispersión que permite conocer la dispersión o cuantificar la variación del conjunto de datos que se tiene de la estabilidad con un valor estimado de 34.08 lb, dando a conocer una desviación alta lo que significa que la mayor parte de los datos de la muestra están alejados de la media que se extiende sobre el rango de los valores más amplios.

La varianza es la principal medida de dispersión más precisa es de 1161.13 lb² de la tabulación de datos que representa la variabilidad respecto a la media que existe entre este conjunto de datos.

La curtosis es otra característica a medir de la curva de frecuencia en su perfil mide cuán achatada está la curva el valor determinado es de 1.08, lo que indica que hay muy poca concentración de datos en la media presentando una gráfica de frecuencias más aplanada.

El coeficiente de asimetría es de 0.93 determinando que la curva de frecuencia es asimétrica a la derecha siendo el valor mayor a cero.

El rango que representa la diferencia del valor máximo y el valor mínimo medido que es de 138 lb, siendo el valor máximo de 610 lb y el valor mínimo de 472 lb, determinando que son los valores más altos y bajos que se presenta en esta tabulación de datos.

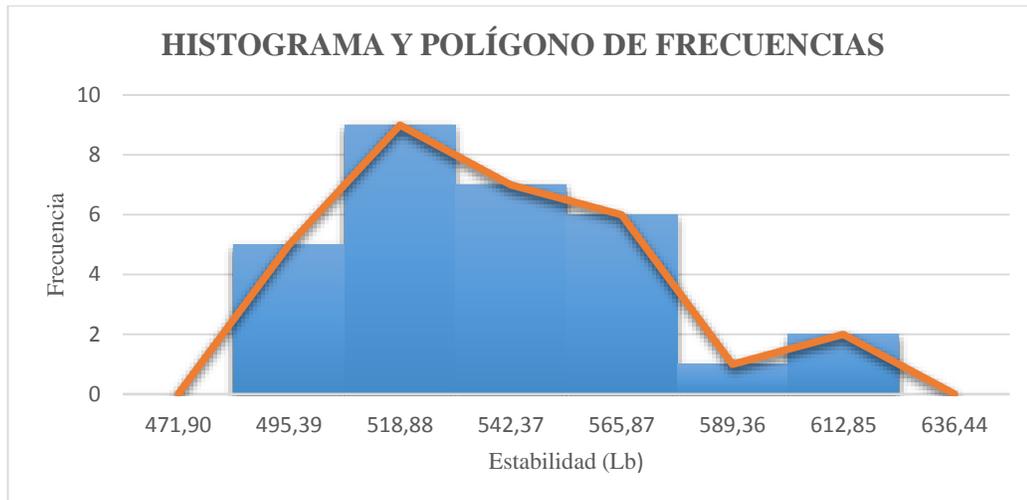
Determinando los datos estadísticos se elabora la tabla de datos, obteniendo los intervalos con un límite inferior y superior, grupos y marcas de clase, las frecuencias para cada intervalo y la representación porcentual para cada grupo como se muestra en las siguientes Tablas 3.56 y 3.57.

Tabla 3.56. Intervalos de Clase de la Estabilidad Convencional.

Intervalos (Lb)		Grupos	frecuencia
Límite inferior	Límite superior		
	472	471,90	0
472,00	495,49	495,39	5
495,49	518,98	518,88	9
518,98	542,47	542,37	7
542,47	565,97	565,87	6
565,97	589,46	589,36	1
589,46	612,95	612,85	2
612,95	636,44	636,44	0

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 3.57 se observa el histograma y polígono de frecuencia de la estabilidad donde se puede apreciar que la mayor frecuencia se tiene entre el intervalo 495.39 y 518.88 lb de las treinta briquetas realizadas del tratamiento superficial bicapa convencional nueve están en este intervalo, siete briquetas se encuentran entre la frecuencia de 518.88 y 542.37 lb dentro de este intervalo y entre la frecuencia 542.37 y 565.87 lb se encuentran seis briquetas, siendo éstas las más relevantes en esta investigación.

Figura 3.57. Histograma y Polígono de Frecuencia de la Estabilidad Convencional.

Fuente: Elaboración Propia.

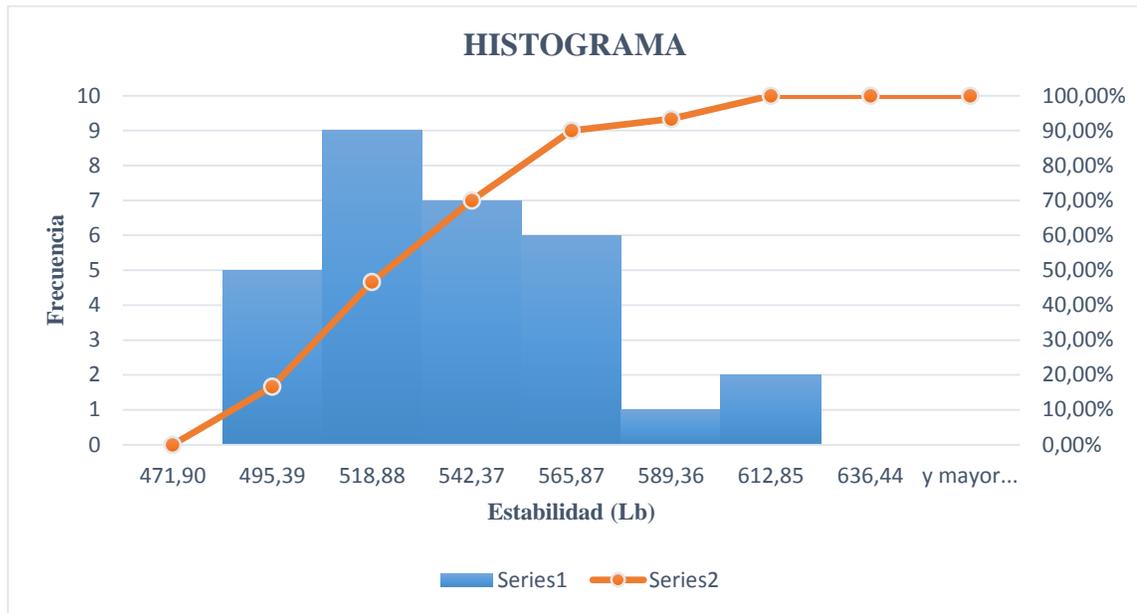
En la Tabla 3.57 se observan valores porcentuales de las frecuencias acumuladas con las cuales se realiza la Gráfica 3.58 que es el histograma de las frecuencias acumuladas que nos representan porcentualmente como están distribuidas las briquetas.

Tabla 3.57. Frecuencias Acumuladas de la Estabilidad Convencional.

Clase	Frecuencia	% acumulado
471,90	0	0,00%
495,39	5	16,67%
518,88	9	46,67%
542,37	7	70,00%
565,87	6	90,00%
589,36	1	93,33%
612,85	2	100,00%
636,44	0	100,00%
y mayor...	0	100,00%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.58. Histograma y Frecuencias Acumuladas de la Estabilidad Convencional.



Fuente: Elaboración Propia.

Para la Fluencia se realiza el mismo análisis estadístico, la misma interpretación va en el tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto convencional en la Tabla 3.58 se observa todos los parámetros determinados para analizar estadísticamente esta propiedad.

La media o promedio es la medida de posición que determina la tendencia central el valor determinado es de 100 mm que es el valor de equilibrio que representa a todos los demás valores de la fluencia o flujo.

El error típico o error estándar es de 2.88 que cuantifica cuánto se apartan los valores de la media, construyendo un intervalo de confianza señalando la dispersión de estos valores el que es el error cometido se presenta en la realización de las medidas de la fluencia que comparado con el error típico cometido en la medición de la estabilidad es menor.

La mediana es de 100 mm determinada en base de las frecuencias, indicando el número central del 50% de los datos de la fluencia, se encuentra casi en el pico del histograma en la frecuencia máxima coincidiendo con el valor determinado de la media lo que indica que la distribución es simétrica.

La moda es de 110 mm otra medida de posición que se interpreta como el valor que ocurre con mayor frecuencia del conjunto de datos medidos de la fluencia.

La desviación estándar es una medida de dispersión que permite conocer la dispersión o cuantificar la variación del conjunto de datos que se tiene de la estabilidad con un valor estimado de 15.76 mm, lo que significa que la mayor parte de los datos de la muestra están alejados de la media que se extiende sobre el rango de los valores más amplios.

La varianza es la principal medida de dispersión más precisa es de 248.28 mm² de la tabulación de datos que representa la variabilidad respecto a la media que existe entre este conjunto de datos.

La curtosis es, otra característica a medir de la curva de frecuencia en su perfil mide cuán achatada esta la curva el valor determinado es de -0.45 lo que indica que es una distribución platicúrtica definiendo que en su cola hay más casos acumulados que en la cola de una distribución normal.

El coeficiente de asimetría es de 0.28, determinando que la curva de frecuencia es asimétrica a la derecha, siendo el valor mayor a cero.

El rango que representa la diferencia del valor máximo y el valor mínimo medido que es de 60 mm, siendo el valor máximo de 130 mm y el valor mínimo de 70 mm, determinando que son los valores más altos y bajos que se presenta en esta tabulación de datos

Tabla 3.58. Estadística Descriptiva de la Fluencia Convencional.

Medidas de la fluencia (mm)	
Media	100
Error típico	2,876779809
Mediana	100
Moda	110
Desviación estándar	15,75677194
Varianza de la muestra	248,2758621
Curtosis	-0,446998089
Coefficiente de asimetría	0,283324892
Rango	60
Mínimo	70
Máximo	130
Suma	3000
Cuenta	30

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.59. Intervalos de Clase de la Fluencia Convencional.

Intervalos (mm)		Grupos	Frecuencia
Límite inferior	Límite superior		
	70	69,90	0
70,00	80,21	80,11	5
80,21	90,43	90,33	8
90,43	100,64	100,54	5
100,64	110,85	110,75	8
110,85	121,07	120,97	1
121,07	131,28	131,18	3
131,28	141,50	141,50	0

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 3.59 se observa el histograma y polígono de frecuencia de la fluencia dónde se puede apreciar que en la Tabla 3.59 la mayor frecuencia está en el intervalo 80.11 y 90.33 mm de las treinta briquetas realizadas del tratamiento superficial bicapa convencional ocho están en este intervalo , ocho briquetas están en la frecuencia de 100.54 y 110.75 mm dentro de este intervalo y entre la frecuencia 90.33 y 100.54 mm se encuentran cinco briquetas, siendo éstas las más relevantes en esta investigación.

Figura 3.59. Histograma y Polígono de Frecuencia de la Fluencia Convencional.



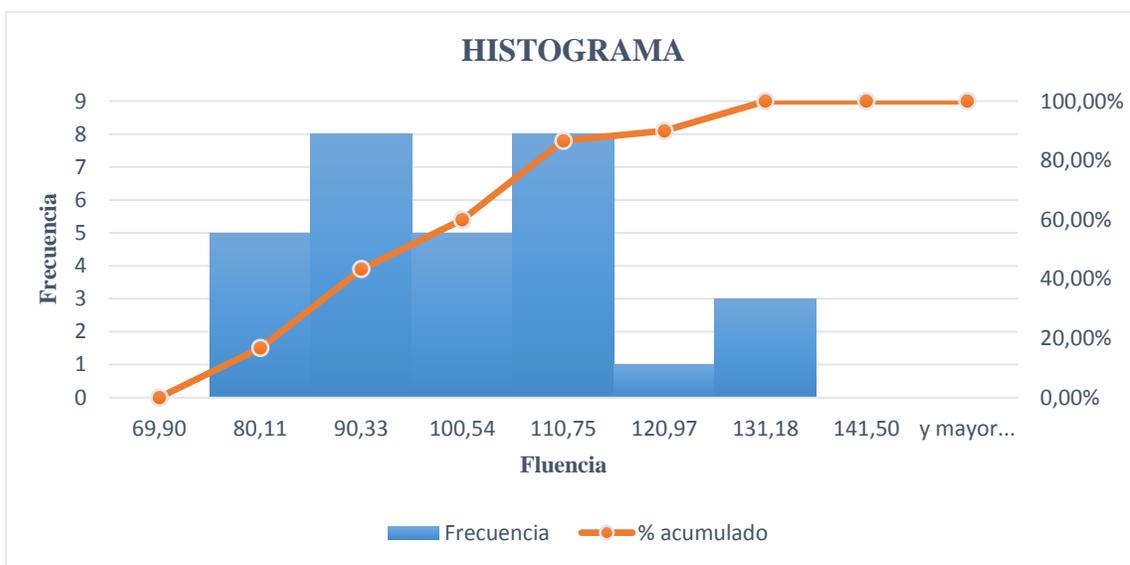
Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 3.60 se observan valores porcentuales de las frecuencias acumuladas de la fluencia con las cuales se realiza la Gráfica 3.60 que es el histograma de las frecuencias acumuladas que nos representan porcentualmente como están distribuidas las briquetas.

Tabla 3.60. Frecuencias Acumuladas de la Fluencia Convencional.

Clase	Frecuencia	% acumulado
69,90	0	0,00%
80,11	5	16,67%
90,33	8	43,33%
100,54	5	60,00%
110,75	8	86,67%
120,97	1	90,00%
131,18	3	100,00%
141,50	0	100,00%
y mayor...	0	100,00%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.60. Histograma y Frecuencias Acumuladas de la Fluencia Convencional.

Fuente: Elaboración Propia.

3.6.2.2. Estadística descriptiva de la estabilidad y fluencia modificada

Para el tratamiento superficial bicapa modificado con polímeros se realizó el mismo análisis estadístico.

Se van a analizar las variables de estabilidad y fluencia en el tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto modificado con polímeros en la Tabla 3.61 se observa todos los parámetros determinados para analizar estadísticamente la estabilidad.

La media o promedio es la medida de posición que determina la tendencia central el valor determinado es de 701.07 lb que es el valor de equilibrio que representa a todos los demás valores de la estabilidad.

El error típico o error estándar es de 3.33 que cuantifica cuánto se apartan los valores de la media que en nuestro caso son los valores determinados de la estabilidad, construyendo un intervalo de confianza, señalando la dispersión de estos valores el cual es el error cometido en la realización de las medidas de la estabilidad.

La mediana es de 700 lb determinada en base de las frecuencias acumuladas indicando el número central de la estabilidad, se encuentra casi en el pico del histograma en la frecuencia máxima.

La moda es de 680 lb otra medida de posición que se interpreta como el valor que ocurre con mayor frecuencia del conjunto de datos medidos de la estabilidad, que corresponde a la mayor frecuencia.

La desviación estándar es una medida de dispersión que permite conocer la dispersión o cuantificar la variación del conjunto de datos que se tiene de la estabilidad con un valor estimado de 18.24 lb, dando a conocer una desviación alta lo que significa que la mayor parte de los datos de la muestra están alejados de la media que se extiende sobre el rango de los valores más amplios.

La varianza es la principal medida de dispersión más precisa es de 332.62 lb² de la tabulación de datos que representa la variabilidad respecto a la media que existe entre este conjunto de datos.

La curtosis es otra característica a medir de la curva de frecuencia en su perfil mide cuán achatada está la curva el valor determinado es de 0.42 lo que nos indica que hay muy poca concentración de datos en la media presentando una gráfica de frecuencias más aplanada.

El coeficiente de asimetría es de -0.62 determinando que la curva de frecuencia es asimétrica a la izquierda siendo el valor menor a cero.

El rango que representa la diferencia del valor máximo y el valor mínimo medido que es de 80 lb siendo el valor máximo de 730 lb y el valor mínimo de 650 lb determinando que son los valores más altos y bajos que se presenta en esta tabulación de datos.

Tabla 3.61. Estadística Descriptiva de la Estabilidad Modificada.

Medidas de la estabilidad (Lb)	
Media	701,0666667
Error típico	3,329745195
Mediana	700
Moda	680
Desviación estándar	18,23776554
Varianza de la muestra	332,616092
Curtosis	0,422409539
Coefficiente de asimetría	-0,621819156
Rango	80
Mínimo	650
Máximo	730
Suma	21032
Cuenta	30

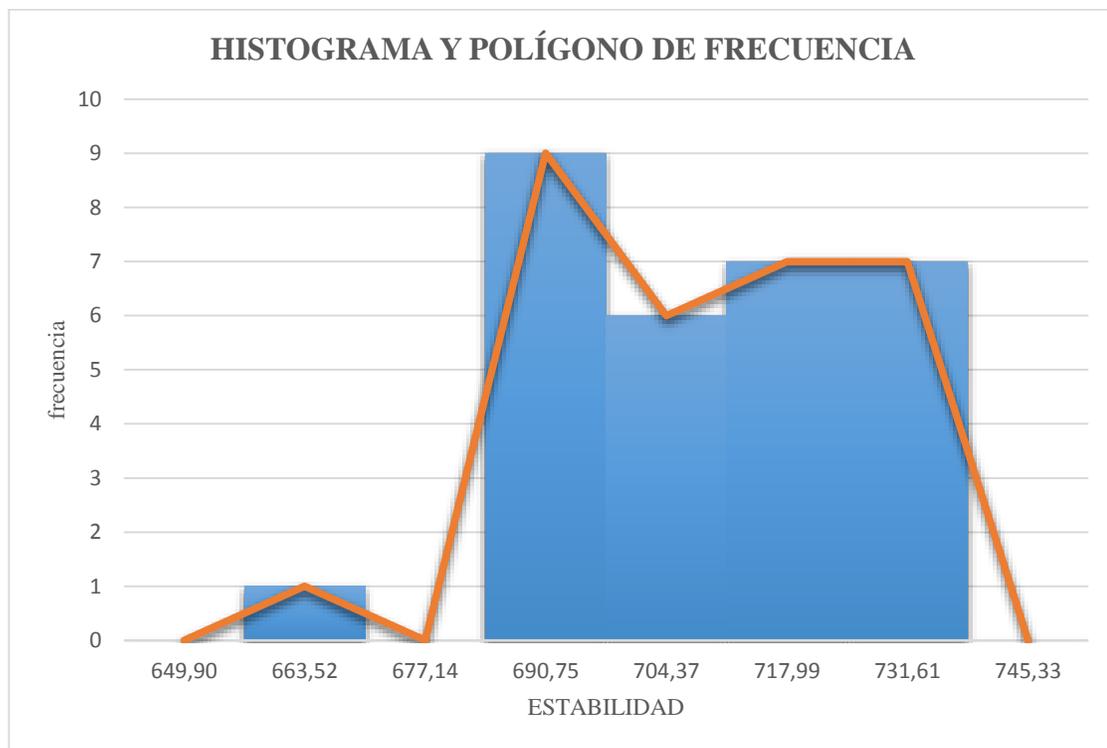
Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 3.61 se observa el histograma y polígono de frecuencia de la estabilidad donde se aprecia que la mayor frecuencia está en el intervalo 677.14 y 690.75 lb de las treinta briquetas realizadas del tratamiento superficial bicapa modificado son polímeros, nueve están en este intervalo, siete briquetas están en la frecuencia de 704.37 y 717.99 lb dentro de este intervalo y entre la frecuencia 717.99 y 731.61 lb se encuentran siete briquetas, siendo éstas las más relevantes en esta investigación.

Tabla 3.62. Intervalos de Clase de la Estabilidad Modificada.

Intervalos		Grupos	Frecuencia
Límite inferior	Límite superior		
	650	649,90	0
650,00	663,62	663,52	1
663,62	677,24	677,14	0
677,24	690,85	690,75	9
690,85	704,47	704,37	6
704,47	718,09	717,99	7
718,09	731,71	731,61	7
731,71	745,33	745,33	0

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.61. Histograma y Polígono de Frecuencia de la Estabilidad Modificada.

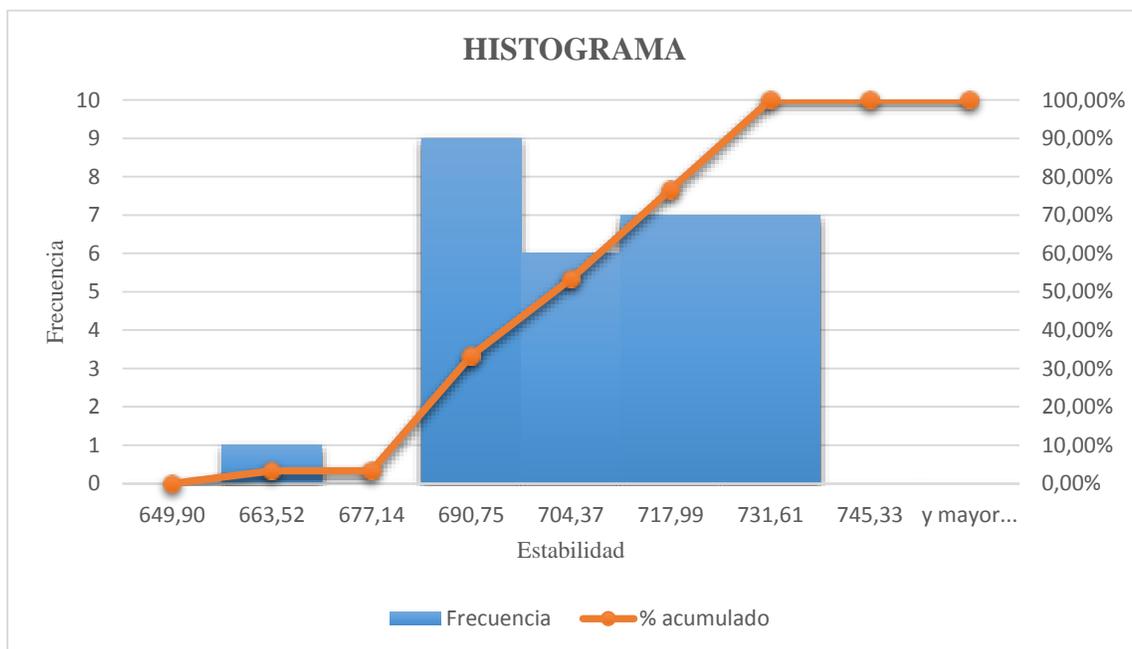
Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 3.63 se observan valores porcentuales de las frecuencias acumuladas de la frecuencia con las cuales se realiza la Gráfica 3.62 que es el histograma de las frecuencias acumuladas que nos representan porcentualmente como están distribuidas las briquetas.

Tabla 3.63. Frecuencias Acumuladas de la Estabilidad Modificada.

Clase	Frecuencia	% acumulado
649,90	0	0,00%
663,52	1	3,33%
677,14	0	3,33%
690,75	9	33,33%
704,37	6	53,33%
717,99	7	76,67%
731,61	7	100,00%
745,33	0	100,00%
y mayor...	0	100,00%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.62. Histograma y Frecuencias Acumuladas de la Estabilidad Modificada.

Fuente: Elaboración Propia.

Para la fluencia se realiza el mismo análisis estadístico, la misma interpretación de las variables determinadas en la Tabla 3.64 se observa todos los parámetros para analizar estadísticamente esta propiedad.

La media o promedio es la medida de posición que determina la tendencia central el valor determinado es de 124.83 mm que es el valor de equilibrio que representa a todos los demás valores de la estabilidad.

El error típico o error estándar es de 2.04 que cuantifica cuánto se apartan los valores de la media que en nuestro caso son los valores determinados de la estabilidad construyendo un intervalo de confianza señalando la dispersión de estos valores que es el error cometido en la realización de las medidas de la estabilidad.

La mediana es de 130 mm determinada en base de las frecuencias acumuladas indicando el número central de la fluencia, se encuentra casi en el pico del histograma en la frecuencia máxima.

La moda es de 130 mm otra medida de posición que se interpreta como el valor que ocurre con mayor frecuencia del conjunto de datos medidos de la estabilidad, que corresponde a la mayor frecuencia.

La desviación estándar es una medida de dispersión que permite conocer la dispersión o cuantificar la variación del conjunto de datos que se tiene de la estabilidad con un valor estimado de 11.18 mm, dando a conocer una desviación alta, lo que significa que la mayor parte de los datos de la muestra están alejados de la media que se extiende sobre el rango de los valores más amplios.

La varianza es la principal medida de dispersión más precisa es de 124.97 mm² de la tabulación de datos que representa la variabilidad respecto a la media que existe entre este conjunto de datos.

La curtosis es otra característica a medir de la curva de frecuencia en su perfil mide cuán achatada está la curva el valor determinado es de -0.73, lo que indica que es una distribución platicúrtica, definiendo que en su cola hay más casos acumulados que en la cola de una distribución normal.

El coeficiente de asimetría es de -0.29 determinando que la curva de frecuencia es asimétrica a la izquierda, siendo el valor menor a cero.

El rango que representa la diferencia del valor máximo y el valor mínimo medido que es de 40 mm, siendo el valor máximo de 140 mm y el valor mínimo de 100 mm determinando que son los valores más altos y bajos que se presenta en esta tabulación de datos.

Tabla 3.64. Estadística Descriptiva de la Fluencia Modificada

Medidas de la fluencia (mm)	
Media	124,8333333
Error típico	2,041006813
Mediana	130
Moda	130
Desviación estándar	11,17905472
Varianza de la muestra	124,9712644
Curtosis	-0,729467259
Coefficiente de asimetría	-0,292559475
Rango	40
Mínimo	100
Máximo	140
Suma	3745
Cuenta	30

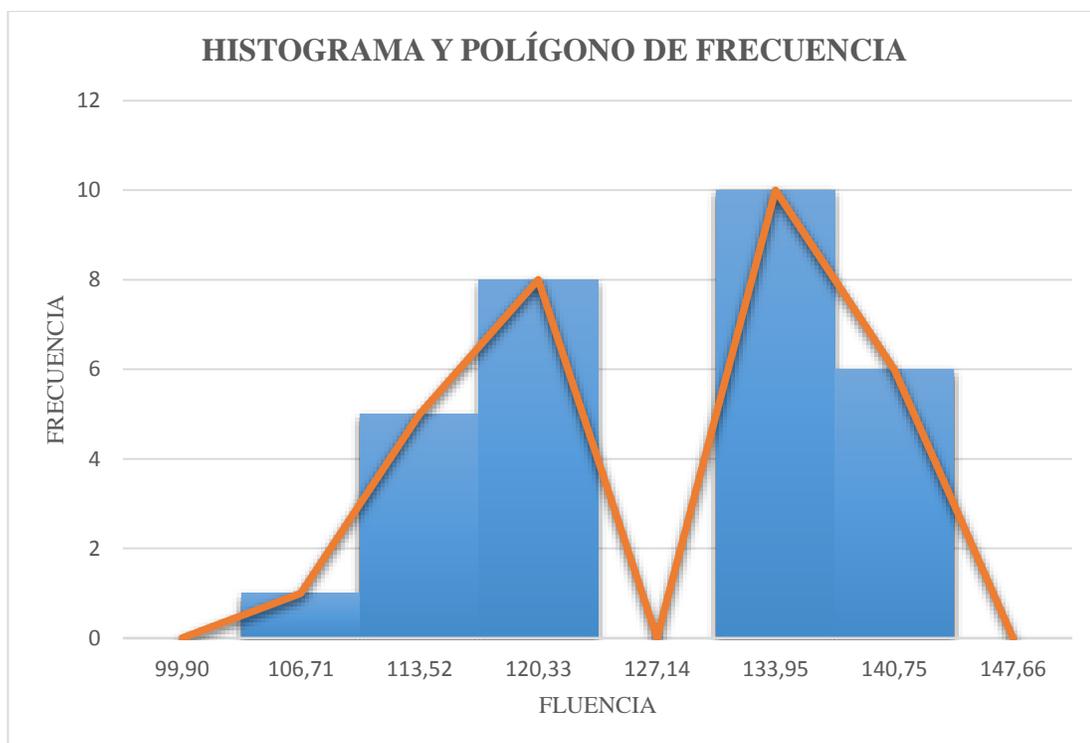
Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 3.63 se observa el histograma y polígono de frecuencia de la fluencia dónde se aprecia que la mayor frecuencia está en el intervalo 127.14 y 133.95 mm de las treinta briquetas realizadas del tratamiento superficial bicapa modificado con polímeros diez están en este intervalo , ocho briquetas están en la frecuencia de 113.52 y 120.33 mm dentro de este intervalo y entre la frecuencia 133.95 y 140.75 mm se encuentran seis briquetas siendo éstas las más relevantes en esta investigación.

Tabla 3.65. Intervalo de Clase de la Fluencia Modificada.

Intervalos (mm)		Grupos	frecuencia
Límite inferior	Límite superior		
	100	99,90	0
100,00	106,81	106,71	1
106,81	113,62	113,52	5
113,62	120,43	120,33	8
120,43	127,24	127,14	0
127,24	134,05	133,95	10
134,05	140,85	140,75	6
140,85	147,66	147,66	0

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.63. Histograma y Polígono de Frecuencia de la Fluencia Modificada.

Fuente: Elaboración Propia.

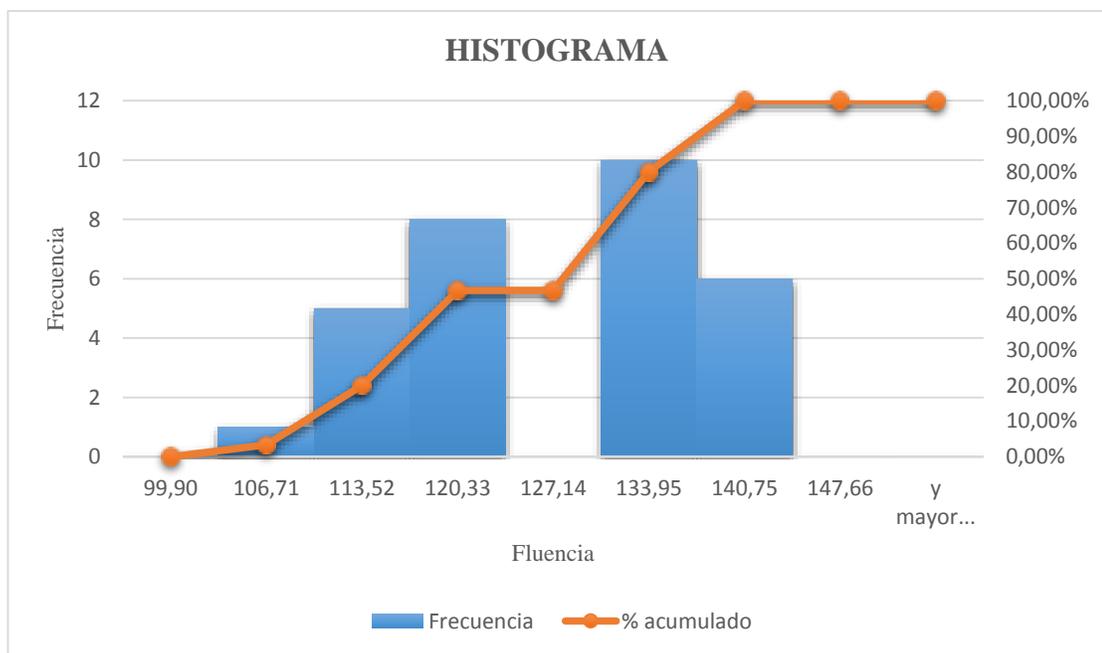
En la Tabla 3.66 se observan valores porcentuales de las frecuencias acumuladas de la fluencia con las cuales se realiza la Gráfica 3.64 que es el histograma de las frecuencias acumuladas que nos representan porcentualmente cómo están distribuidas las briquetas.

Tabla 3.66. Frecuencias Acumuladas de la Fluencia Modificada.

Clase	Frecuencia	% acumulado
99,90	0	0,00%
106,71	1	3,33%
113,52	5	20,00%
120,33	8	46,67%
127,14	0	46,67%
133,95	10	80,00%
140,75	6	100,00%
147,66	0	100,00%
y mayor...	0	100,00%

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.64. Histograma y Frecuencias Acumuladas de la Fluencia Modificada.



Fuente: Elaboración Propia.

3.6.2.3. Estadística descriptiva del ensayo del Vialit

En la Tabla 3.67 se observan todos los parámetros determinados para analizar estadísticamente las características adhesivas del tratamiento superficial bicapa realizado con el asfalto convencional.

La media o promedio es la medida de posición que determina la tendencia central el valor medido es de 6.87 % que es el valor de equilibrio que representa a todos los demás valores determinados en este ensayo.

El error típico o error estándar es de 0.22 que cuantifica cuánto se apartan los valores de la media que en nuestro caso construye un intervalo de confianza señalando que la dispersión de estos valores no está tan disperso de la media.

La mediana es de 7.13 % determinada en base de las frecuencias indicando el número central de estos datos agrupados.

La moda es otra medida de posición que se interpreta como el valor que ocurre con mayor frecuencia del conjunto de datos medidos que en este caso no se repite con frecuencia ningún valor determinado.

La desviación estándar es una medida de dispersión que permite conocer la dispersión o cuantificar la variación del conjunto de datos que se tiene de la estabilidad con un valor estimado de 0.87 % dando a conocer una desviación baja lo que significa que la mayor parte de los datos de la muestra no están alejados de la media que se extiende alrededor de esta medida.

La varianza es la principal medida de dispersión más precisa es de 0.75 de la tabulación de datos que representa que todos los valores determinados no están alejados de la media aritmética que éstos coinciden.

La curtosis es otra característica a medir de la curva de frecuencia en su perfil mide cuán achatada está la curva el valor determinado es de -0.92 lo que indica que es una distribución platicúrtica definiendo que en su cola hay más casos acumulados que en la cola de una distribución normal.

El coeficiente de asimetría es de -0.62 determinando que la curva de frecuencia es asimétrica a la izquierda siendo el valor menor a cero.

El rango que representa la diferencia del valor máximo y el valor mínimo medido que es de 2.79% siendo el valor máximo de 8.04% y el valor mínimo de 5.25% determinando que son los valores más altos y bajos que se presenta en esta tabulación de datos.

Tabla 3.67. Estadística Descriptiva del Ensayo del Vialit Convencional.

Medidas del ensayo (%)	
Media	6,872079238
Error típico	0,223363357
Mediana	7,133040703
Moda	
Desviación estándar	0,865082563
Varianza de la muestra	0,748367841
Curtosis	-0,923130301
Coefficiente de asimetría	-0,620838077
Rango	2,789622648
Mínimo	5,245875901
Máximo	8,035498549
Suma	103,0811886
Cuenta	15

Fuente: Elaboración Propia.

Como los parámetros determinados de la estadística descriptiva del ensayo del Vialit realizado con asfalto convencional son muy pequeños no se realiza el histograma ni el polígono de frecuencia debido que no existes valores repetitivos o frecuentes en esta tabulación de datos.

Para el ensayo del Vialit realizado con asfalto modificado con polímeros se realiza el mismo análisis estadístico de los parámetros determinados que se encuentra descritos en la Tabla 3.68.

La media o promedio es la medida de posición que determina la tendencia central el valor medido es de 4.50 % que es el valor de equilibrio que representa a todos los demás valores determinados en este ensayo.

El error típico o error estándar es de 0.09 que cuantifica cuánto se apartan los valores de la media que en nuestro caso construye un intervalo de confianza señalando que la dispersión de estos valores no está tan disperso de la media.

La mediana es de 4.46 % determinada en base de las frecuencias indicando el número central de estos datos agrupados

La moda es otra medida de posición que se interpreta como el valor que ocurre con mayor frecuencia del conjunto de datos medidos que en este caso no se repite con frecuencia ningún valor determinado.

La desviación estándar es una medida de dispersión que permite conocer la dispersión o cuantificar la variación del conjunto de datos que se tiene de la estabilidad con un valor estimado de 0.33 % dando a conocer una desviación baja lo que significa que la mayor parte de los datos de la muestra no están alejados de la media que se extiende alrededor de esta medida.

La varianza es la principal medida de dispersión más precisa es de 0.11 de la tabulación de datos que representa que todos los valores determinados no están alejados de la media aritmética que éstos coinciden.

La curtosis es otra característica a medir de la curva de frecuencia en su perfil mide cuán achatada esta la curva el valor determinado es de -1.21, lo que indica que es una distribución platicúrtica definiendo que en su cola hay más casos acumulados que en la cola de una distribución normal.

El coeficiente de asimetría es de -0.03 determinando que la curva de frecuencia es asimétrica a la izquierda siendo el valor menor a cero.

El rango que representa la diferencia del valor máximo y el valor mínimo medido que es de 0.98% siendo el valor máximo de 4.96% y el valor mínimo de 3.99% determinando que son los valores más altos y bajos que se presenta en esta tabulación de datos.

Tabla 3.68. Estadística Descriptiva del Ensayo del Vialit Modificado.

Medidas del ensayo (%)	
Media	4,49720107
Error típico	0,086190039
Mediana	4,461519381
Moda	
Desviación estándar	0,333812587
Varianza de la muestra	0,111430843
Curtosis	-1,208436574
Coficiente de asimetría	-0,026875015
Rango	0,977265636
Mínimo	3,986196488
Máximo	4,963462123
Suma	67,45801604
Cuenta	15

Fuente: Elaboración propia.

Como los parámetros determinados de la estadística descriptiva del ensayo del Vialit realizado con asfalto modificado con polímeros son muy pequeños no se realiza el histograma ni el polígono de frecuencia debido que no existen valores repetitivos o frecuentes en esta tabulación de datos.

3.6.2.3. Estadística descriptiva del ensayo del barrido

En la Tabla 3.69 se observan todos los parámetros determinados para analizar estadísticamente el desempeño del tratamiento superficial bicapa realizado con el asfalto convencional.

La media o promedio es la medida de posición que determina la tendencia central el valor medido es de 4.55 % que es el valor de equilibrio que representa a todos los demás valores determinados en este ensayo.

El error típico o error estándar es de 0.001 que cuantifica cuánto se apartan los valores de la media que en nuestro caso construye un intervalo de confianza, señalando que la dispersión de estos valores no está tan disperso de la media.

La mediana es de 4.55 % determinada en base de las frecuencias indicando el número central de estos datos agrupados

La moda es otra medida de posición que se interpreta como el valor que ocurre con mayor frecuencia del conjunto de datos medidos que en este caso no se repite con frecuencia ningún valor determinado.

La desviación estándar es una medida de dispersión que permite conocer la dispersión o cuantificar la variación del conjunto de datos que se tiene de la estabilidad con un valor estimado de 0.005 % dando a conocer una desviación baja lo que significa que la mayor parte de los datos de la muestra no están alejados de la media que se extiende alrededor de esta medida.

La varianza es la principal medida de dispersión más precisa es de $2.27 \text{ E} - 0.5$ de la tabulación de datos que representa que todos los valores determinados que no están alejados de la media aritmética, siendo valores similares.

La curtosis es otra característica a medir de la curva de frecuencia en su perfil mide cuán achatada está la curva el valor determinado es de -1.10 lo que indica que es una distribución platicúrtica definiendo que en su cola hay más casos acumulados que en la cola de una distribución normal.

El coeficiente de asimetría es de -0.03 determinando que la curva de frecuencia es asimétrica a la izquierda siendo el valor menor a cero.

El rango que representa la diferencia del valor máximo y el valor mínimo medido que es de 0.02 % siendo el valor máximo de 4.56 % y el valor mínimo de 4.55 % determinando que son los valores más altos y bajos que se presenta en esta tabulación de datos.

Como los parámetros determinados de la estadística descriptiva del ensayo del barrido realizado con asfalto convencional son muy pequeños no se realiza el histograma ni el polígono de frecuencia debido que no existen valores repetitivos o frecuentes en esta tabulación de datos.

Tabla 3.69. Estadística Descriptiva del Ensayo del Barrido Convencional

Medidas del ensayo (%)	
Media	4,552789513
Error típico	0,001230589
Mediana	4,553260969
Moda	
Desviación estándar	0,00476605
Varianza de la muestra	2,27152E-05
Curtosis	-1,105515145
Coefficiente de asimetría	-0,033434063
Rango	0,015631822
Mínimo	4,545491151
Máximo	4,561122972
Suma	68,29184269
Cuenta	15

Fuente: Elaboración Propia.

Para el ensayo del Barrido realizado con asfalto modificado con polímeros se realiza el mismo análisis estadístico de los parámetros determinados que se encuentra descritos en la Tabla 3.70.

La media o promedio es la medida de posición que determina la tendencia central el valor medido es de 4.50% que es el valor de equilibrio que representa a todos los demás valores determinados en este ensayo.

El error típico o error estándar es de 0.001 que cuantifica cuánto se apartan los valores de la media que en nuestro caso construye un intervalo de confianza, señalando que la dispersión de estos valores no está tan disperso de la media.

La mediana es de 4.50 % determinada en base de las frecuencias indicando el número central de estos datos agrupados

La moda es otra medida de posición que se interpreta como el valor que ocurre con mayor frecuencia del conjunto de datos medidos que en este caso no se repite con frecuencia ningún valor determinado.

La desviación estándar es una medida de dispersión que permite conocer la dispersión o cuantificar la variación del conjunto de datos que se tiene de la estabilidad con un valor estimado de 0.005 %, dando a conocer una desviación baja lo que significa que la mayor parte de los datos de la muestra no están alejados de la media que se extiende alrededor de esta medida.

La varianza es la principal medida de dispersión más precisa es de $2.14 \text{ E} - 0.5$ de la tabulación de datos que representa que todos los valores determinados no están alejados de la media aritmética que estos coinciden.

La curtosis es otra característica a medir de la curva de frecuencia en su perfil mide cuán achatada está la curva el valor determinado es de -1.16, lo que indica que es una distribución platicúrtica definiendo que en su cola hay más casos acumulados que en la cola de una distribución normal.

El coeficiente de asimetría es de -0.08 determinando que la curva de frecuencia es asimétrica a la izquierda siendo el valor menor a cero.

El rango que representa la diferencia del valor máximo y el valor mínimo medido que es de 0.01 % siendo el valor máximo de 4.51 % y el valor mínimo de 4.50 % determinando que son los valores más altos y bajos que se presenta en esta tabulación de datos.

Como los parámetros determinados de la estadística descriptiva del ensayo del Vialit realizado con asfalto modificado con polímeros son muy pequeños no se realiza el histograma ni el polígono de frecuencia debido que no existes valores repetitivos o frecuentes en esta tabulación de datos.

Tabla 3.70. Estadística Descriptiva del Ensayo del Barrido Modificado.

Medidas del ensayo (%)	
Media	4,504443402
Error típico	0,001193959
Mediana	4,504241475
Moda	
Desviación estándar	0,004624183
Varianza de la muestra	2,13831E-05
Curtosis	-1,155481292
Coficiente de asimetría	-0,082416528
Rango	0,013702536
Mínimo	4,497742483
Máximo	4,511445019
Suma	67,56665104
Cuenta	15

Fuente: Elaboración propia.

3.7. COSTOS DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL BICAPA

El análisis de costos unitarios se realiza únicamente para los materiales que forman parte del tratamiento superficial bicapa que son el ligante asfáltico y los agregados pétreos la grava para la primera capa y la gravilla para la segunda siendo este el único ítem.

Determinando el costo del precio productivo tanto de los materiales como el de la mano de obra, así también como de los equipos se utilizan en el proceso de construcción del tratamiento superficial, las herramientas y finalmente los costos indirectos como ser los gastos administrativos, utilidad y los impuestos.

3.7.1. Especificaciones Técnicas

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

ITEM N° 1: Tratamiento superficial bicapa

Los materiales que forman parte de este ítem son el ligante asfáltico que son el asfalto convencional y el asfalto modificado con polimeros y los agregados pétreos que son la grava y la gravilla que son los materiales que se utilizan para la construcción del tratamiento tanto en la primera como en la segunda capa .

a) Materiales

Para obtener los costos del tratamiento superficial bicapa, se debe tomar en cuenta varios parámetros como el costo unitario de los agregados pétreos que se valorizan en m³ que forman parte de las capas del tratamiento superficial, el costo de los materiales del asfalto convencional y el asfalto modificados con polímeros.

Para el proceso de la elaboración del tratamiento superficial bicapa 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.

En la elaboración del tratamiento superficial bicapa se utilizan dos tipos de ligantes el asfalto convencional 85/100 y el asfalto modificado con polímeros 65/85, se usan dos tipos de agregados pétreos para la primera capa se hace el uso de la grava y para la segunda capa se utiliza gravilla los cuales se encuentra dentro de las franjas establecidas “B” y “D” según la especificaciones de la norma que se utilizó como referencia que es la norma de Costa Rica para establecer las franjas granulométricas, la dosificación se realiza mediante el método de la dimensión mínima promedio, el cual da las cantidades de asfalto y agregado que se va a utilizar en l/m² y kg/m² , el espesor del tratamiento superficial bicapa aproximado por normativa es de 25mm.

La materiales del tratamiento superficial bicapa debe cumplir con las especificaciones establecidas en la norma AASTHO y ASTM para el asfalto:

1. Debe ser lo suficientemente fluido para una aplicación uniforme.
2. Debe tener una viscosidad adecuada para permitir una adhesión rápida entre el ligante y el agregado.
3. Prevenir el desprendimiento de las partículas pétreas.

4. La temperatura adecuada para su trabajabilidad.
5. Se debe dosificar con la cantidad adecuada para evitar la exudación y el desprendimiento del agregado.

Para los agregados pétreos las características más importantes son las siguientes:

1. La forma de los agregados que es una característica importante.
2. La Angularidad para obtener un buen rozamiento internó de las partículas minerales.
3. La granulometría que se determina según las franjas establecidas para el tratamiento superficial.
4. La limpieza de los agregados que es un factor muy importante para la adhesividad del agregado con el ligante asfáltico.
5. Deben ser resistentes al paso de los vehículos una vez expuestos en obra.

Los cuales cumplen con las especificaciones establecidas necesarias para la ejecución del tratamiento superficial.

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.

Los costos de unitarios por concepto de mano de obra han sido referidos a la siguiente categorización de operario, oficial, peón.

El detalle del costo horario de cada una de las categorías que conforman la mano de obra, para el equipo mecánico se ha elaborado un listado de los equipos que interfieren en las diferentes partidas de la obra, determinando así el pago de los costos directos, señalando las tarifas necesarias correspondientes a las máquinas operadas.

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.

3.7.2. Precios Unitarios

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

Para realizar las diferentes actividades en los costos unitario se toma en cuenta los rendimientos de la mano de obra y el equipo mecánico que interviene en la obra de acuerdo a la localización y los factores climáticos de la misma, considerando la cantidad exacta de materiales e insumos determinados en la dosificación del tratamiento superficial bicapa.

En la Tabla 3.71 se determinó el costo del tratamiento superficial bicapa, con asfalto convencional con un costo de 127,24 bs por metro cuadrado y el costo del tratamiento superficial realizado con asfalto modificado con polímeros que se encuentra plasmado en la Tabla 3.72 es de 131,11 bs por metro cuadrado siendo más costoso el tratamiento superficial bicapa modificado con un porcentaje de 2,95 % esto se presenta por el costo del asfalto modificado con polímeros que es más costoso económicamente, pero analizando de forma diferente el costo del tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto modificado con polímeros a la larga es una técnica de rehabilitación de bajo costo en el mantenimiento y conservación de una carretera que es más económico debido a las propiedades del asfalto modificado con polímero son más resistente a los agentes atmosféricos, presentan menos fallas, proporcionando buenos resultados comparado con el tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto convencional.

Tabla 3.71. Costos del Tratamiento Superficial Bicapa con Asfalto Convencional.

Planilla de precios unitarios					
Actividad:	Tratamiento superficial bicapa con asfalto convencional				
Unidad:	m ²	Moneda:	Bs.		
1. Materiales					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Cemento asfáltico convencional	L	4,38	10,50	45,99
2	Agregado 1ra capa (gravilla)	m ³	0,008	130,00	1,03
3	Agregado 2ra capa (arena)	m ³	0,004	150,00	0,60
Total materiales					47,62
2. Mano de obra					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Op. Distribuidor de asfalto	hr.	0,04	15	0,60
2	Op. Distribuidor de agregados	hr.	0,04	12	0,48
3	Chofer de tanque de almacenamiento	hr.	0,04	15	0,60
4	Ayudante	hr.	0,6	20	12,00
5	Compactadora mecánica	hr.	0,04	8,5	0,34
6	Capataz	hr.	0,02	15	0,30
Subtotal mano de obra					14,32
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				55	7,88
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	3,32
Total mano de obra					25,51
3. Equipo, maquinaria y herramientas					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Camión distribuidor de asfalto	hr.	0,04	160	6,40
2	Camión distribuidor de agregados	hr.	0,04	200	8,00
3	Tanque de almacenamiento	hr.	0,04	70	2,80
4	Compactador de neumático	hr.	0,04	260	10,40
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5	1,28
Total equipo, maquinaria y herramientas					28,88
4. Gastos generales y administrativos					
				Precio productivo	Costo total
Gastos generales = % de 1+2+3				10	
Total gastos generales y administrativos					10,20
5. Utilidad					
				Precio productivo	Costo total
Utilidad= % de 1+2+3+4				10	
Costo total utilidad					11,22
6. Impuestos					
				Precio productivo	Costo total
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	
Costo total impuestos					3,81
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6)					127,24
Total precio unitario adoptado (bs.)					127,24

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.72. Tratamiento Superficial Bicapa con Asfalto Modificado con Polímero.

Planilla de precios unitarios					
Actividad:	Tratamiento superficial bicapa con asfalto modificado con polimeros				
Unidad:	m ²	Moneda:	Bs.		
1. Materiales					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Cemento asfáltico modificado	kg	4.09	12,00	49,08
2	Agregado 1ra capa (gravilla)	m ³	0,008	130,00	1,04
3	Agregado 2ra capa (arena)	m ³	0,004	150,00	0,60
Total materiales					50,72
2. Mano de obra					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Op. Distribuidor de asfalto	hr.	0,04	15	0,60
2	Op. Distribuidor de agregados	hr.	0,04	12	0,48
3	Chofer de tanque de almacenamiento	hr.	0,04	15	0,60
4	Ayudante	hr.	0,6	20	12,00
5	Compactadora mecánica	hr.	0,04	8,5	0,34
6	Capataz	hr.	0,02	15	0,30
Subtotal mano de obra					14,32
Cargas sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				55	7,88
Impuestos IVA mano de obra = (% de carga social + subtotal mano de obra)				14,94	3,32
Total mano de obra					25,51
3. Equipo, maquinaria y herramientas					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Camión distribuidor de asfalto	hr.	0,04	160	6,40
2	Camión distribuidor de agregados	hr.	0,04	200	8,00
3	Tanque de almacenamiento	hr.	0,04	70	2,80
4	Compactador de neumático	hr.	0,04	260	10,40
Herramientas = (% del total de mano de obra)				5	1,28
Total equipo, maquinaria y herramientas					28,88
4. Gastos generales y administrativos					
				Precio productivo	Costo total
Gastos generales = % de 1+2+3				10	
Total gastos generales y administrativos					10,51
5. Utilidad					
				Precio productivo	Costo total
Utilidad = % de 1+2+3+4				10	
Costo total utilidad					11,56
6. Impuestos					
				Precio productivo	Costo total
Impuestos IT = % de 1+2+3+4+5				3,09	
Costo total impuestos					3,93
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6)					131,11
Total precio unitario adoptado (bs.)					131,11

Fuente: Elaboración Propia.

4.1. CONCLUSIONES

Se evaluó el comportamiento del asfalto modificado con polímeros en el tratamiento superficial bicapa, mediante el ensayo de estabilidad y fluencia del Marshall se verifica que aumenta la estabilidad, la fluencia, presenta mayores características adhesivas entre el ligante asfáltico y los agregados pétreos lo que proporciona directamente mayor resistencia para la carpeta de rodadura en su conservación, mantenimiento y durabilidad durante su vida útil.

- Se establecieron los aspectos generales de los materiales del tratamiento superficial bicapa las características de los ligantes asfálticos que cumplen con las especificaciones establecidas y los agregados pétreos de la misma forma se encuentran dentro de los rangos de gradación establecidos en las especificaciones técnicas.
- Se logró determinar los parámetros necesarios para la dosificación del tratamiento superficial bicapa, mediante el método de la dimensión mínima promedio, en la granulometría, porcentaje de huecos del agregado, densidad aparente suelta densidad real seca, índice de lajas y para el asfalto el factor de tránsito, corrección por textura superficial, corrección por absorción del agregado y el residuo asfáltico del ligante.
- En función a la dosificación del tratamiento superficial bicapa mediante el método de la dimensión mínima se determinó la proporcionalidad entre los valores obtenidos de la cantidad de materiales que se determinan en metro cuadrado y el área de las briquetas del Marshall obteniendo de esta forma los resultados para la dosificación de las briquetas del tratamiento, donde se evaluó el comportamiento de las propiedades de la carpeta de rodadura en estudio.
- Se determinó los resultados del ensayo de estabilidad y fluencia se evaluó el comportamiento del tratamiento superficial bicapa, donde se aprecia que los resultados obtenidos de estabilidad para el asfalto convencional tienen un valor de 8268,91 lb corregida promedio, utilizando el asfalto modificado con polímero se obtiene un valor de 11070,78 lb corregida promedio. Analizando esta comparación se observa que los resultados que se obtienen con el asfalto modificado con

polímeros en el tratamiento superficial bicapa es mayor al del obtenido con el asfalto convencional, con una diferencia porcentual de casi un 25,31 %.

De igual forma se compara los resultados de fluencia, en donde se aprecia que los resultados que se obtuvieron con el asfalto convencional fue de 4,21 pulg promedio, mientras que el resultado que se obtuvo con el asfalto modificado con polímeros fue de 5,12 pulg con una diferencia porcentual de casi un 17,97 %.

Comprobando así que las propiedades del asfalto modificado con polímeros mejoran sus propiedades considerablemente, en cuanto a su estabilidad y fluencia, características adhesivas entre los materiales del tratamiento superficial, siendo esta técnica la más conveniente.

- En el análisis de precios unitario del tratamiento superficial bicapa se observa que el costo del tratamiento superficial bicapa con asfalto convencional (85-100) es 127,24 bs el metro cuadrado y del tratamiento superficial bicapa con asfalto modificado con polímeros SBS (60-85) es de 131,11 bs por metro cuadrado enfatizando que lo único que varía en los precios unitarios es el costo del asfalto modificado con polímero 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, como en caso de este proyecto se realizó el tratamiento superficial bicapa.
- Se determinó que en el ensayo del Vialit en el tratamiento superficial bicapa realizado con asfalto convencional es de 93,18 % y con el asfalto modificado con polímeros es de 95,51 % que tiene una buena adherencia lo que corrobora una menor pérdida de agregado.
- En el tratamiento superficial bicapa con asfalto modificado con polímeros se observa que presenta menor porcentaje de pérdida de agregados 4,50 % mediante el ensayo del barrido lo que comprueba que este ligante tiene mejores características adhesivas que el asfalto convencional ya que presenta una mayor pérdida de agregado 4,55 % presentando mayor desempeño.

4.2. RECOMENDACIONES

- Desarrollar normas que incorporen este tipo de trabajo, es una gran aportación en nuestro medio, en el que esta técnica de trabajo no es muy usada, debido a la necesidad que tiene nuestra región por las malas condiciones que presentan nuestras vías de comunicación, de la implementación de esta nueva alternativa aporta al desarrollo y mejora las condiciones de las carreteras.
- Es necesario que las franjas granulométricas que usamos tengan tolerancias, para un mejor rendimiento.
- Se recomienda utilizar el asfalto modificado con polímeros debido a que mejora considerablemente la resistencia a agrietamiento ocasionado por bajas temperaturas y/o elevados gradientes térmicos, observándose el aumento de la recuperación elástica lineal y torsional en un 60%.
- Se debe tener una adecuada seguridad industrial cuando se emplea en una obra el asfalto modificado con polímeros, siendo un producto con características complejas, evitando así problemas futuros.
- Se deben utilizar agregados limpios y libres de cualquier sustancia química Para la aplicación en el tratamiento superficial.
- El buen funcionamiento de un tratamiento superficial doble radica en una buena selección de materiales y un adecuado proceso constructivo.
- Se recomiendo realizar una evaluación del asfalto modificado con polímeros para determinar sus propiedades reológicas y así definir que mejoras tendrá la mezcla.
- Esta nueva alternativa de realizar un tratamiento superficial con asfalto modificado con polímero, definitivamente es la más recomendable para evitar problemas consecuentes que tiene un tratamiento superficial convencional referido principalmente a su vida útil, en el mantenimiento y conservación de éste.