

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Existen casos en que las características de las mezclas asfálticas, obtenidas con los cementos asfálticos convencionales no son capaces de resistir la acción conjunta del tránsito y del clima, siendo necesaria la utilización de ligantes modificados que presenten mejores propiedades reológicas un mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica (Arenas, 2008). Tomando en cuenta que día a día las reservas naturales en Bolivia y el mundo tienden a disminuir, por consiguiente, la obtención de sus derivados como lo es el asfalto, por ello nace la necesidad de buscar nuevos materiales que mejoren las mezclas asfálticas y que estas cumplan con ciertas características que garanticen un servicio correcto como ser la seguridad ya que se tiene que anular la posibilidad de sucesos que pueden provocar algún daño de cualquier tipo a los usuarios, que pueda ser altamente funcional porque debe cubrir las características que permitan satisfacer las exigencias de las cuales surgió la necesidad de construir dicho pavimento, además de que es importante el confort del mismo. También existe otra característica importante y es que una obra tiene que ser económica, y es que debe realizar al menor costo posible tanto en construcción, mantenimiento y conservación. En nuestro caso, en las carpetas asfálticas este es un aspecto muy relevante, ya que el costo que se destina al mantenimiento de un camino normalmente es considerable.

La tecnología de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas ha sido una técnica ampliamente estudiada y utilizada. La modificación de asfaltos es una técnica que consiste en la adición de polímeros a un asfalto convencional con el propósito de cambiar sus propiedades físico-químicas. La incorporación de un polímero adecuado modifica la susceptibilidad térmica del asfalto debido a la mejora obtenida en el comportamiento visco-elástico.

En el presente trabajo se pretende comparar el comportamiento de las de las mezclas asfálticas con cemento asfáltico convencional y otra mezcla con cemento asfáltico

modificado con polímero Etileno Vinil Acetato (EVA), que es un copolímero termoplástico que consiste en unidades repetitivas de acetato de vinilo y etileno, caracterizado por un fácil procesamiento, alta adhesión, buena flexibilidad y compatibilidad. El principal resultado a obtenerse es el diseño óptimo de una mezcla asfáltica con los dos tipos de cementos asfálticos, con la utilización de agregados con una buena caracterización ya que de la calidad de estos materiales depende en gran medida la evolución de los mecanismos de daño que ocurren en las mezclas asfálticas y una adecuada dosificación en el laboratorio.

(Maila, 2013, P.2). en su trabajo de graduación titulado: “Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero Etileno Vinil Acetato (EVA)”, previo la obtención del título de ingeniero civil, Universidad Central del Ecuador, en la ciudad de Quito-Ecuador, cuyo objetivo principal fue de disminuir el deterioro y daños viales con el diseño de una mezcla asfáltica modificada, con el polímero EVA.

Una de sus conclusiones fue que de acuerdo a ensayos realizados en pruebas de laboratorio determinó que tiene una considerable mejora en las propiedades mecánicas tales como módulo dinámico elástico, resistencia a la tensión indirecta, resistencia a la pérdida por desgaste, estabilidad, flujo y susceptibilidad térmica de la mezcla modificada con respecto a la mezcla convencional, por lo que se puede asegurar que los daños viales van a disminuir una vez utilizando esta mezcla. El resultado para una mezcla asfáltica modificada óptima de acuerdo a su investigación quedó constituido por 60 por ciento de agregado grueso, 40 por ciento de agregado fino, 6,3 por ciento de asfalto y 3 por ciento de polímero EVA (en peso de asfalto).

(Wulf, 2008, P.8). en su tesis titulada: “Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero”, para obtener el título de ingeniero constructor, Universidad Austral de Chile, en la ciudad de Valdivia-Chile cuyo objetivo fue el de realizar un análisis comparativo entre el asfalto convencional versus el asfalto modificado con polímeros, utilizando específicamente el ensaye Marshall. (Basado en el Manual de Carreteras Vol. 8).

Sus resultados fueron la dosis de los áridos para consecuencia de la alimentación es en frío, debe alterarse de acuerdo a la dispersión de sus granulometrías en el lapso de la obra

y los moldes deberán ser de metal u otro material resistente, de superficies interiores lisas, libres de saltaduras, hendiduras o resaltes.

Una de sus conclusiones fue que al analizar los resultados obtenidos de estabilidad y fluencia queda demostrado que las mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos modificados poseen un mejor comportamiento que las mezclas elaboradas con asfalto convencional. Otra de sus conclusiones también fue que las mezclas elaboradas con altas temperaturas presentan un recubrimiento totalmente adecuado y no se presentó problema alguno, en el mezclado ni en la compactación.

(Infante y Vásquez, 2016, P.32). en su tesis titulado “Estudio comparativo del método convencional y uso de los polímeros EVA y SBS en la aplicación de mezclas asfálticas”, para obtener el título profesional de ingeniero civil, Universidad Señor de Sipán, en la ciudad de Chiclayo-Perú cuyo objetivo fue el de analizar comparativamente las mezclas asfálticas convencionales y con polímero SBS y EVA, en su comportamiento mecánico.

De acuerdo a sus ensayos realizados sus conclusiones fueron que para un tránsito liviano el porcentaje óptimo de polímero EVA es de 4 % incrementando su estabilidad en un 150.54 % con respecto al diseño de pavimento convencional y la fluencia dentro del rango de la norma en 2.43 mm y el porcentaje óptimo de polímero SBS es de 5 % incrementando su estabilidad en un 138.83 % con respecto al diseño de pavimento convencional y una fluencia de 2.53 mm estando dentro del rango de la norma. Para tránsito pesado el porcentaje óptimo de polímero EVA es de 3 % con un incremento de estabilidad de 17.54 % con respecto al diseño óptimo de pavimento convencional y una fluencia de 2.10 mm de dentro del rango de la norma y el porcentaje óptimo de polímero SBS es del 4 % con un incremento de estabilidad de 53.20 % con respecto al pavimento convencional y una fluencia 2.70 mm.

DISEÑO TEÓRICO:

1.2 Situación problemática

En nuestra ciudad existe un gran deterioro de las principales vías de acceso, avenidas y calles, debido a que en la construcción de las mismas se utiliza cementos asfálticos convencionales, y a la falta de investigación para encontrar técnicas adecuadas que

mejoren las propiedades físico/mecánicas de los cementos asfálticos, otro de los problemas es que con el incremento de la población se ha ido aumentando también el tipo de tráfico, la cantidad de tráfico así como también la carga del vehículo, es decir; mayor exigencia al pavimento por lo tanto los insumos que se tienen que utilizar en la construcción de estos pavimentos son también de mayor exigencia.

Un pavimento en mal estado aumenta hasta un 34 % las emisiones de gases de efecto invernadero, genera mayor tráfico y problemas circulatorios, y puede disminuir la vida útil de los vehículos hasta un 25 %. Estos son datos generales de lo que realmente pasa actualmente, y lo que se pretende es dar solución.

Por esta razón y muchas otras más, se tiene la necesidad de realizar esta investigación para poder analizar el comportamiento de una mezcla asfáltica modificada y comparar con otra mezcla convencional, para luego evaluar y verificar los resultados obtenidos, que brinden confiabilidad contundente y después se pueda involucrar en la elaboración de vías o carreteras ya sea para un diseño de carpetas asfálticas en un tramo carretero, conservación, mantenimiento y/o rehabilitación de carreteras deterioradas.

1.2.1 Problema

¿Si se realiza una mezcla asfáltica modificada con Etileno Vinil Acetato, mejorarán las propiedades en comparación con una mezcla convencional?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema

Las mezclas modificadas actualmente proporcionan mejores resultados que las mezclas convencionales, esto se debe a que los polímeros proporcionan mayor resistencia a la flexo-tracción por la acción de las cargas dinámicas del tráfico vehicular. Al incorporar el polímero Etileno Vinil Acetato, es viable que mejoren sus propiedades mecánicas, porque los polímeros también ayudan a que la mezcla asfáltica absorba menos agua, por tanto, sufre menor daño que las mezclas convencionales.

El polímero Etileno Vinil Acetato (EVA) es de fácil adquisición, se encuentra en cualquier mercado local, nacional e internacional, se puede adquirir en pequeñas y grandes cantidades.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial del problema

El estudio es realizado en un semestre en instalaciones del Laboratorio de Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

1.3 Justificación

1.3.1 Académica

Con la presente investigación se pretende dar a conocer una visión académica y de aporte a la sociedad, que mediante ensayos en laboratorios se analiza el comportamiento de mezclas asfálticas utilizando cementos asfálticos convencional y modificado, se realiza también un estudio de los cementos asfálticos modificados con polímero EVA, ya que estos materiales contribuyen en la mejora de nuestras obras viales.

1.3.2 Técnica – práctica

Los resultados del presente trabajo de investigación mejorarán la infraestructura vial, adicionando materiales nuevos, innovadores e incluso reciclados que ayudan a mejorar las propiedades y de esta manera contribuir con el desarrollo de la economía de nuestro país.

1.3.3 Social

La importancia de este estudio es de gran aporte a la sociedad, para poder desarrollar en un futuro carreteras con mezclas asfálticas modificadas y que ellos sean los beneficiarios directos, si bien se sabe que las carreteras son una pieza clave en el desarrollo económico y social en el territorio de cualquier país, ya que fomenta el desarrollo económico. Una obra vial bien planificada se traduce en reducciones de los costos operativos, proporcionando una mayor movilidad de personas, bienes y servicios; mejorando en tiempo y contaminación del ambiente, y en consecuencia brindando más impulso económico de las zonas por donde atraviesan. Los resultados de este trabajo de investigación permitirán disminuir el congestionamiento en la operación y posible mantenimiento de esta y el deterioro de las estructuras a corto plazo, mejorando y ampliando la vida útil de un pavimento flexible.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento de las propiedades de la mezcla asfáltica modificada con el polímero Etileno Vinil Acetato (EVA), utilizando el método Marshall, con la finalidad de establecer las variaciones de sus propiedades respecto a una mezcla convencional.

1.4.2 Objetivos específicos

- Recopilar información de las mezclas asfálticas modificadas, sus características y propiedades respecto al polímero E.V.A.
- Caracterizar el cemento asfáltico convencional y modificado con el polímero E.V.A. mediante ensayos de laboratorio.
- Caracterizar los agregados que se utilizan en la mezcla asfáltica, para conocer sus propiedades y verificar si cumplen con los requisitos de las normas.
- Dosificar las mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall variando las cantidades de cemento asfáltico convencional para encontrar el contenido óptimo.
- Dosificar las mezclas asfálticas modificadas en caliente por el método Marshall, variando las cantidades del polímero E.V.A. de 0,5% al 3% para encontrar su contenido óptimo.
- Analizar el comportamiento de las propiedades de la mezcla modificada con polímero E.V.A. respecto a las propiedades la mezcla convencional.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación

1.5 Hipótesis

Si, en una mezcla asfáltica, utilizamos cemento asfáltico modificado con polímero Etileno Vinil Acetato (EVA), entonces se mejorarán sus propiedades en comparación a otra mezcla con cemento asfáltico convencional.

1.6 Operacionalización de las variables

1.6.1 Variable independiente

- Mezcla asfáltica modificada con polímero E.V.A.

1.6.2 Variable dependiente

- Propiedades de la mezcla asfáltica:

- ❖ Estabilidad
- ❖ Fluencia
- ❖ Densidad
- ❖ % de vacíos
- ❖ Relación Betún Vacíos
- ❖ Vacíos de agregado mineral

1.6.3 Conceptualización y operacionalización de las variables

Tabla 1.1. Conceptualización y operacionalización de variables

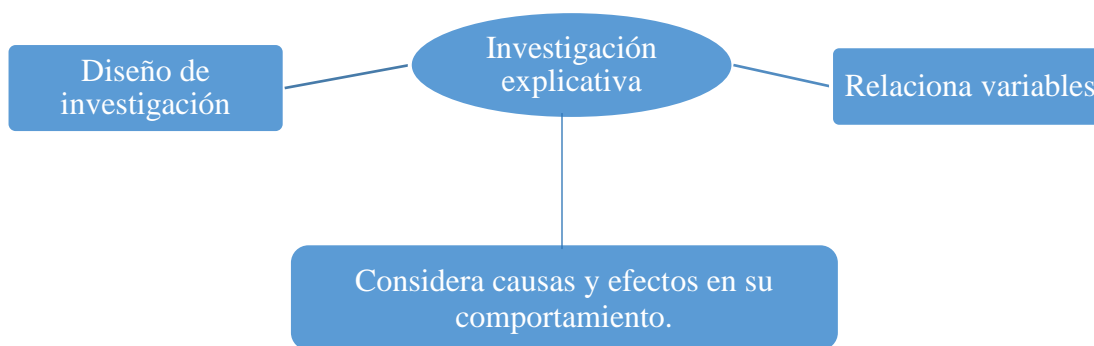
Variable	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Independiente			
Mezcla asfáltica modificada con polímero EVA	Mezcla de agregado y asfalto modificado con EVA.	% de asfalto modificado con EVA en la mezcla.	Briquetas para determinar sus características
Dependiente			
Propiedades de la mezcla asfáltica	Densidad	G/cm ³	Especificaciones de las normas AASHTO/ASTM
	% de vacíos	%	
	Estabilidad	Lb	
	Fluencia	0.1 pulg	
	R.B.V.	%	
	V.A.M.	%	

Fuente: Elaboración propia.

DISEÑO METODOLÓGICO:

1.7 Identificación del tipo de investigación

Gráfico 1.1. Tipo de investigación



Fuente: Elaboración propia.

1.8 Unidades de estudio y decisión muestral

La presente investigación describe la unidad de estudio, población, muestra y selección de muestreo:

1.8.1 Unidad de estudio

- Mezclas asfálticas

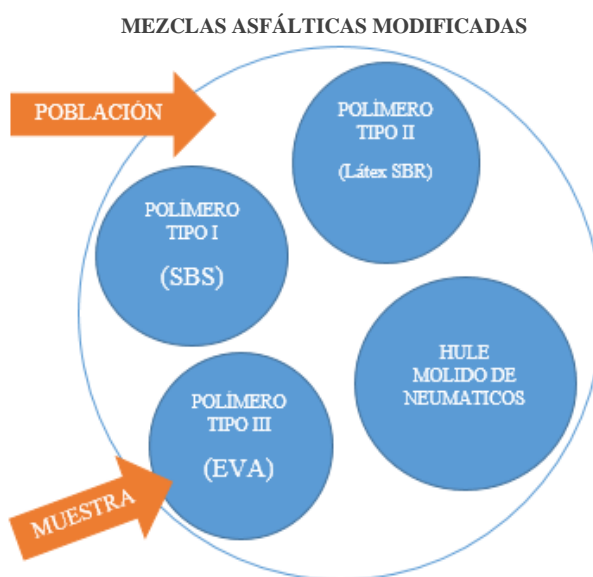
1.8.2 Población

- Mezclas asfálticas modificadas

1.8.3 Muestra

- Mezclas asfálticas modificadas con polímero Etileno Vinil Acetato (EVA)

Figura 1.1. Ilustración de la población y muestra.



Fuente: Elaboración propia.

1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo

El muestreo es estratificado, porque el estudio se realiza en grupos o estratos que varían según el contenido del polímero Etileno Vinil Acetato.

1.9 Métodos y técnicas empleadas

Los métodos y técnicas empleadas son:

1.9.1 Métodos

Los métodos empleados en la presente investigación son:

Método experimental

La investigación experimental, es cualquier investigación realizada con un enfoque científico, donde un conjunto de variables se mantiene constantes, mientras que el otro conjunto de variables se mide como sujeto del experimento. El ejemplo más simple de una investigación experimental es una prueba de laboratorio.

Método empírico

La investigación empírica, es aquella indagación basada en los hechos que son percibidos mediante la experiencia sensorial, es decir, lo captado a través de los sentidos. Puede ser experimental, realizada en condiciones de laboratorio, o de campo en ambientes naturales no controlados y libres de manipulación de variables. Es propia de las ciencias fácticas o empíricas cuyos objetos de estudio son materiales o tangibles y agrupan tanto las ciencias naturales (biología, química, física experimental) como las ciencias sociales (sociología, antropología, economía, historia). La investigación empírica, en función del enfoque adoptado, generalmente se clasifica en cuantitativa (paradigma positivista) y cualitativa (paradigma interpretativo).

1.9.2 Técnicas

Las técnicas aplicadas en la presente investigación son:

Técnica de muestreo de agregados

La técnica de muestreo empleada para muestrear los agregados es no probabilística, en esta técnica la selección de los sujetos a estudio dependerá de ciertas características, criterios, etc. que el investigador considere en ese momento, en este caso se desea muestrear los agregados para una mezcla asfáltica, deben ser chancados y tener diferentes tamaños máximos, la grava de 3/4", la gravilla de 3/8", la arena N°4, Filler pasa N°200. Así mismo al elegir un tipo de cemento asfáltico también la técnica de muestreo es no probabilística, porque se elige un cemento asfáltico convencional semi blando 85/100, de fácil adquisición en el medio.

Investigación bibliográfica

La investigación bibliográfica o documental consiste en la revisión de material bibliográfico existente con respecto al tema a estudiar. Se trata de uno de los principales pasos para cualquier investigación e incluye la selección de fuentes de información.

En síntesis, la investigación bibliográfica consiste en la búsqueda, recopilación, organización, valoración, crítica e información de datos bibliográficos.

Los tipos de investigación bibliográfica son:

- Argumentativa o del tipo exploratoria: El investigador tiene como objetivo principal tomar una postura sobre un determinado tema para probar si ese elemento a estudiar es correcto o incorrecto. Considera causas, consecuencias y soluciones posibles que llevarán a una conclusión más del tipo crítica.
- Informativa o del tipo expositiva: A diferencia del anterior, no busca objetar un tema sino recrear el contexto teórico de la investigación. Para ello se vale de fuentes confiables, y de la selección y el análisis del material en cuestión.

Investigación de trabajo en laboratorio

La investigación de trabajo en laboratorio es la recopilación de datos nuevos de fuentes primarias para un propósito específico. Es un método de recolección de datos cualitativos encaminado a comprender, observar e interactuar con las relaciones en su entorno natural.

Cuando los investigadores expresan sobre trabajar en “laboratorio”, se refieren a ciertos ambientes donde las condiciones de estudio pueden ser controladas y observadas.

Algunas veces los investigadores utilizan los términos etnografía u observación para referirse a este método de recopilación de datos; el primero es más utilizado en antropología, mientras que el segundo es utilizado comúnmente en sociología.

Podrías pensar en la investigación en laboratorio como un término general que incluye el sinfín de actividades que realizan los investigadores de laboratorio cuando recopilan datos, participan, observan, y analizan resultados comparando con documentos o algunos objetos relacionados con el estudio.

1.10 Procesamiento de la información

Para procesar la información se utilizará el programa Excel para poder determinar la estadística descriptiva e inferencial:

Estadística Descriptiva

Tabular datos, analizar los resultados por variable y calcular las medidas de tendencia central:

- Media: Es la media aritmética (promedio) de los valores de una variable. Suma de los valores divididos por el tamaño de la muestra, es muy sensible a los valores extremos.

$$X_m = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^i X_i = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

- Mediana: Es un conjunto de datos ordenados de mayor a menor, la mediana corresponde al dato central, aquel que deja un 50% de la información abajo y el otro 50% es mayor. Es un valor que divide las observaciones en dos grupos con el mismo número de individuos.
- Moda: Es el valor o valores donde la distribución de frecuencias alcanza un máximo.

Luego calcular las medidas de Dispersión:

- Desviación estándar: Es la raíz cuadrada de la varianza, es la más usada de las medidas de dispersión.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^i (X_i - X_m)^2}{n-1}} \text{ Para población}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^i (X_i - X_m)^2}{n}} \text{ Para muestras}$$

X_m : Se trata de la media seleccionada, se debe seleccionar la que tenga menor dispersión.

Estadística inferencial

La estadística inferencial es seleccionada para comprobar la Hipótesis formulada. Se debe hacer una relación entre las variables.

$$X \rightarrow Y_n$$

Se realiza la tabulación ordenada de los datos.

Graficar y relacionar con las variables independientes.

Describir y explicar las relaciones funcionales entre las variables.

1.11 Alcance de la investigación

Es una investigación que busca una relación de causa y efecto entre las variables independientes y dependientes, lo que lleva a establecer que su alcance se adapta a una investigación del tipo “experimental causal explicativo”, donde la variable independiente es definida y manipulada por el investigador, la categoría de esta investigación depende del control interno del proceso y por lo tanto acomodarse entre un experimento puro y cuasi experimento.

Este trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Asfalto y Hormigones de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, de la Facultad de Ciencias y Tecnología; por consiguiente, se centra en cumplir con los objetivos de la investigación de demostrar que el asfalto modificado con polímero es mucho más eficiente en comparación con un asfalto convencional.

CAPÍTULO II

MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS

2.1 Asfalto

Para Fredy Alberto Reyes Lizcano (2003): “Los asfaltos son aquellas sustancias de color oscuro que pueden ser líquidos, semisólidos o sólidos, compuestas esencialmente de hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono en su mayor parte y procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de determinados crudos de petróleo por destilación o extracción, cuyas cualidades aglutinantes y propiedades físicas y químicas los hacen óptimos para un gran número de aplicaciones”.

También Hugo León Arenas Lozano (2006) afirma que: “El asfalto es un material de color oscuro, que presenta propiedades ligantes y aglutinantes, conformado por una serie muy compleja de elementos y compuestos en los que sobresalen los hidrocarburos; soluble en gran parte en disulfuro de carbono, presenta consistencia semisólida a las temperaturas ambientales ordinarias, pero tiende rápidamente a la liquidez al incrementarse la temperatura. Esta última propiedad ha permitido adecuarlo a muchos usos en la construcción de distintas obras civiles.

Muchos de los asfaltos usados en trabajos de pavimentación provienen de la destilación del petróleo crudo. La gran versatilidad de los materiales bituminosos hace que estos sean los más utilizados para la construcción y mantenimiento de estructuras de pavimento flexibles.

Estos materiales ligan el agregado pétreo para conformar mezclas asfálticas y son los responsables de brindar, a la capa asfáltica, resistencia mecánica bajo carga monotónica, estática y/o cíclica, impermeabilidad y durabilidad.

2.2 Caracterización de los materiales asfálticos

Las propiedades y características de los materiales asfálticos dependen de su estructura y composición química; pero debido a su complejidad, estos materiales se caracterizan mediante ensayos empíricos para valorar las propiedades que tiene que poseer para emplearse como ligantes en obra de carreteras.

Las propiedades fundamentales que tiene que poseer los asfaltos para su empleo en carretera son:

- Buen comportamiento mecánico y reológico para resistir las tensiones impuestas por el tráfico y poder mantener a las temperaturas de servicio, la estructura de la mezcla asfáltica.
- Resistir al envejecimiento frente a los agentes atmosféricos y condiciones ambientales para conservar sus propiedades con el tiempo.

Es decir, que las propiedades fundamentales que deben poseer los asfaltos para emplearse en carreteras son: buen comportamiento reológico y resistencia al envejecimiento.

2.3 Reología del asfalto

La Reología, como definición general, es la ciencia que estudia la fluencia y la deformación de la materia. En este sentido, comprende:

- La teoría de la elasticidad y resistencia de los materiales.
- La plasticidad.
- La viscosidad.

El concepto de reología se utiliza en un sentido más estricto, en el cual mide la deformación de los cuerpos que no son ni sólidos ni líquidos, es decir; de cuerpos intermedios entre sólido elástico y líquido viscoso.

- Los materiales se asumen como cuerpos ideales y elásticos.
- Se usan los materiales en condiciones en donde el modelo elástico no tiene más validez.
- Se pueden obviar fenómenos secundarios en los que la teoría elástica no tiene importancia. Acero y hormigón no son elásticos, existe una relajación de aceros y variaciones en el hormigón.
- Los materiales no son puramente elásticos ni viscosos: los materiales plásticos, el hormigón bituminoso, entre otros.

Objetivo: Determinar deformaciones de cuerpos intermedios entre sólidos elásticos y líquidos viscosos bajo fuerzas actuantes; se interesa en movimientos relativos de las partículas que lo forman.

Reología experimental: Mide sobre cuerpos reales las deformaciones resultantes de las sollicitaciones particulares, fáciles de realizar en el laboratorio.

Reología teórica: Define matemáticamente el comportamiento de estos cuerpos, de manera que se puedan predecir las respuestas en condiciones diferentes del laboratorio. Esta última es la más interesante (Reyes Lizcano, 2003).

2.3.1 Características reológicas del asfalto

La reología es una de las propiedades más importantes de los productos asfálticos. Se refiere a la variación de las propiedades del flujo a través del tiempo de aplicación de una carga e incluye una propiedad muy importante: la viscosidad.

La viscosidad del asfalto varía con la temperatura en mayor o menor grado (susceptibilidad térmica) y su estudio es muy importante y de interés práctico, porque en todas las aplicaciones del asfalto se debe modificar su viscosidad mediante el calentamiento.

A temperaturas altas el asfalto se considera un fluido viscoso, mientras que a temperaturas bajas de servicio se considera un material sólido con propiedades elásticas. Con el propósito de conocer las características de flujo del asfalto a distintas temperaturas, se utilizan actualmente monogramas y curvas que relacionan las principales propiedades del asfalto (Reyes Lizcano, 2003).

El comportamiento reológico de los asfaltos es de fundamental importancia para su empleo en carreteras, tanto para conseguir una correcta manipulación y puesta en obra, como para valorar su comportamiento en servicio. (Institute, 1986)

Los asfaltos presentan un comportamiento reológico muy complejo que depende de la temperatura, de carga y de tiempo de aplicación. A bajas temperaturas y durante intervalos pequeños de tiempo el asfalto tiene un carácter elástico, mientras que, a temperatura moderadamente elevada o tiempos de aplicación muy largos, la elasticidad prácticamente

desaparece, y el asfalto se deforma permanentemente y fluye. El mayor o menor grado de elasticidad depende de la composición y estructura coloidal.

Para caracterizar el complejo comportamiento reológico de los asfaltos se realizan ensayos empíricos de consistencia.

2.3.2 Ensayos empíricos de consistencia

El asfalto se presenta en una amplia variedad de tipos y grados normalizados, en los siguientes párrafos se describen brevemente los ensayos de laboratorio necesarios para determinar si los asfaltos cumplen con las especificaciones y se hace referencia a los métodos de ensayo normalizados:

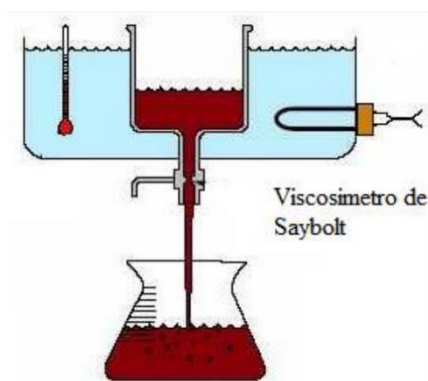
Viscosidad

La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas que se emplean durante su aplicación. La viscosidad o consistencia del asfalto se mide en el ensayo de viscosidad Saybolt-Furol o en el ensayo de viscosidad cinemática.

En el ensayo Saybolt-Furol se emplea un viscosímetro Saybolt con orificio Furol. Se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho una cantidad especificada de asfalto. Como las temperaturas a que se determina la viscosidad de los asfaltos son frecuentemente superiores a los 100 °C, el baño de temperatura constante del viscosímetro se llena con algún tipo de aceite. Cuando el asfalto ha alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide el tiempo necesario en segundos para que pasen a través del orificio Furol 60 ml del material.

Cuanto más viscosos son los materiales más tiempo es necesario para que pasen a través del orificio. La figura 2.1 representa el procedimiento de ensayo. Los valores obtenidos se expresan como segundos Saybolt-Furol (SSF). Los aparatos y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método ASTM E-102 (Institute, 1986)

Figura 2.1. Determinación de la viscosidad Saybolt-Furol.



Fuente: Manual del asfalto, 1986.

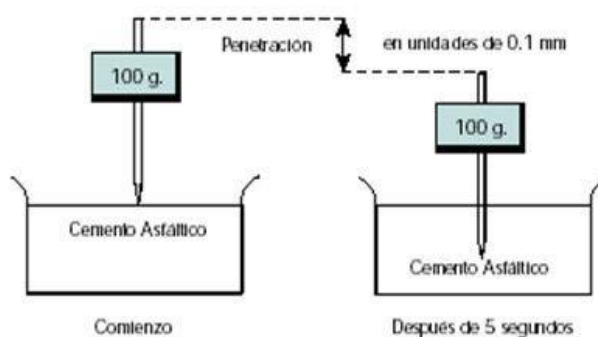
Penetración

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25 °C, que la aguja está cargada con 100 g y que la carga se aplica durante 5 seg. (ver figura 2.2).

La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal. Es evidente que cuanto más blando sea el asfalto mayor será la cifra que indique su penetración. Los asfaltos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración.

El instituto del asfalto ha adoptado cuatro grados de asfalto para pavimentación con penetraciones comprendidas dentro de los márgenes siguientes: 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300. Además, el Instituto tiene especificaciones para un asfalto de penetración comprendida en el margen 40-50, que se usa en aplicaciones especiales e industrias. Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el Método ASTM D-5 (Institute, 1986).

Figura 2.2. Ensayo normal de penetración.



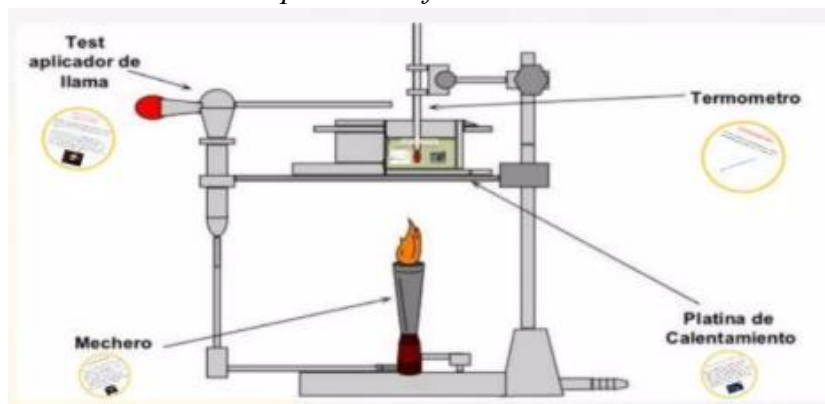
Fuente: Manual del asfalto, 1986.

Punto de inflamación

El punto de inflamación del asfalto indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a la que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los asfaltos.

El punto de inflamación de un asfalto se mide por el ensayo en vaso abierto Cleveland según condiciones normalizadas prescritas en los métodos ASTM D-92. En la figura 2.3 se representa esquemáticamente el ensayo. Un vaso abierto de latón se llena parcialmente con asfalto y se calienta a una velocidad establecida. Se hace pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define como punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina (Institute, 1986).

Figura 2.3. Determinación del punto de inflamación en vaso abierto Cleveland



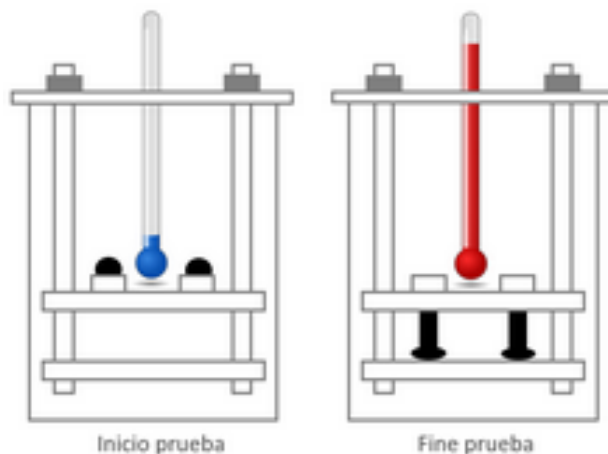
Fuente: Manual del asfalto, 1986.

Punto de reblandecimiento

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentación, se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura a que estos asfaltos se hacen fluidos. Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una velocidad determinada y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto.

Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en el método ASTM D-36 (Institute, 1986).

Figura 2.4. Determinación del punto de ablandamiento.



Fuente: Manual del asfalto, 1986.

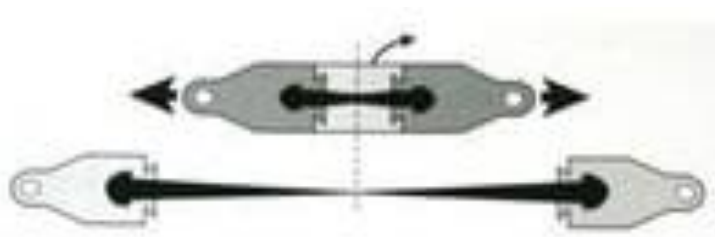
Ductilidad

La ductilidad es una característica de los asfaltos importante en muchas aplicaciones. La presencia o ausencia de ductilidad, sin embargo, tiene usualmente mayor importancia que el grado de ductilidad existente. Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos a los que les falta esta característica. Por otra parte,

los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura. En algunas aplicaciones, como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder aglomerante, mientras que, en otras, como la inyección bajo losas de hormigón y el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.

La ductilidad del asfalto se mide en un ensayo de extensión del tipo representado en la figura 2.4. El ensayo consiste en moldear en condiciones y con dimensiones normalizadas una probeta de asfalto que después se somete a la temperatura normalizada de ensayo y se somete a alargamiento con una velocidad especificada hasta que el hilo que une los dos extremos se rompe. La longitud (en cm) a la que el hilo de material se rompe define la ductilidad. Las condiciones normalizadas para este ensayo se determinan detalladamente en los métodos ASTM D-113 (Institute, 1986).

Figura 2.5. Ensayo de ductilidad



Fuente: Manual del asfalto, 1986.

Peso específico

Aunque normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del asfalto que se emplea. Este conocimiento es útil para hacer las correcciones de volumen cuando éste se mide a temperaturas elevadas. Se emplea también como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactadas. El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que pesa el agua a la temperatura fijada. Todos los líquidos y la mayor parte de los sólidos sufren cambios de volumen cuando varía la temperatura. Se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. Para fijar condiciones determinadas aplicables (Institute, 1986).

Tabla 2.1. 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 Saybolt Furol 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)	1 max.	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) %	1 max.	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.

2.4 Agregados pétreos

La denominación técnica “agregados pétreos” en pavimentos se refiere a un conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas finas o fillers (naturales o artificiales); utilizados ya sea para la fabricación de mezclas asfálticas, concretos hidráulicos y materiales estabilizados o para la construcción de capas de terraplén, afirmado, subbase o base granular. En términos generales, en un ensayo de granulometría por cribado o tamizado,

las partículas con diámetro entre 2 mm y 6,4 cm son reconocidos como gravas, aquellas con diámetro entre 0,075 y 2 mm son reconocidas como arenas (gruesas y finas) y las que son de diámetro inferior a 0,075 mm son vistas como tamaño de arcilla. Estas últimas pueden adquirir la denominación de filler o llenante mineral si no experimentan plasticidad en contacto con el agua (índice de plasticidad, $IP=0$).

Dentro de una estructura de pavimento con capa asfáltica, los agregados pétreos más exigentes en cuanto a durabilidad, textura y resistencia mecánica, son aquellos que conforman las mezclas asfálticas.

En estos últimos materiales los agregados pétreos conforman entre el 88 % y el 96 % de la masa y más del 75 % del volumen. En las mezclas asfálticas son los encargados de soportar las cargas impuestas por el parque automotor y transmitirla en menores proporciones a las capas

subyacentes. De la calidad de estos materiales depende en gran medida la evolución de los mecanismos de daño que ocurren en las mezclas asfálticas como son el ahuellamiento, la fatiga, el stripping y el daño por humedad.

Las canteras y los depósitos aluviales se consideran las principales fuentes de agregados pétreos naturales. Estos materiales deben cumplir con una granulometría adecuada y requisitos mínimos de calidad establecidos por las especificaciones para el uso de los mismos en pavimentos. Los agregados de cantera se caracterizan por presentar una forma más angular por el sometimiento a los procesos de trituración, permitiendo un mejor acomodo o trabazón de partículas en la mezcla asfáltica. Por otra parte, los agregados provenientes de depósitos aluviales se caracterizan, en algunos casos, por una alta resistencia mecánica al estar sometidos a fenómenos físicos ante la acción de gravedad y agua; sin embargo, a partir de esos procesos resultan partículas con forma redondeadas, lo cual podría afectar negativamente la acomodación de partículas y consecuentemente la estabilización y la resistencia mecánica de la mezcla. Las principales características que deben cumplir los agregados están relacionadas según: el tamaño y la distribución granulométrica, la resistencia mecánica, la durabilidad, la limpieza, la forma de partículas, las relaciones de peso y volumen. Para entender con mayor claridad la importancia de los requisitos de calidad que se exigen a los agregados pétreos, a continuación, se realizará

una breve descripción de los ensayos que se requieren ejecutar sobre estos materiales (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

2.4.1 Caracterización de los materiales granulares - agregado grueso

- **Porcentaje de caras fracturadas en los áridos (D 5821-NTL 358)**

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso, del material que presente una o más caras fracturadas de las muestras de los áridos. El propósito de este ensayo es de maximizar la resistencia al esfuerzo cortante con el incremento de la fricción entre las partículas. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados empleados para carpeta o afirmado; y dar fricción y textura a agregados empleados en pavimentación.

La forma de las partículas de los agregados puede afectar la trabajabilidad durante su colocación; así como la cantidad de fuerza necesaria para compactarla a la densidad requerida y la resistencia de estructura del pavimento durante su vida de servicio. Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento en el pavimento, debido a que se entrelazan al ser compactadas. El mejor entrelazamiento se da, generalmente, con partículas de bordes puntiagudos y de forma cubica, producidas, casi siempre por trituración.

- **Ensayo de resistencia al desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM C 131; AASHTO T96)**

Para fines de pavimentación, los agregados deben resistir la quiebra, la degradación y la desintegración, causadas por la acción del tránsito de vehículos y la manipulación durante el proceso constructivo de la capa asfáltica. Los agregados deben presentar características de tenacidad, resistencia a la abrasión y dureza, que son evaluadas en parte por el ensayo en la máquina de Los Ángeles (Bernucci et al., 2008).

Este método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la máquina de Los Ángeles. El agregado es sometido a una carga abrasiva por medio de esferas de acero, a una velocidad y revoluciones estándar. Durante el ensayo, los agregados pétreos son impactados dentro de un cilindro metálico por esferas de acero de diámetro aproximado 46.8 mm y una masa comprendida entre 390 g y 445 g.

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento. El resultado del ensayo se expresa en porcentaje de desgaste, calculándose como la diferencia entre el peso inicial y final de la muestra de ensayo con respecto al peso inicial.

$$P(\%) = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100$$

Donde:

P = Pérdida de masa de la muestra (%)

m_i = Masa inicial de la muestra (g)

m_f = Masa final de la muestra (g)

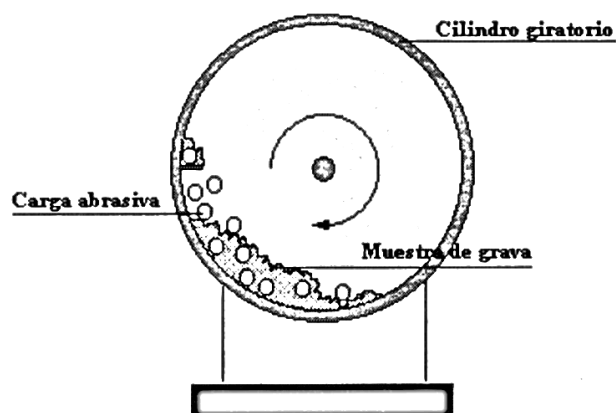
Se debe elegir de la siguiente tabla el grado de ensaye que mejor represente la granulometría de la muestra. Para ello, se suma los porcentajes parciales retenidos en los tamices correspondientes a cada uno de los grados y se elige para el ensaye el que entregue una mayor suma.

Tabla 2.2. Grados de ensaye (definidos por sus rangos de tamaño, en mm).

Tamaño de Partículas (mm)		1 (75-37,5) (3" - 1 1/2")	2 (50-2,36) (2" - Nº8)	3 (37,5-19) (1 1/2" - 3/4")	4 (37,5-9,5) (1 1/2" - 3/8")	5 (19-9,5) (3/4" - 3/8")	6 (9,5-4,75) (3/8" - Nº 4)	7 (4,75-2,36) (Nº 4 - Nº 8)
(mm)	ASTM	Tamaño de las fracciones (g)						
75 - 63	3" - 2 1/2"	2.500 ± 50						
63- 50	2 1/2" - 2"	2.500 ± 50						
50 -37,5	2" - 1 1/2"	5.000 ± 50	5.000 ± 25	5.000 ± 25	1.250 ± 10			
37,5-25,0	1 1/2" - 1"		5.000 ± 50					
25,0-19	1" - 3/4"			5.000 ± 25	1.250 ± 25	2.500 ± 10		
19 - 12,5	3/4" - 1/2"				1.250 ± 10			
12,5 - 9,5	1/2" - 3/8"				1.250 ± 25			
9,5 - 6,3	3/8" - 1/4"					2.500 ± 10		
6,3 -4,75	1/4" - Nº 4							
4,75 - 2,36	Nº4 - Nº8							
Masa inicial de muestra (Mi)		10.000 ±100	10.000±75	10.000± 50	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10
Esferas								
numero masa (g)		12		12	11	8	6	
		5.000 ± 25		5.000 ± 25	4.584 ± 25	3.330 ± 25	2.500 ± 15	
Numero de revoluciones		1.000		500				

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales para asfaltos, ABC.

Figura 2.6. Ensayo desgaste de Los Ángeles



Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales para asfaltos, ABC.

- **Determinación del peso específico del agregado grueso (ASTM D-127)**

a) Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

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

Las cantidades mínimas para ensayo se indican en la tabla 2.3 en función del tamaño máximo nominal del agregado.

Tabla 2.3. Cantidades mínimas para ensayos según el tamaño nominal

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra
mm	(pulg)	kg
hasta 12.5	1/2	2
19.0	3/4	3
25.0	1	4
37.5	1 1/2	5
50.0	2	8
63.0	2 1/2	12
75.0	3	18
90.0	3 1/2	25

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales para asfaltos, ABC.

- **Determinación del peso específico del agregado fino (ASTM D-128)**

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente. El procedimiento para realizar este ensayo es el descrito en la norma ASTM D-128.

Las ecuaciones utilizadas para calcular el peso específico y la absorción:

Peso específico aparente:

$$PE = \frac{A}{A + B - C}$$

Absorción:

$$\%Absorción = \frac{500 - A}{A}$$

Donde:

PE = Peso específico.

A = Peso del material seco en horno.

B = Peso del matraz lleno con agua a 20 °C.

C = Peso del matraz + agregado + agua a 20°C.

- **Equivalente de arena (ASTM D-2419)**

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm). El término “Equivalente de Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución de cloruro de calcio (Ca Cl₂) en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente

de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

- **Análisis granulométrico del material (AASHTO T 27 - 11)**

El análisis granulométrico tiene como objeto, que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en la mezcla de pavimentación en ciertos porcentajes.

Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla.

El método utilizado para determinar la graduación de los agregados es por tamizado seco, el mismo que tiene las siguientes características:

- Las muestras para el tamizado son reducidas por medio de un “cuarteador”.
- Los materiales finos y gruesos son separados utilizando un tamiz 2,36 mm (Nº8).
- Las muestras son secadas en el horno hasta un peso constante.
- Las muestras finas y las muestras gruesas son tamizadas separadamente.
- El peso de las fracciones (porciones) retenidas en cada tamiz, y el platón que esta al final de los tamices, es registrado, así como la graduación de cada muestra (parte fina y parte gruesa).

Tabla 2.4. Requisitos Granulométricos para mezclas asfálticas

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	—	—	—
¾" (19.0 mm.)	90-100	100	—	—
½" (12.7 mm.)	—	90-100	100	—
3/8" (9.50 mm.)	56-80	—	90-100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35-65	44-74	55-85	80-100
Nº 8 (2.36 mm.)	23-49	28-58	32-67	65-100
Nº 16 (2.36 mm.)	—	—	—	40-80
Nº 30 (0.60 mm.)	—	—	—	25-65
Nº 50 (0.30 mm.)	5-19	5-21	7-23	7-40
Nº 100 (0.15 mm.)	—	—	—	3-20
Nº 200 (0.075 mm.)	2-8	2-10	2-10	2-10

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales para asfaltos, ABC.

2.5 Asfaltos modificados con polímeros

Las mezclas asfálticas modificadas es el resultado de la incorporación en forma de disolución, sustancias de alto peso molecular denominadas polímeros, que son estables en un periodo y además no sufren cambios ante cambios de temperaturas con el fin de analizar y modificar propiedades como el envejecimiento, la resistencia al agua, la respuesta elástica, la cohesión, entre otros.

De acuerdo a los modificadores aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas cuando estas se someten a esfuerzos de tensión por repetición de cargas o a deformaciones, además, reducen el agrietamiento y problemas ante la variación de la 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 que se quiere conseguir 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 frío y aumentar la cohesión en tiempo de calor.
- Disminuir la susceptibilidad a los tiempos de aplicación de la carga.
- Aumentar la resistencia a la deformación permanente y a la rotura en un rango más amplio de temperaturas, tensiones y tiempos de carga.

Una vez se logrando estos objetivos, el asfalto se puede destinar a:

- Aumentar la durabilidad de las carreteras o disminuir el espesor de las mismas.
- Recubrimientos para carreteras de alto tráfico.

La obtención de una buena mezcla de asfalto y polímero, dependerá de que el polímero adicionado tenga una estructura química que le permita una buena dispersión en el asfalto, de modo de lograr una estructura de malla, la cual a su vez dependerá del grado de productos aromáticos que contenga el asfalto.

El grado de modificación en la elasticidad dependerá del tipo de polímero empleado y su concentración. Los nuevos procesos en los cuales el polímero se asocia con el asfalto a través de una reacción química, incrementan notablemente las propiedades reológicas del asfalto.

2.5.1 El polímero

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples) (Montejo, 1998). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

Algunos modificadores poliméricos que han dado buenos resultados, se enlistan a continuación:

- Homopolímeros: que tienen una sola unidad estructural (monómero).
- Copolímeros: Tienen varias unidades estructurales distintas (EVA, SBS).
- Elastómeros: Al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tiene deformaciones seudo plásticas con poca elasticidad.

Para Fredy, R (2003) son sustancias macromoleculares o sintéticas, obtenidas a partir de moléculas más sencillas por reacciones poliméricas. Por consiguiente, un polímero es un compuesto con elevado peso molecular, cuya estructura se representa por la repetición de pequeñas unidades.

Los polímeros, una vez dispersos en el asfalto, llegan a formar verdaderas redes tridimensionales, creando un reticulado que confiere propiedades relevantes de elasticidad al asfalto modificado.

- **Polímeros termoplásticos**

Son solubles que se reblandecen con el calor y, de acuerdo con su intensidad, pueden llegar a fluir. Una vez enfriados, es posible moldearlos en repetidas ocasiones sin que pierdan sus propiedades. Por lo general, son polímeros lineales o ligeramente ramificados. Los termoplásticos más comunes son el polietileno, el polipropileno, el policloruro de vinilo el poliestireno, los copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA) y las poliamidas, entre otros (Reyes Lizcano, 2003).

- **Propiedades de los polímeros**

Los materiales poliméricos, en función de su composición química, estructura (lineal, ramificada, entrecruzada), configuración espacial, estado de agregación, peso molecular, aditivos, etc., presentan un abanico de propiedades que hace prácticamente imposible su sistematización. Sin embargo, los polímeros tienen una serie de propiedades generales, que puedan considerarse comunes a todos ellos:

- **Bajo peso específico**

No presentan un peso específico considerable, el peso por unidad es menor a 0.3 gr.

- **Propiedades mecánicas**

El comportamiento mecánico de los polímeros a temperaturas ambiente puede variar desde las características de un vidrio rígido y quebradizo, hasta la flexibilidad y elasticidad de una goma. Las características mecánicas de los polímeros se miden generalmente con ensayos de tracción, compresión, flexión, dureza, impacto, desgarro, etc. La mayor parte de los polímeros tienen un comportamiento reológico tipo visco elástico, lo cual hace que sus propiedades mecánicas dependan en gran medida del tiempo de duración de la carga. Si se aplica un esfuerzo constante, habrá una deformación inicial instantánea y una deformación de fluencia (más lenta). Si se mantiene la deformación constante, el esfuerzo necesario para producir dicha deformación disminuirá paulatinamente (relajación de esfuerzos).

- **Influencia de la temperatura**

La variación de la temperatura genera cambios en las propiedades de los polímeros, lo que limita su uso en cierto rango. La elevación de temperatura produce un rápido descenso de la resistencia mecánica en los materiales termoplásticos, que comienza antes de su punto de ablandamiento, mientras que las temperaturas bajas lo hacen más frágiles y quebradizos, con la consiguiente disminución de la resistencia a la tracción y al impacto. En los polímeros termoestables las propiedades mecánicas se mantienen en un mayor rango de temperatura, mientras que, en los elastómeros, cuando baja la temperatura, se produce primero un aumento de la rigidez y finalmente, por debajo de la temperatura de

transición vítrea, pierden su capacidad de deformación y se tornan frágiles. Se envejecen a temperaturas elevadas y en presencia de oxígeno, con la consiguiente pérdida de propiedades.

– Durabilidad

Se define como la capacidad que tiene todo material para mantener sus propiedades originales a lo largo del tiempo. Las alteraciones de las propiedades de los polímeros se producen por fatiga (aplicación repetida de esfuerzos) o por envejecimiento (acción del medio ambiente), aunque normalmente ambos factores actúan en conjunto. Los agentes que pueden dar lugar a cambios apreciables en las propiedades de los polímeros son los agentes atmosféricos (agua, ozono, oxígeno y humedad), la radiación solar y el calor, los microorganismos, los agentes químicos y la acción del tránsito. Los cambios generados por esos agentes dependerán del tipo del polímero, su composición y estructura química (Reyes Lizcano, 2003).

2.5.2 Asfalto modificado

Para llevar a cabo la modificación de asfalto, se debe conocer la compatibilidad de este con el modificador para que coexistan como sistema, es decir debe ser miscible, lo que indica que se ha producido una mezcla monofásica. La inmiscibilidad se traduce en la aparición de una segunda fase. Un polímero es compatible con el asfalto cuando la heterogeneidad de la mezcla no se puede apreciar por un examen visual.

Los asfaltos más ricos en fracciones aromáticas y resinas serán los más compatibles, ya que estas fracciones son las que permiten que el polímero se disuelva. Los asfaltos menos compatibles son los más ricos en asfaltenos y saturados.

Los materiales asfálticos modificados, son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación. Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aún en presencia del agua. También aumentan

la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo.

- **Compatibilidad asfalto- polímero**

El comportamiento del asfalto depende básicamente de tres factores:

- Temperatura.
- Tiempo de carga.
- Envejecimiento.

A altas temperaturas y bajo cargas sostenidas, el asfalto se comporta como un líquido viscoso, es una mezcla plástica la cual provoca ahuellamiento. A bajas temperaturas y bajo cargas rápidas se vuelve frágil, ocasionando grietas transversales y agrietamiento térmico.

El objetivo perseguido con la adición de polímeros al asfalto es el de mejorar su reología, buscando:

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

- **Principales modificadores utilizados en el Asfalto**

Desde hace bastante tiempo se emplea caucho como modificador, ya sea natural o sintético, con tasas no superior al 5 %. Actualmente existen los polímeros sintéticos de formulación especial que resultan muy competitivos. Asfaltos modificados con estos polímeros han sido ensayados en pavimentos de varios países.

Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

Plastómeros: Rigidizan el asfalto ofreciendo resistencia, como consecuencia no son deformables elásticamente (PVC, EVA).

- **Asfaltos modificados con polímeros tipo plastómeros**

Debido a la forma en que estos polímeros se incorporan al asfalto aumentan de forma considerable su viscosidad, incluso en bajas dosificaciones. Si se aumenta la concentración del polímero, se llega a un punto en el cual la mayoría de los aceites están asociados con el polímero y se produce un cambio drástico en las propiedades físicas del asfalto. Estas se acercan más a las propiedades del polímero que a las del asfalto.

Esto sucede cuando el contenido del polímero va de 8 – 10%, en este punto, el asfalto aumenta el intervalo de plasticidad, aumenta la resistencia a la ruptura, disminuye su sensibilidad térmica sobre todo en el intervalo de temperaturas de aplicación.

- **Polímero E.V.A.**

Los polímeros o resinas Etilo-Vinil-Acetato son relativamente nuevos en la modificación de asfaltos, son muy compatibles con estos. La relación acetato de vinilo/ etileno es muy importante, pudiéndose variar el contenido de acetato de vinilo de algún % hasta 50% o incluso más. Cuando los contenidos de acetato de vinilo son bajos, las propiedades se asemejan a las de los asfaltos mencionados anteriormente.

Un polímero EVA con un contenido del 18% de acetato de vinilo es el más adecuado para ser usado en la construcción de carreteras. Cuando se aumenta la concentración de acetato de vinilo en el polímero (15 a 30%), adquiere un excelente poder adherente. Los asfaltos modificados con EVA poseen las siguientes características:

- Buena estabilidad térmica a un costo razonable.
- Las dosificaciones de polímero oscilan entre el 2 hasta un 10% dependiendo de las propiedades que se pretende obtener.
- La temperatura de ablandamiento aumenta entre 6 y 12°C.
- Excelente resistencia al resquebrajamiento en flexión es decir a las fatigas provocadas por las flexiones o vibraciones repetidas.

- Aumentan la cohesión de las mezclas a medida que se aumenta el contenido del polímero.

- **¿Por qué se modifican los asfaltos?**

Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en diferentes aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Sin embargo, en la actualidad los grandes volúmenes de tráfico, los criterios de diseño vehicular y el exceso de carga, así como el incremento de la presión de inflado de 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, además estos problemas son causados por la selección de materiales en los diseños (de baja calidad), mal proceso de construcción y la necesidad de optimizar o economizar las inversiones, provocan que los asfaltos convencionales no sean suficientes. Una solución a estos problemas fue la de mejorar las características de los asfaltos para también mejorar su comportamiento en los pavimentos; esto dio origen a nuevos asfaltos que luego fueron denominados “Asfaltos Modificados”.

- **Estructura de los asfaltos modificados**

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 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. Está 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.

- **Compatibilidad de los polímeros**

Para que los asfaltos modificados con polímeros consigan prestaciones óptimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base (es necesario que los polímeros sean compatibles con el material asfáltico), el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje. Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de ésta, el polímero sólo actúa como un filler (mineral como: cemento, cal, talco, sílice, etc.); y por debajo de ésta, pasan a estar muy solubilizados y aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.

Si un polímero se añade a dos diferentes asfaltos, las propiedades físicas de los productos finales, pueden ser muy diferentes. Para mayor efectividad, el polímero debe crear una red continua de trabajo en el asfalto; para que esto ocurra, la química del polímero y del asfalto necesita ser compatible.

Los polímeros compatibles producen rápidamente un asfalto estable, usando técnicas convencionales de preparación. Estos sistemas convencionales de preparación de asfaltos modificados con polímeros 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 o en grandes panes. La temperatura de mezclado depende del tipo de polímero utilizado.

Algunos productores de asfalto polimerizado utilizan procesos especiales para lograr compatibilidad 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.

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.

- **Para polímero 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.

2.6 Ventajas y desventajas del uso de polímero en el asfalto

2.6.1 Ventajas del uso de polímeros en el asfalto

A continuación, se enumeran algunas de las ventajas de los asfaltos modificados:

- Disminuye la susceptibilidad térmica.

- Se obtienen mezclas más rígidas a altas temperaturas de servicio reduciendo las roderas.
- 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.
- Mayor elasticidad: debido a los polímeros de cadenas largas.
- Mayor adherencia: debido a los polímeros de cadenas cortas.
- Mayor cohesión: el polímero refuerza la cohesión de la mezcla.
- Mejor trabajabilidad y compactación: por la acción lubricante del polímero o de los aditivos incorporados para el mezclado.
- Mejor impermeabilización: en los sellados bituminosos, absorbe mejor los esfuerzos tangenciales, evitando la propagación de las fisuras.
- Mayor resistencia al envejecimiento: mantiene las propiedades del ligante, pues los sitios más activos del asfalto son ocupados por el polímero.
- Mayor durabilidad: los ensayos y envejecimiento acelerado en laboratorio, demuestran su excelente resistencia al cambio de sus propiedades características.
- Mejora la vida útil de las mezclas: menos trabajos en conservación.
- 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 fisuras.
- Buenas condiciones de almacenamiento a temperaturas moderadas.
- No requieren equipos especiales.

2.6.2 Desventajas del uso de polímeros en el asfalto

Así como este material presenta algunas ventajas es evidente que también cuenta con algunas desventajas, las cuales se enlistan a continuación:

- 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 se realiza 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 del servicio del pavimento.

2.7 Diferencias entre el asfalto modificado y el asfalto convencional

A continuación, se enlistan algunas de las diferencias entre los asfaltos modificados y los asfaltos convencionales:

- Los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito, pero actualmente debido a la gran demanda de tráfico y de las condiciones climáticas, los asfaltos convencionales no satisfacen algunas expectativas tal como cumplir un determinado periodo de servicio.
- Los asfaltos convencionales, aún con los grados más duros no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidos por el tránsito, especialmente cuando se afrontan condiciones de temperatura alta.
- Los asfaltos modificados son diseñados eligiendo el polímero correcto para determinada aplicación, y asegurándose que es compatible con el asfalto base, esto se consigue mediante pruebas experimentales de laboratorio y de campo.

- Para los asfaltos modificados con polímeros consigan las prestaciones optimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base (es necesario que los polímeros sean compatibles con el material asfálticos), el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje.
- Los resultados obtenidos de un proceso de modificación de asfalto dependen altamente de la concentración, peso molecular, composición química y orientación molecular del polímero, así como de la fuente de crudo, proceso de refinación y del grado del asfalto que se utiliza.

Tabla 2.5. 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	sP	3000
Viscosidad rotacional Brookfield, a 155°C sP 21, máx.		sP	2000
Viscosidad rotacional Brookfield, a 177 °C, sP 21, máx.		sP	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).

2.8 Diseño de mezclas asfálticas

La mezcla asfáltica es el material de construcción de capas de pavimento flexible más utilizado en el mundo. Una mezcla asfáltica es el conjunto de agregados recubiertos por

una película de material asfáltico, la cual es utilizada principalmente como capa de rodadura para pavimentos flexibles. En este sentido, las mezclas asfálticas deben aportar ciertas características mecánicas y funcionales que contribuyan al desempeño de la estructura del pavimento. Las principales ventajas de utilizar las mezclas asfálticas son las siguientes:

- Son materiales durables y resistentes al envejecimiento y a la oxidación.
- Por su baja porosidad, son de alta resistencia y rigidez.
- Impermeabilizan superficialmente el pavimento.

En cuanto a las desventajas de utilizar estas mezclas, se pueden enunciar las siguientes:

- Por su baja porosidad, la textura superficial no es la mejor para obtener buena fricción neumático-pavimento.
- Ayudan a la generación de láminas de agua superficiales durante lluvia, incrementando la probabilidad del fenómeno de hidroplaneo y aumentando el grado de accidentalidad en las vías.
- Dificultad de fabricación y construcción, al ser extendidas y compactadas a elevadas temperaturas, impactando negativamente el medio ambiente por las emisiones generadas.

Se elaboran normalmente en plantas mezcladoras, pero en algunos casos pueden fabricarse in situ.

Los diversos tipos de mezclas asfálticas están conformados por agregados pétreos con granulometría y requisitos mínimos de calidad diferentes. Asimismo, presentan diferentes diferencias en cuanto a su función dentro de la estructura de pavimento y al tipo de material asfáltico o ligante que utiliza.

El diseño de mezcla adecuado, es generalmente el más económico y que cumple satisfactoriamente los criterios mencionados anteriormente.

Se han desarrollado algunos métodos de proporcionamiento de asfalto y agregado para una mezcla asfáltica en caliente. Siendo los más conocidos los siguientes: Marshall, Hveem, Hubbard-Field y Triaxial de Smith.

En esta investigación se utilizará el método Marshall siendo un diseño de mezcla adecuado generalmente el más económico y que cumple satisfactoriamente los criterios mencionados anteriormente.

2.8.1 Método de diseño Marshall

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall en los años 40, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El ensayo Marshall es el más utilizado para determinar el contenido de asfalto óptimo para una combinación específica de agregados. Las mezclas asfálticas con elevados contenidos de asfalto pueden tener tendencias a la ocurrencia de deformaciones permanentes excesivas o ahuellamiento. En sentido contrario, las mezclas asfálticas con bajos contenidos de asfalto pueden tener tendencia a la ocurrencia de fisuras o agrietamiento por fatiga (Bernucci et al., 2008), así como disminución de la resistencia al daño por humedad y al envejecimiento. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción de pavimentos. El método Marshall sólo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación que utilizan cemento asfáltico clasificado con viscosidad o penetración, y que contienen agregados con tamaños máximos de 25.0 mm. O menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas (en caliente) de penetración.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½”) y 102 mm (4”) de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado (ASTM D1559).

Los dos aspectos o datos principales e importantes del diseño de mezclas del método Marshall son:

- Análisis de la relación vacíos-densidad.
- Prueba de estabilidad-flujo de las muestras compactadas.

Para el diseño de la mezcla asfáltica por medio del método Marshall son utilizadas las siguientes etapas:

- Determinación del tipo de mezcla asfáltica.
- Granulometría de la mezcla asfáltica.
- Caracterización de los agregados para la mezcla asfáltica.
- Caracterización física del asfalto.
- Determinación de las temperaturas de trabajo.
- Selección de contenidos probables de asfalto.
- Separación de las fracciones para la elaboración de las briquetas Marshall.
- Fabricación de las briquetas Marshall.
- Determinación de los parámetros volumétricos.
- Determinación de los parámetros de resistencia mecánica.
- Selección del contenido óptimo de cemento asfáltico.

2.8.2 Determinaciones previas

- Determine la densidad real seca de cada árido que participa en la mezcla y la del filler.
- Determine la densidad del cemento asfáltico a 25 ° C.
- Determine la densidad máxima de la mezcla suelta, para un contenido de asfalto próximo al óptimo previsto.
- Determine las densidades de las probetas compactadas.
- Mida la Estabilidad y la Fluencia de las mezclas usando el equipo Marshall.

2.8.3 Comportamiento de las mezclas asfálticas

Una muestra de mezcla de pavimento preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla (ver figura 10), y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla.
- Vacíos de aire.

- Vacíos en el agregado mineral.
- Estabilidad.
- Contenido de asfalto.

2.8.3.1 Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado, para obtener un rendimiento duradero.

En las pruebas y el análisis de diseño de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (Lb/ft^3).

La densidad se calcula al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000Kg/m^3 o 62.416Lb/ft^3). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no adecuado. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que muy rara vez la compactación in-situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación del laboratorio.

2.8.3.2 Vacíos de aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestra de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico. La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menos va a ser la permeabilidad de la mezcla.

Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor posible (en la realidad) de vacíos; preferiblemente menos del 8 por ciento.

2.8.3.3 Vacíos en el agregado mineral

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

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

Figura 2.7. Representación de volumen en una briqueta de mezcla asfáltica.



Fuente: Manual del asfalto, 1986.

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

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

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

2.8.3.4 Estabilidad

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

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

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

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

2.8.3.5 Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlar con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios dictados por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción.

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

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral. Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber literalmente gran parte del contenido de asfalto resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario; poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda).

Cualquier variación en el contenido de relleno mineral, causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado relleno mineral cualquier ajuste arbitrario para corregir la situación, probablemente la empeora. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un

muestreo en unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y si es necesario establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado utilizado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se pueda cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto.

Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido; contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado, es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados.

El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

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

2.9 Marco conceptual

2.9.1 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico se designa por las letras CA o AC (Asphalt Cement en un país anglosajón). Y se clasifican por lo general de acuerdo con su consistencia evaluada a través de dos ensayos: penetración y viscosidad. Es un material de propiedades aglutinantes e impermeabilizantes, tiene características de flexibilidad, consistencia, adhesividad y durabilidad, y que es susceptible a cambios de temperatura.

2.9.2 Mezcla asfáltica

Es una mezcla en caliente, de alta calidad y perfectamente controlada, de cemento asfáltico y agregados de buena calidad graduados, que se debe compactar perfectamente para formar una masa densa y uniforme, tipificada por las mezclas Tipo IV del instituto del Asfalto.

2.9.3 Agregado fino

Se denomina agregado fino a la porción comprendida entre los tamices de 4,75 mm (Nº 4) y 75 μ m (Nº 200). El agregado fino deberá proceder de trituración de piedra de cantera, natural o de fuentes naturales de arena.

2.9.4 Agregado grueso

Se denomina agregado grueso a la porción del agregado retenido en el tamiz 4,75 mm (Nº 4).

2.9.5 Los polímeros

Los polímeros son sustancias macromoleculares naturales o sintéticas, obtenidas a partir de moléculas más sencillas por reacciones poliméricas, de allí su denominación de polímeros. Por lo tanto, un polímero es un compuesto con un elevado peso molecular, cuya estructura se representa por la repetición de pequeñas unidades.

2.9.6 Polímeros termoplásticos

Son solubles que se reblandecen con el calor y dependiendo de su intensidad pueden llegar a fluir. Una vez enfriados, es posible moldearlos repetidamente sin que se pierdan sus propiedades. Por lo general, son polímeros lineales o ligeramente ramificados. Los termoplásticos más comunes son el polietileno, el polipropileno, copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA), las poliamidas, entre otros.

2.9.7 E.V.A. (Etileno-Acetato de Vinilo)

Los copolímeros de Etileno copolimerizan al Etileno con otros monómeros (Acetato de Vinilo) para destruir su regularidad estructural y reducir su grado de cristalinidad.

2.9.8 Propiedades de la mezcla asfáltica Marshall

2.9.8.1 Densidad

La densidad de la mezcla asfáltica es el peso unitario de un volumen específico de la mezcla. Se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3). La densidad se logra mediante la compactación de la mezcla de asfalto y agregados colocada por la pavimentadora. La compresión de los agregados aumenta su contacto de superficie a superficie y la fricción entre partículas, lo que da como resultado una mayor estabilidad y resistencia del pavimento.

2.9.8.2 Estabilidad

Está relacionada con la capacidad del asfalto para soportar deformaciones bajo cargas de tránsito y resistir el desplazamiento horizontal, depende de la fricción y cohesión interna. La fricción se relaciona con la geometría y textura de la partícula; la cohesión se relaciona con las características del ligantes.

2.9.8.3 Fluencia

Es la deformación total expresada en mm que experimenta a probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta que momento de producirse la falla.

2.9.8.4 Vacíos de la mezcla

Los vacíos de la mezcla, son los espacios de aire en la mezcla asfáltica compactada. Es importante tener suficientes vacíos de aire. Así, la mezcla puede compactarse más y mantenerse estable.

2.9.8.5 Vacíos del agregado mineral (V.A.M.)

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) son el espacio entre las partículas de agregado. Son clave para una buena película de asfalto. Esta película es esencial para la durabilidad de la mezcla.

2.9.8.6 Relación betún – vacíos (R.B.V.)

La relación betún vacíos (RBV), son la parte de los vacíos que el asfalto llena. Este parámetro asegura la cohesión y durabilidad de la mezcla asfáltica.

2.10 Marco normativo

Para poder realizar la investigación se desarrollará ensayos en el laboratorio, a continuación, se citarán las normas que se utilizarán en la caracterización de los materiales para las mezclas asfálticas:

Tabla 2.6. Ensayos de laboratorio para asfaltos.

Ensayo de laboratorio para asfaltos	Norma	Descripción de ensayos
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.
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.

Tabla 2.7. Ensayos de laboratorio para agregados grueso y fino.

Ensayo de laboratorio para agregados	Norma	Descripción de ensayos
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 Angeles	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 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.
Durabilidad por el método del sulfato para determinar la desintegración	AASHTO T104 ASTM C 88	El ensayo de resistencia a los sulfatos de una indicación de la resistencia de los áridos finos y gruesos a los agentes atmosféricos. El ensayo se realiza con áridos que no han dado buen resultado durante su empleo. Mide la resistencia de los áridos a la disgregación por soluciones saturadas de sulfatos de sodio o magnesio.
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.
Porcentaje de caras fracturadas	ASTM D 5821	. Este ensayo se realiza para determinar el porcentaje de peso de la muestra que se utilizó del agregado en diferentes caras fracturadas.
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	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 próctor) en la cual se grafican las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las coordenadas.

Fuente: The Asphalt Institute.

2.11 Punto de vista del investigador

Es importante tener un sustento y respaldo en base a teorías desarrollada por autores con conocimientos y experiencias en diseños de pavimentos y/o mezclas asfálticas, de esta manera se puede extender aún más la investigación y poder aplicarlas en nuestro medio. La teoría estudiada anteriormente aporta en gran parte en la evolución de esta investigación ya que en nuestro medio no se tiene mucho conocimiento acerca de asfaltos modificados con polímeros EVA, gracias a la misma el análisis de este proyecto, se enfocará en comparar técnicamente las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas convencional y modificadas con EVA, donde para poder obtener resultados satisfactorios se realizarán ensayos en laboratorio caracterizando los materiales que componen una mezcla asfáltica y por último el método Marshall, para saber la estabilidad y fluencia de ambas mezclas.

CAPÍTULO III

DETERMINACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO E.V.A.

3.1 Criterios del diseño metodológico

El diseño de la presente investigación es cuantitativo-experimental causal explicativo. Con respecto a esta investigación, Sampieri (2018) indica que la investigación experimental requiere la manipulación de una acción para analizar sus posibles resultados. En esta investigación, se realizará el diseño Marshall con el cemento asfáltico PEN 85-100 y con el cemento asfalto modificado con polímero Etileno Vinil Acetato, manteniendo las características del diseño de la mezcla asfáltica convencional.

3.2 Selección de los materiales

3.2.1 Criterios de selección del cemento asfáltico

El cemento asfáltico convencional (85/100) proveniente de Brasil de la industria BETUNEL, fue proporcionado por la alcaldía municipal de Tarija, mediante una solicitud dirigida al director de obras públicas municipales, siguiendo una serie de pasos para lograr la obtención del mismo. Latitud: 21°31'34.72"S; Longitud: 64°44'27.34"O.

Figura 3.1. Ubicación Planta de la Alcaldía (Posta Municipal Av. Guadalquivir).



Fuente: Google Earth.

Para la adquisición de goma EVA se compró este material de librería MAGIC ubicado en la calle España B/ El Tejar.

3.2.2 Criterios de selección de banco de materiales (agregados pétreos)

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales, los cuales nos proporciona una seguridad para el diseño que se realice. Para este proyecto se utilizará los agregados de la Chancadora Garzón cuyo material es procedente de San Mateo lo cual tiene una gran cantidad de áridos que cumple con las especificaciones mencionadas con anterioridad. La comunidad de San Mateo se encuentra a 5 Kilómetros de la ciudad de Tarija, esta comunidad se dedica mayormente a la agricultura y la chancadora Garzón se encuentra a la orilla del río. Latitud: $21^{\circ}28'14.77''S$; Longitud: $64^{\circ}45'2.49''O$.

Figura 3.2. Ubicación de chancadora Garzón (comunidad San Mateo).



Fuente: Google Earth.

3.3 Caracterización de los materiales

La caracterización de los materiales es una labor importante que deben cumplir el cemento asfáltico y los agregados pétreos con las especificaciones o parámetros establecidos en las distintas normas anteriormente mencionadas.

3.3.1 Caracterización de los agregados pétreos

Para la caracterización de los agregados pétreos se realizaron diversos ensayos en los cuales se demuestra la calidad que estos presentan, a continuación, se muestran los ensayos realizados:

3.3.1.1 Análisis granulométrico (AASHTO T27 - 11)

El ensayo de análisis granulométrico o granulometría permite definir el tamaño y la distribución de tamaños de las partículas de los agregados. El método para tamizar y determinar la granulometría, permite determinar cuantitativamente el tamaño de las partículas para las fracciones gruesa y fina, respectivamente, por medio del tamizado. Para tal fin, se selecciona una muestra representativa del material de acuerdo con los alineamientos de este método. Se procedió a realizar el análisis granulométrico tanto del material grueso como del fino de acuerdo a la norma AASHTO T-27.

Procedimiento:

Figura 3.3. Preparación de tamices



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4. Tamizado



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5. Determinación de la masa



Fuente: Elaboración propia.

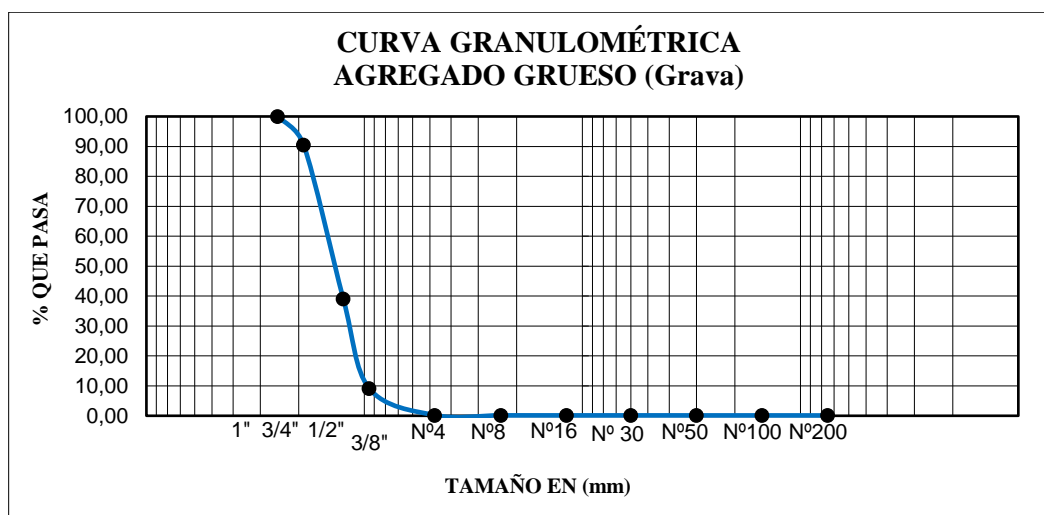
Resultados de la práctica:

Tabla 3.1. Granulometría del agregado grueso (grava)

Peso total de la muestra tomada(gr).		5000,00			
Tamices	tamaño (mm)	Muestra 1 % que pasa	Muestra 2 % que pasa	Muestra 3 % que pasa	Valor promedio
1"	25,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	90,46	90,91	90,21	90,53
1/2	12,50	37,58	40,09	39,66	39,11
3/8	9,50	7,45	10,18	9,83	9,15
Nº4	4,75	0,18	0,22	0,19	0,20
Nº8	2,36	0,14	0,14	0,13	0,13
Nº16	1,18	0,13	0,13	0,12	0,13
Nº30	0,60	0,13	0,13	0,12	0,12
Nº50	0,30	0,12	0,13	0,11	0,12
Nº100	0,150	0,12	0,12	0,11	0,11
Nº200	0,075	0,10	0,11	0,09	0,10
Base		0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1. Curva granulométrica del agregado grueso



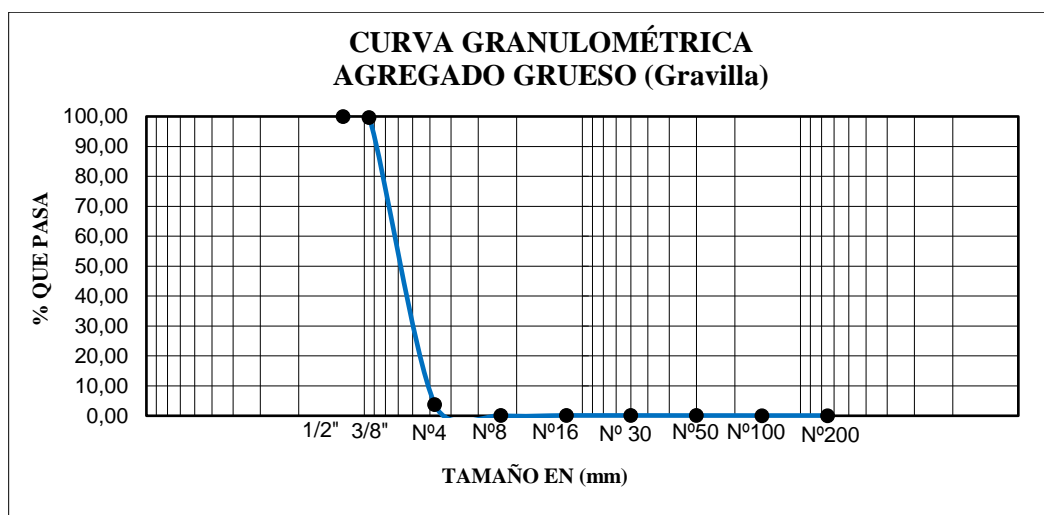
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2. Granulometría del agregado medio (gravilla)

Peso total de la muestra tomada(gr).			5000.00		
Tamices	tamaño (mm)	Muestra 1 % que pasa	Muestra 2 % que pasa	Muestra 3 % que pasa	Valor promedio
1"	25,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,50	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,50	99,69	99,63	99,65	99,66
N°4	4,75	4,07	3,43	3,76	3,75
N°8	2,36	0,12	0,13	0,17	0,14
N°16	1,18	0,10	0,12	0,14	0,12
N°30	0,60	0,08	0,10	0,12	0,10
N°50	0,30	0,07	0,10	0,11	0,09
N°100	0,150	0,06	0,09	0,10	0,08
N°200	0,075	0,06	0,09	0,10	0,08
Base		0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2. Curva granulométrica del agregado medio (gravilla)



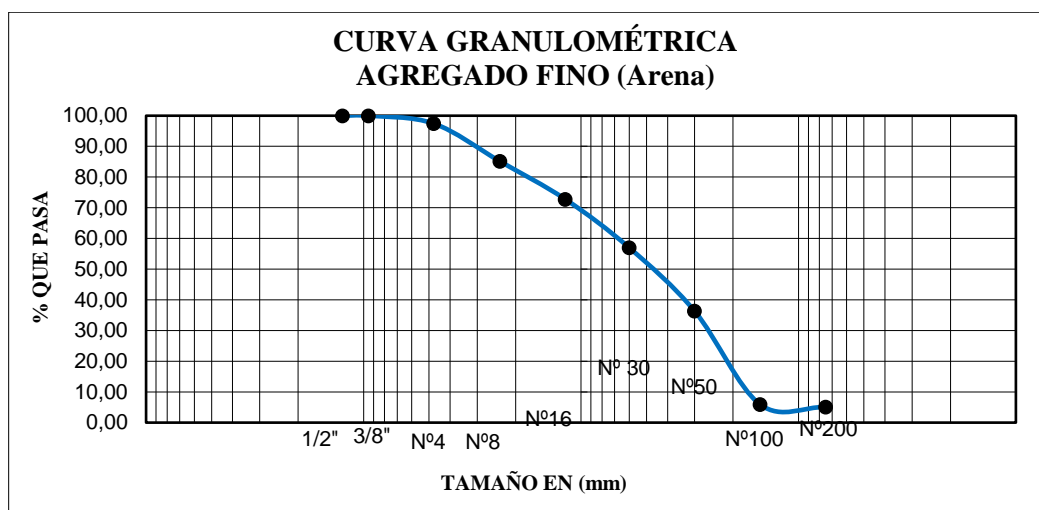
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3. Granulometría del agregado fino (arena)

Peso total de la muestra tomada(gr).			1000.00		
Tamices	tamaño (mm)	Muestra 1 % que pasa	Muestra 2 % que pasa	Muestra 3 % que pasa	Valor promedio
1"	25,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2	12,50	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8	9,50	100,00	100,00	100,00	100,00
N°4	4,75	97,29	97,64	97,36	97,43
N°8	2,36	84,62	85,71	85,08	85,14
N°16	1,18	71,93	73,68	72,70	72,77
N°30	0,60	56,76	57,29	56,91	56,99
N°50	0,30	36,18	36,37	36,37	36,31
N°100	0,150	5,91	5,91	5,91	5,91
N°200	0,075	5,11	4,96	5,13	5,07
Base		0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.3. Curva granulométrica del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2 Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (ASTM C-127; AASHTO T-85)

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

Para la determinación en el laboratorio del peso específico y de la absorción de la fracción del agregado grueso, se prepara una cantidad de muestra según el tamaño máximo nominal, en este caso se realizó el ensayo con tres muestras, cada una de 5 Kg tanto de grava como de gravilla. El procedimiento de ensayo consiste en sumergir la muestra en agua con el fin de llenar los poros permeables por un periodo de 24 ± 4 horas y se determina la masa sumergida en agua. Posteriormente, se seca la superficie de cada partícula de agregado y se reporta la masa en la condición saturada superficialmente seca. Finalmente, el material se seca al horno hasta masa constante y se determina la masa seca.

Procedimiento:

Lavar y sumergir la muestra en agua por un periodo de 24 horas.

Figura 3.6. Muestra sumergida en agua



Fuente: Elaboración propia

Peso del material al aire ambiente saturado superficialmente seco.

Figura 3.7. Material pesado al aire saturado superficialmente seco



Fuente: Elaboración propia

Peso de la muestra sumergido.

Figura 3.8. Peso del material pétreo sumergido



Fuente: Elaboración propia

Obtención del peso sumergido en agua.

Figura 3.9. Lectura del peso sumergido en agua



Fuente: Elaboración propia

Peso al aire ambiente luego de secado en horno

Figura 3.10. Muestra pesada luego de secado en horno



Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Grava de 3/4":

$$\text{Peso especif. a granel} = \frac{\text{Peso muestra seca}}{(\text{Peso muestra saturada pero con superf. seca} - \text{Peso muestra sat. dentro del agua})}$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{4938,10}{(5000,00 - 3096,00)}$$

Peso específico a granel = 2,59 gr/cm³.

$$\text{P. E. en condición saturado y superf. seca} = \frac{\text{Peso muestra saturada de superf. seca}}{(\text{Peso muestra saturada de superf. seca} - \text{Peso muestra sat. dentro del agua})}$$

$$\text{P. E. en condición saturado y superf. seca} = \frac{5000,00}{(5000,00 - 3096,00)}$$

Peso específico en condición saturado y superf. seca = 2,63 gr/cm³.

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{\text{Peso material seco}}{(\text{Peso material seco} - \text{Peso muestra sat. dentro del agua})}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{4938,10}{(4938,10 - 3096,00)}$$

Peso específico aparente = 2,68 gr/cm³.

$$\% \text{ de absorción} = \frac{\text{Peso muestra sat. sup. seca} - \text{Peso muestra seca}}{(\text{Peso muestra seca})} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{(5000,00 - 4938,10)}{4938,10} * 100$$

% de absorción = 1,25%

Resultados de la práctica:

Los resultados son el promedio de tres ensayos realizados:

Tabla 3.4. Resultados del peso específico (grava)

Muestra N°	Peso muestra Secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. SECA "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	4938,10	5000,00	3096,00	2,59	2,63	2,68	1,25
2	4933,00	5000,00	3090,00	2,58	2,62	2,68	1,36
3	4936,20	5000,00	3093,00	2,59	2,62	2,68	1,29
Promedio				2,59	2,62	2,68	1,30

Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a realizar el mismo procedimiento para la gravilla:

Tabla 3.5. Resultados del peso específico (gravilla)

Muestra N°	Peso muestra Secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. SECA "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	4943,70	5000,00	2992,00	2,46	2,49	2,53	1,14
2	4930,40	5000,00	2987,00	2,45	2,48	2,54	1,41
3	4937,60	5000,00	2989,00	2,46	2,49	2,53	1,26
Promedio				2,46	2,49	2,53	1,27

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3 Peso específico y absorción de agua en agregados finos (ASTM C-128; AASHTO T-84)

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

Es aplicable a los áridos finos, que se emplean en la elaboración de obras asfálticas.

El ensayo consiste en poner aproximadamente 500 gramos de material en un picnómetro de 500 ml previamente calibrado, con el fin de determinar el volumen real de la muestra. El cálculo de la densidad relativa de las partículas es realizado por medio de la diferencia de lecturas de masas del picnómetro: vacío, lleno con agua, con la cantidad de muestra de agregado fino y con muestra de agregado fino y agua.

Procedimiento:

Eliminar el exceso de agua, evitando la pérdida de finos.

Figura 3.11. Eliminación del exceso de agua en la muestra.



Fuente: Elaboración propia

Colocar el molde cónico en una superficie plana, llenar el árido en condición suelta y enrazar

Figura 3.12. Muestra colocada en molde cónico.



Fuente: Elaboración propia

Compactar suavemente con 25 golpes de pisón uniformemente sobre la superficie, en cada golpe dejar caer el pisón a una altura de 5 mm.

Figura 3.13. Muestra compactada con 25 golpes de pisón sobre la superficie



Fuente: Elaboración propia

Levantar el molde verticalmente. Si hay humedad libre la muestra conservará la forma del cono, en este caso eliminar el exceso de agua

Figura 3.14. Muestra con exceso de humedad



Fuente: Elaboración propia

Cuando, al retirar el molde, el árido caiga suavemente según su talud natural, será indicación que éste ha alcanzado la condición saturada superficialmente seca

Figura 3.15. Árido alcanzando la condición saturada superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia

Colocar la muestra en el matraz y cubrirla con agua a una temperatura de 20 °C, hasta alcanzar aprox. 2/3 del volumen del matraz.

Figura 3.16. Muestra colocada en el matraz con agua a 20 °C



Fuente: Elaboración propia

Dejar reposar durante 1 hr. manteniendo una temperatura de 20 °C. Luego llenar con agua hasta la marca de calibración, agitar y dejar reposar un instante.

Figura 3.17. Muestra de ensayo reposando durante 1 hora.



Fuente: Elaboración propia

Medir y registrar la masa total del matraz con la muestra y agua, sacar la muestra del matraz y secar en el horno. Luego registrar la masa de la muestra de ensayo en condición seca.

Figura 3.18. Medición de la masa total del matraz con la muestra y agua.



Fuente: Elaboración propia

Como último paso llenar el matraz de agua a una temperatura de 20 °C hasta la marca de calibración. Medir y registrar la masa del matraz con agua.

Cálculos:

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{\text{Peso muestra seca}}{[(\text{Peso muestr. sat. sup. seca} + \text{Peso agua}) - \text{Peso muestra} + \text{agua}]}$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{493,70}{(500 - 303,4)}$$

$$\text{Peso específico a granel} = 2,51 \text{ gr/cm}^3.$$

$$\text{P. E. en condición saturado y superf. seca} = \frac{\text{Peso muestra saturada de superf. seca}}{[(\text{Peso muestr. sat. sup. seca} + \text{Peso agua}) - \text{Peso muestra} + \text{agua}]}$$

$$\text{P. E. en condición saturado y superf. seca} = \frac{500}{(500 - 303,4)}$$

$$\text{Peso específico en condición saturado y superf. seca} = 2,54 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{\text{Peso muestra seca}}{[(\text{Peso muestra seca} + \text{Peso agua}) - \text{Peso muestra} + \text{agua}]}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{493,70}{((500 - 303,4) - (500 - 493,70))}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,59 \text{ gr/cm}^3.$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{\text{Peso muestra sat. sup. seca} - \text{Peso muestra seca}}{\text{Peso muestra seca}} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{(500 - 493,70)}{493,70} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = 1,28 \%$$

Resultados de la práctica:

Los resultados son el promedio de tres ensayos realizados:

Tabla 3.6. Resultados del peso específico (arena)

Peso Muestra (gr)	Peso De matríz (gr)	Muestra + Matraz + Agua (gr)	Peso del agua Agregado al Matr��z "W" (ml) �� (gr)	Peso muestra Secada "A" (gr)	Volumen del Matr��z "V" (ml)	P. E. A granel (gr/cm ³)	P. E. Saturado con Sup. Seca (gr/cm ³)	P. E. Aparente (gr/cm ³)	% de absorción
500	193,5	996,9	303,4	493,70	500,00	2,51	2,54	2,59	1,28
500	196,0	982,9	286,9	489,30	500,00	2,30	2,35	2,42	2,19
500	177,7	986,8	309,1	492,10	500,00	2,58	2,62	2,69	1,61
Promedio						2,46	2,50	2,57	1,69

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4 Equivalente de arena (ASTM D 2419; AASHTO T176)

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

Ensayo utilizado para evaluar el contenido de partículas de tamaño de arcilla adheridas a una muestra de agregado pétreo fina (arena y limos). El agregado debe ser un material limpio, libre de sustancias o finos nocivos tales como: vegetación, arcillas, impurezas, entre otros. El procedimiento de ensayo consiste en poner una fracción de agregado de arena en una probeta con una cantidad de solución floculante inicial. La cantidad de muestra inicial se determina por relación volumétrica, es decir, por medio de un recipiente de volumen conocido.

Luego de poner el material en la probeta, se debe realizar el proceso de agitación (manual o mecánico) de la muestra con la solución, a fin de facilitar la separación de las partículas (arena-arcilla). Posteriormente se completa el volumen de solución por medio de un tubo irrigador y se genera la suspensión de las partículas de material nocivo o arcilloso sobre la arena. Luego de un periodo de sedimentación de 20 minutos, se determina la altura de material nocivo o arcilloso y de la arena.

Probeta en reposo por un periodo de 10 minutos luego de haber colocado la solución hasta la medida indicada y el material de ensayo.

Figura 3.19. Probeta en reposo por un periodo de 10 minutos



Fuente: Elaboración propia

Una vez transcurrido los 10 minutos, y luego haber agitado el cilindro con la muestra, se completa con la solución hasta la siguiente marca y dejar reposar por 20 min. Una vez transcurrido los 20 minutos, obtener y registrar datos.

Figura 3.20. Lectura y registro de datos



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el equivalente de arena se presenta como la relación porcentual entre la altura de la arena y la altura de arcilla, por medio de la siguiente ecuación:

$$EA(\%) = \left(\frac{N_a}{N_t} \right) * 100$$

Donde:

EA= Equivalente de arena (%).

N_a= Nivel superior de la arena (mm).

N_t= Nivel superior de arcilla (mm).

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{10}{11} * 100$$

$$\text{Equivalente de arena} = 90,91$$

Resultados de la práctica:

Resultados para tres ensayos realizados:

Tabla 3.7. Resultados del equivalente de arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	10	11,00	90,91
2	10,1	13,00	77,69
3	10,3	13,00	79,23
		Promedio	82,61

Equivalente de Arena (%)	Norma
82,61	> 50%

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.5 Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM C 131; AASHTO T-96)

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

Para fines de pavimentación, los agregados deben resistir la quiebra, la degradación y la desintegración, causadas por la acción del tránsito de vehículos y la manipulación durante el proceso constructivo de la capa asfáltica.

Tabla 3.8. Requisitos para el desgaste por la máquina de Los Ángeles.

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±25	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±25	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	Nº4			2500±10	
Nº4	Nº8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Números de esferas		12	11	8	6
Nº de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		30	15	15	15

Fuente: Norma ASTM C-131.

Procedimiento:

Tamizar la muestra obtenida, dejar el material separado en las fracciones resultantes de este tamizado.

Una vez elegida de la tabla el grado de ensayo, pesar los tamaños de las fracciones correspondientes al mismo, registrar la masa total del material a ensayar como masa inicial de la muestra.

Colocar la masa inicial de material en la máquina de Los Ángeles y ensayo de acuerdo con el grado elegido.

Figura 3.21. Material colocado en la máquina de Los Ángeles.



Fuente: Elaboración propia

Una vez completado el número de revoluciones correspondiente, sacar el material de la máquina evitando pérdidas y contaminaciones.

Separar la carga abrasiva (esferas) y colocar el material en un recipiente evitando perdidas.

Figura 3.22. Material sacado de la máquina evitando pérdidas y contaminaciones.



Fuente: Elaboración propia

Efectuar el primer tamizado en un tamiz de 2.36 mm o superior, con la finalidad de evitar dañar el tamiz de corte (1.7 mm).

Tamizar manualmente el material bajo 2.36 mm por 1.7 mm (N°12). Luego reunir todo el material retenido en ambos tamices, lavar secar en horno durante 24 hrs. Pesar y registrar la masa del material retenido como masa final de la muestra.

Resultados obtenidos del desgaste de los agregados mediante la máquina de Los Ángeles:

Se calcula el desgaste de áridos como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra, aproximando a un decimal, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P(\%) = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100$$

Donde:

P= Pérdida de masa de la muestra (%).

m_i = Masa inicial de la muestra (g).

m_f = Masa final de la muestra (g).

Para grava:

Tabla 3.9. Resultados Desgaste de los Ángeles (Grava)

Datos de laboratorio		
Gradación B		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
1½ "	1 "	-
1"	¾"	0
¾"	½"	2502,7
½"	⅜"	2500,3

Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
B	5003	3791,9	24,21	35% MAX

Fuente: Elaboración propia.

$$P(\%) = \frac{(5003 - 3791,9)}{5003} * 100$$

$$P(\%) = 24,21 \%$$

Para gravilla:

Tabla 3.10. Resultados Desgaste de los Ángeles (Gravilla)

Datos de laboratorio		
Gradación C		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
¾"	¼"	2500
¼"	Nº4	2500

Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
C	5000	3946,4	21,07	35% MAX

Fuente: Elaboración propia.

$$P(\%) = \frac{(5000 - 3946,4)}{5000} * 100$$

$$P(\%) = 21,07 \%$$

3.3.2 Caracterización del cemento asfáltico

A continuación, se describen los ensayos de laboratorio que se realizan para la determinación de los requisitos necesarios para el control de calidad de los cementos asfálticos, estos están descritos en el Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos volumen 4° de nuestro país elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

3.3.2.1 Ensayo de penetración (ASTM D5; AASHTO T49)

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

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

Este método define la penetración como la distancia en décimas de milímetros que una aguja penetra verticalmente en una muestra de cemento asfáltico sobre condiciones estandarizadas de carga, temperatura y tiempo.

El resultado es determinado por el promedio de tres lecturas como mínimo de una aguja de masa estándar (100g), al penetrar en un volumen comprendido entre 50 y 60 ml de cemento asfáltico durante un tiempo de cinco segundos a temperatura de 25 °C.

Procedimiento:

Figura 3.23. Muestras de ensayo antes de ser colocadas al penetrómetro



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

Tabla 3.11. Resultados del ensayo de penetración del cemento asfáltico

Cemento asfáltico convencional								
Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25 °C, 100g, 5seg.(0.1 mm) AASHTO T-49	Muestra 1	mm	95	97	90			
	Muestra 2		91	90	87			
	Muestra 3		90	88	85			
	Promedio		92	91,7	87,3	90,3	85	100

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2 Ensayo de ductilidad (ASTM D 113; AASHTO T51)

La ductilidad de un material bituminosos es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensaye se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5$ °C y a una velocidad de 5 cm/min ± 5 %. Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad.

Mezclas con cementos asfálticos de alta ductilidad pueden presentar mejor adherencia y mayor capacidad de soporte de las cargas ante la ruptura y el comportamiento dúctil. Contrario a lo anterior, las mezclas con cementos asfálticos de baja ductilidad, (tendencia a ser frágiles, pueden presentar problemas de micro-fisuración y rompimiento prematuro, originando diversas patologías estructurales y funcionales en el pavimento como lo son los agrietamientos a bajas temperaturas de servicio) (Bastidas Martinez & Rondón Quintana, 2020).

Procedimiento:

Armar el molde sobre una placa base, cubrir cuidadosamente la superficie de la placa y las superficies interiores de los lados a y a' del molde.

Colocar con una película delgada un desmoldante para prevenir que el material para ensayar se adhiera.

La placa sobre la cual se coloca el molde debe estar perfectamente plana y a nivel, de modo que la superficie interior del molde esté completamente en contacto.

Calentar la muestra con cuidado, hasta que esté suficientemente fluida para verter.

Verter el material dentro del molde, cuidando de no tocar ni desarreglar el molde, de modo que no se distorsione la briqueta.

Figura 3.24. Colocado del cemento asfáltico dentro del molde.



Fuente: Elaboración propia

Dejar enfriar a temperatura ambiente por un periodo de 30 a 40 min.

Figura 3.25. Material enfriando a temperatura ambiente.



Fuente: Elaboración propia

Una vez colocado durante cierto periodo de tiempo en baño de agua, enganchar los anillos de cada extremo de los clips a las clavijas del ductilímetro y separarlos a la velocidad uniforme especificada hasta la ruptura de la briqueta.

Placas enganchadas en los anillos de cada extremo de los clips a las clavijas del ductilímetro y separadas a la velocidad uniforme.

Medir la distancia en cm. entre los clips traccionados en el momento de producirse la ruptura.

Figura 3.26. Momento del ensayo



Fuente: Elaboración propia

Durante el desarrollo del ensayo, el agua en el estanque del ductilímetro debe cubrir la briqueta a lo menos 2,5 cm y ésta se debe mantener continuamente a la temperatura especificada.

Resultados de la práctica:

Tabla 3.12. Datos y resultados del ensayo de ductilidad.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25 °C AASHTO T-51	cm	98	102	101	100,33	100	-

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.3 Punto de inflamación y combustión 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 del petróleo y otros líquidos, excepto aceites combustibles y materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de 79 °C determinado por medio de este método de ensaye.

En el cemento asfáltico, el punto de inflamación es definido como la mínima temperatura a la cual la aplicación de una fuente de ignición hace que los vapores de la muestra de cemento asfáltico desprendan una llamarada repentina bajo condiciones normalizadas. Por otra parte, el punto de combustión se entiende como la máxima temperatura a la cual la aplicación de una fuente de ignición provoca que los vapores de la muestra de cemento asfáltico ardan con una llama sostenida durante cinco segundos bajo condiciones normalizadas.

La importancia del ensayo radica en obtener una temperatura de referencia con el fin de tener los cuidados necesarios (seguridad) en la manipulación del cemento asfáltico durante su transporte y operación en la planta de asfaltos. Entre mayor sea el punto de inflamación, menor es la probabilidad de experimentar problemas de combustión e inflamación durante los procesos de almacenamiento del cemento asfáltico y de fabricación de las mezclas en las plantas asfálticas.

Procedimiento:

Llenar la copa a temperatura conveniente, no excediendo 100 °C por encima de lo esperado para el Punto de Ablandamiento.

Aplicar calor inicialmente de modo que la temperatura de la muestra suba a una velocidad entre 14 y 17 °C por minute.

Comenzando, al menos 28 °C por debajo del Punto de Inflamación, aplicar la llama de prueba cada 2 °C sucesivos leídos en el termómetro.

Informe el Punto de Inflamación como la temperatura leída en el termómetro, cuando aparece el destello en cualquier punto de la superficie del material.

Figura 3.27. Durante el ensayo de punto de inflamación.



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

Tabla 3.13. Datos y resultados del ensayo de Punto de Inflamación.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	240	239	241	240	>232	-

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.4 Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36; AASHTO T53-96)

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

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, pero bien definido, de manera de comparar resultados.

El punto de ablandamiento es la menor temperatura a la que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra se calienta mediante incrementos a una velocidad prescrita, en un baño de agua o de glicerina.

Calentar con cuidado la muestra, hasta que esté suficientemente fluida para verterla.

Verter la muestra caliente dentro de los dos anillos, precalentados aproximadamente a la temperatura de vertido.

Figura 3.28. Vertido de la muestra caliente dentro de los dos anillos.



Fuente: Elaboración propia

Enfriar durante 30 min, después de enfriado, cortar el exceso de material con una espátula ligeramente caliente.

Ensamblar el aparato con los anillos, el termómetro y la guía para centrar las bolas en posición y llenar el baño con agua destilada, a 5 °C, mantener la temperatura del baño a 5 °C durante 15 min colocando el recipiente en agua fría. Y colocar una bola en cada una de las guías de centrado de las bolas.

Aplicar calor de tal manera que la temperatura del líquido aumente con una velocidad uniforme de 5 °C por min.

La velocidad de aumento de temperatura deberá ser uniforme y no se promediará durante el periodo del ensaye.

Anotar para cada anillo y bola la temperatura indicada por el termómetro; en el instante que la muestra que rodea la bola, toque la placa inferior.

Figura 3.29. Muestra después del ensayo



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

Tabla 3.14. Datos y resultados del ensayo de Punto de ablandamiento.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento AASHTO T53-96	°C	45	46	44	45	43	53

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.5 Método para determinar la densidad (ASTM D71-94; AASHTO T229-97)

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

La densidad del cemento asfáltico es considerada como la relación entre la masa y el volumen, mientras que la densidad relativa o gravedad específica es considerada como la relación entre la masa de un volumen de cemento asfáltico y la masa de un volumen de agua igual, determinadas a una misma temperatura. La densidad relativa del cemento asfáltico se determina según este método, por medio de un juego de lecturas del picnómetro previamente calibrado. Para tal fin, es necesaria la masa del picnómetro vacío,

con muestra de cemento asfáltico con y sin agua, y finalmente lleno con agua. El picnómetro utilizado debe tener una capacidad entre 24 y 30 ml y una masa total inferior a 40 ml. El valor obtenido de densidad relativa -gravedad específica- del cemento asfáltico, es necesario para la determinación de parámetros volumétricos y para el diseño de la mezcla asfáltica. El cálculo de la densidad relativa del cemento asfáltico es determinado con la siguiente ecuación:

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

Donde:

A= Peso del picnómetro.

B= Peso del picnómetro + agua.

C= Peso del picnómetro + asfalto.

D= Peso del picnómetro + asfalto + agua.

ρ_w = Peso específico del agua a la temperatura de ensayo (0,9970770)

ρ_b = Peso específico del asfalto.

$$\text{Peso esp. del C. A.} = \frac{64,9\text{gr} - 35,3\text{gr}}{(86,3 - 35,3) - (87,4 - 64,9)} * 0,9970770$$

$$\text{Peso esp. del C. A.} = 1,03556 \text{ gr/cm}^3$$

Resultados de la práctica:

Tabla 3.15. Datos y resultados de la densidad.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	35,3	34,2	33,5			
Peso Picnómetro + Agua (25 °C)	gr	86,3	86,9	83,9			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	64,9	67,1	64,0			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	87,4	89,0	84,4			
Peso Específico	gr/cm ³	1,035	1,031	1,013	1,026	1.00	1,05

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.6 Ensayo de viscosidad Saybolt – furol (ASTM D 88 – AASHTO T72)

Este ensayo se emplea normalmente para cementos asfálticos, emulsiones y aceites, sirve para determinar el tiempo en segundos, necesarios para que pasen 60 centímetros cúbicos de líquido, a una temperatura determinada a través de un tubo de dimensiones específicas.

En esta investigación al tratarse de un cemento asfáltico se determinará a una temperatura de 135 °C.

Equipo:

- Viscosímetro Saybolt
- Frasco calibrado para recibir la muestra de 60 cm³
- Termómetros
- Cronómetro A ± 1 s
- Pipeta de 2 mm de diámetro interior

Procedimiento:

Se comienza el ensayo limpiando perfectamente el recipiente con un disolvente eficaz, por ejemplo, gasolina, teniendo cuidado de que no quede disolvente en el interior del cilindro.

Se hace pasar la muestra a través de un tamiz N° 100 antes de echarla en el recipiente. Se echa en el recipiente ya limpio una cantidad de muestra que sea suficiente para mojar completamente su superficie dejando que fluya el exceso.

Se coloca el tapón en la parte inferior del tubo de salida, de manera que quede introducido más de 6,3 mm y menos de 9,5 mm. El tapón debe entrar suave, pero haciendo un cierre hermético para evitar que se escape el aire de la parte inferior del recipiente.

Si la temperatura a la que se va a realizar el ensayo es superior a la del ambiente, se calentará la muestra a una temperatura de 1 o 2 grados por encima de la del ensayo y, si es inferior se enfriará la muestra a 1 o 2 grados por debajo de la temperatura a la que se va a ensayar. En ningún caso se calentará la muestra a una temperatura superior a 27,8 °C por debajo de su punto de inflamación.

Se vierte la muestra en el tubo hasta que deja de rebosar dentro del cilindro de rebose tras lo cual se mantendrá bien revuelta por medio del termómetro. La temperatura del baño se debe graduar hasta que la temperatura de la muestra dentro del tubo sea constante.

Después que la temperatura de la muestra ha permanecido constante con un error de $\pm 0,05$ °C durante un minuto con agitación constante se saca el termómetro se limpia el exceso de muestra del cilindro de rebose por medio de la pipeta, pero teniendo cuidado de no golpear el rebosado. En caso de que este sea golpeado, se deberá recoger el ensayo.

La punta de la pipeta deberá mantenerse en un punto fijo dentro del cilindro de rebose y en ningún caso se removerá el exceso de muestra rotando la pipeta alrededor de aquel.

Se coloca el frasco calibrado de 60 cm^3 en una posición tal que quede centrado con respecto al orificio de salida y que el material al fluir no toque las paredes del frasco. La graduación quedará situada a una distancia comprendida entre 10 y 13 cm respecto del fondo del baño.

El ensayo se empieza sacando rápidamente el tapón del corcho del tubo, poniendo en marcha al mismo tiempo el cronómetro, se para el cronómetro cuando la parte inferior del menisco alcanza la graduación del cuello del frasco calibrado.

Resultado:

El tiempo transcurrido entre el instante en el que se sacó el corcho y el instante en que el menisco de la muestra alcanza la marca de calibración en segundos es de 176,5 sSF en promedio a la temperatura de 135°C.

Datos:

Tabla 3.16. Datos para determinar la viscosidad

Muestra 1 (izq.)		Muestra 2 (der.)	
Tiempo (minutos)	Tiempo (sSF)	Tiempo (minutos)	Tiempo (sSF)
2':57":79	177	2':56":33	176
Viscosidad promedio = 176,5 sSF			

Fuente: Elaboración propia

3.4 Diseño granulométrico del material pétreo en la mezcla

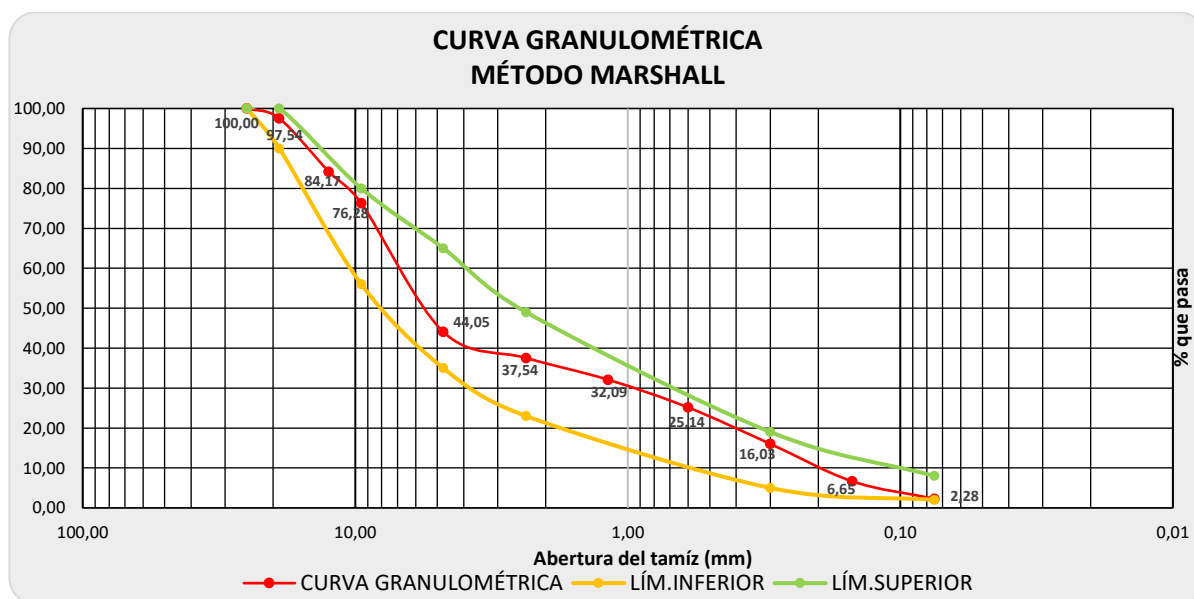
Se realiza las dosificaciones con los porcentajes de cada agregado de manera que se pueda cumplir con las especificaciones los agregados son de la chancadora “ÁRIDOS GARZÓN”, ubicada en la comunidad de San Mateo lo que se determinó la curva granulométrica de la mezcla asfáltica convencional y modificada con polímero EVA, lo cual se desarrolló en el laboratorio de hormigón de la U.A.J.M.S., se estableció que la mezcla de los agregados estará compuesto por el 26 % de agregado grueso de 3/4", 30 % de grava de 3/8", y 44 % de agregado fino para la granulometría de la mezcla.

Tabla 3.17. Dosificación de materiales pétreos

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación			Curva de dosificación				Especificaciones	
		Grava (%) 26,00	Gravilla (%) 30,00	Arena (%) 44,00	Peso Ret. 100	Ret. Acum.	% Ret	% que pasa del total	ASTM D 3515	
									Mínimo	Máximo
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,00	123,17	0,00	0,00	123,17	123,17	2,46	97,54	90	100
1/2"	12,50	668,37	0,00	0,00	668,37	791,54	15,83	84,17	-	-
3/8"	9,50	389,45	5,15	0,00	394,60	1186,14	23,72	76,28	56	80
Nº4	4,75	116,47	1438,56	56,54	1611,57	2797,71	55,95	44,05	35	65
Nº8	2,36	0,79	54,19	270,45	325,42	3123,14	62,46	37,54	23	49
Nº16	1,18	0,09	0,33	272,07	272,49	3395,63	67,91	32,09	-	-
Nº30	0,60	0,05	0,22	347,23	347,50	3743,12	74,86	25,14	-	-
Nº50	0,30	0,06	0,18	454,96	455,20	4198,32	83,97	16,03	5	19
Nº100	0,15	0,06	0,11	469,19	469,36	4667,69	93,35	6,65	-	-
Nº200	0,08	0,18	0,03	218,09	218,30	4885,99	97,72	2,28	2	8
BASE	-	1,31	1,23	111,47	114,01	5000,00	100,00	0,00	-	-
Peso total		1300,00	1500,00	2200,00	5000,00					

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.4. Curva granulométrica



Fuente: Elaboración propia

3.5 Dosificación de mezclas asfálticas

Para dosificar la mezcla asfáltica, primero se procedió a determinar el contenido mínimo de cemento asfáltico

3.5.1 Contenido mínimo de cemento asfáltico

Se aplica la siguiente fórmula:

$$P = 0,035 * a + 0,045 * b + K * c + F$$

P = Contenido aproximado de asfalto de la mezcla, porcentaje en peso de la mezcla.

a = Porcentaje de agregado mineral retenido en Tamiz de 2,36 mm (N°8).

b = Porcentaje de agregado mineral que pasa por el tamiz de 2,36 mm (N°8) y retenido en el tamiz de 0,075 mm (N°200).

c = Porcentaje de agregado mineral que pasa por el Tamiz de 0,075 mm (N°200).

K = 0,15 para un 11-15 por ciento que pasa por el tamiz de 0,075 mm (N°200), 0,18 para un 6 a 10 por ciento que pasa por el tamiz de 0,075 mm (N°200), 0,20 para un 5 por ciento o menos que pasa por el tamiz de 0,075 mm (N°200).

F = 0 – 2,0 por ciento. Basado en la absorción de árido ligero o pesado, en ausencia de otros datos, se sugiere un valor de 0,7.

$$P = 0,035 * 62,46 + 0,045 * 35,26 + 0,2 * 2,28 + 0,7$$

$$P = 4,93 \%$$

Luego el contenido mínimo es $P - 1\% = 4,93\% - 1\% = 3,93\%$

3.5.2 Dosificación de la mezcla asfáltica convencional

Tabla 3.18. Dosificación de mezclas asfálticas convencionales

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	3,93%	4,93%	5,43%	5,93%	6,43%	6,93%
Porcentaje de agregado (%)	96,07%	95,07%	94,57%	94,07%	93,57%	93,07%
Peso del cemento asfáltico (gr)	47,16	59,16	65,16	71,16	77,16	83,16
Peso de grava (gr)	299,74	296,62	295,06	293,50	291,94	290,38
Peso de gravilla (gr)	345,85	342,25	340,45	338,65	336,85	335,05
Peso de arena (gr)	507,25	501,97	499,33	496,69	494,05	491,41
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Cantidad de briquetas por dosificación

Para poder identificar las briquetas se les asignó un numero en función al porcentaje de cemento asfáltico, de cada briqueta:

Tabla 3.19. Número de briquetas por dosificación

Contenido de cemento asfáltico	3,93%	4,93%	5,43%	5,93%	6,43%	6,93%	Total briquetas
Cantidad de briquetas	3	3	3	3	3	3	18

Fuente: Elaboración propia

3.6 Metodología de elaboración de mezclas asfálticas

Equipo y materiales:

- Martillo de compactación
- Extractor de probetas
- Dispositivo para moldear las probetas
- Balanza de sensibilidad de 0,1 gr
- Bandejas metálicas
- Placa de calentamiento

- Termómetro
- Espátula
- Equipo para medir la estabilidad (Máquina Marshall)
- Agregados para la mezcla asfáltica
- Asfalto 85 – 100
- Asfalto modificado con polímero E.VA.

Procedimiento de elaboración de briquetas:

- Para la preparación del árido, primero se debe secar el agregado hasta una masa constante a una temperatura de 110 °C y se separa, en este caso el agregado estaba separado en gravas de tamaños de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " y arena.
- Se pesan las diversas fracciones de áridos para cada briqueta de acuerdo con los pesos acumulativos.

Figura 3.30. Agregados preparados para la mezcla



Fuente: Elaboración propia

- También, el cemento asfáltico debe estar pesado de acuerdo a la cantidad que se requiere para cada briqueta y una vez caliente se vierte sobre los agregados.

Figura 3.31. Cemento asfáltico listo para agregar a la mezcla.



Fuente: Elaboración propia

- Se mezcla el cemento asfáltico con los agregados, hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 130°C , y en ningún caso someter a recalentar.
- Una vez mezclado el agregado con el cemento asfáltico, se coloca dicha mezcla en los moldes ya lubricados y se procede a acomodar la mezcla dando 25 golpes con un apisonador, 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro.
- Con el martillo de compactación se aplica 75 golpes en cada cara de la briqueta para las primeras 18 briquetas. Se deja enfriar el molde juntamente con la briqueta a temperatura ambiente durante 30 minutos aproximadamente, luego se extrae la briqueta con la ayuda de un extractor hidráulico.
- Se deja enfriar a temperatura ambiente con su respectiva identificación.

Figura 3.32. Primeras 18 briquetas con su respectiva identificación



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento de rotura de briquetas por el método Marshall

- Primero se debe medir con vernier las alturas en cuatro puntos de la briquea para determinar la altura promedio que permitirá corregir la estabilidad a través de un factor de corrección.
- Después pesar cada briquea para determinar el peso seco.
- Seguido, prepara un baño María a 25 °C, e introducir las briquetas en el baño por 5 min, posteriormente sacar del agua y secar con un paño superficialmente, para luego proceder con la toma de peso superficialmente seco.
- Después sumergir las briquetas en agua, y tomar el peso sumergido.
- Por otra parte, se coloca las briquetas en un baño de agua a 60 ± 1 °C, durante 30 minutos antes de ensayar.
- Se limpian completamente las superficies interiores de la mordaza, la temperatura de la misma debe mantenerse entre 21 y 38 °C. Se lubrica las varillas de guía con una película delgada de aceite de modo que la parte superior de la mordaza deslice suavemente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Figura 3.33. Briquea preparada para la rotura.



Fuente: Elaboración propia

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad constante de deformación de 50, 80 mm por minuto (2" por minuto) hasta que se produzca la rotura.

Figura 3.34. Momento de la rotura de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia

El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60 °C se anota como valor de la Estabilidad Marshall.

Mientras se realiza el ensayo de estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (flujo) en posición sobre la varilla de la guía y se quita cuando se obtiene la carga máxima; se toma lectura y se anota como valor de flujo de la briqueta, expresada en centésimas de pulgada.

3.7 Cálculo de las propiedades de las mezclas asfálticas

- **Determinación de la altura promedio de las briquetas**

Una vez medidas las 4 alturas de cada briqueta se procede a promediar, y los resultados se observan en la siguiente tabla:

Tabla 3.20. Altura media de cada briqueta para 3,93%

Identificación	Alturas (cm)
1	6,92
2	6,83
3	6,68

Fuente: Elaboración propia

- **Determinación de la base de mezcla y agregado**

Para la base de mezcla se considera el porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas, en este cálculo el porcentaje de asfalto es de 3,93 %.

Para determinar la base de agregado se realiza el siguiente procedimiento de cálculo:

$$\text{Base del agregado} = \frac{\text{Base de la mezcla} * 100}{100 - \text{Base de la mezcla}}$$

$$\text{Base del agregado} = \frac{3,93 * 100}{100 - 3,93}$$

$$\text{Base del agregado} = 4,09 \%$$

- **Determinación del peso de briqueta seca en el aire**

El peso de la briqueta seca en el aire consiste en medir su peso una vez sacándola del molde.

Tabla 3.21. Peso seco al aire de las briquetas

Identificación	Peso briqueta al aire (gr)
1	1203,9
2	1198,0
3	1180,2

Fuente: Elaboración propia

- **Determinación del peso de briqueta saturado con superficie seca (S.S.S.)**

El peso de la briqueta saturado superficialmente seco consiste en medir su peso una vez secada la briqueta después de estar sumergida en agua durante 30 minutos a 25 °C.

Tabla 3.22. *Peso briqueta saturado con superficie seca*

Identificación	Peso S.S.S. (gr)
1	1209,8
2	1201,1
3	1183,7

Fuente: Elaboración propia.

- **Determinación del peso de briqueta sumergida en agua**

El peso de la briqueta sumergida en agua, consiste en medir su peso una vez transcurrido 30 minutos sumergida en agua a una temperatura de 25°C.

Tabla 3.23. *Peso briqueta sumergida en agua*

Identificación	Peso sumergido en agua (gr)
1	642
2	643
3	644

Fuente: Elaboración propia

- **Determinación del volumen de la briqueta**

Se realiza el procedimiento de cálculo de volumen para la briqueta identificada como 1:

$$\text{Vol. Briqueta} = \text{Peso S.S.S.} - \text{Peso sumergido}$$

$$\text{Vol. Briqueta} = 1209,8 - 642$$

$$\text{Vol. Briqueta} = 567,8 \text{ cm}^3$$

Debido a que el peso es del agua y su peso específico es de 1 gr/cm³ se considera:

$$\text{Volumen de briqueta} = 567,8 \text{ cm}^3$$

- **Determinación de la densidad de la briqueta**

El procedimiento de cálculo se realizará para la briqueta identificada como 1:

Densidad real

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

$$\text{Densidad real} = \frac{1203,9}{567,8}$$

$$\text{Densidad real} = 2,120 \text{ kg/cm}^3$$

Densidad máxima teórica de la briqueta

$$D_{\max T} = \frac{100}{\left(\frac{\% \text{ asfalto}}{\text{Peso esp. asf.}} \right) + \left(\frac{100 - \% \text{ asfalto}}{\text{Peso esp. agr. grueso}} \right)}$$

$$D_{\max T} = \frac{100}{\left(\frac{3,93}{1,026} \right) + \left(\frac{100 - 3,93}{2,49} \right)}$$

$$D_{\max T} = 2,35 \text{ gr/cm}^3$$

- **Determinación de los porcentajes de vacíos de la mezcla (Vv)**

El procedimiento de cálculo se realizará para la briqueta identificada como 1.

$$V_v = \left(\frac{D_{\max T} - \text{Dens. prom.}}{D_{\max T}} \right) * 100$$

$$V_v = \left(\frac{2,35 - 2,15}{2,35} \right) * 100$$

$$V_v = 8,65 \%$$

- **Determinación de vacíos en el agregado mineral (V.A.M.)**

$$VAM = \left(\frac{\% \text{ de asf.} * \text{Dens. prom.}}{\text{Peso esp. del asf.}} \right) + V_v$$

$$VAM = \left(\frac{3,93 * 2,15}{1,026} \right) + 8,65$$

$$V.A.M. = 17,67 \%$$

- **Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (R.B.V.)**

$$RBV = \left(\frac{VAM - V_v}{VAM} \right) * 100$$

$$RBV = \left(\frac{17,67 - 8,65}{17,67} \right) * 100$$

$$RBV = 51,06 \%$$

- **Determinación de la estabilidad y fluencia**

La estabilidad y la fluencia son propiedades que se obtienen a partir de la prensa Marshall.

Tabla 3.24. Estabilidad y fluencia

Identificación	Lectura Dial	
	Estabilidad	Fluencia
1	628	13
2	1067	13
3	1870	15

Fuente: Elaboración propia

Una vez tomada la lectura del dial se procede con la corrección de calibración de la prensa Marshall mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilidad Real} = \text{Lector dial} * \text{Factor de Unidad}$$

Donde.

Lect. Dial = Es la lectura medida en la prensa Marshall

Tabla 3.25. Estabilidad real

Identificación	Lectura (lb)	
	Estabilidad	Real
1	628	1672,86
2	1067	2855,00
3	1870	5017,31

Fuente: Elaboración propia

Después del cálculo de estabilidad real se procede a corregir por la altura de la briqueta con la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilidad Corregida} = \text{Estabilidad} * \text{Factor Corrección de Altura}$$

Donde:

Factor Corrección Altura = Es el factor de corrección de acuerdo a la altura de la briqueta según el método Marshall cuando la altura es diferente de 63,43 cm.

Tabla 3.26. Altura promedio y factor de corrección por altura

Identificación	Promedio de altura (cm)	Factor de corrección por altura
1	6,92	0,87
2	6,83	0,89
3	6,68	0,93

Fuente: Manual de la ABC vol. 4 tabla A0608_1 Factor de Corrección por altura para estabilidad Marshall (Normativa AASTHO)

Tabla 3.27. Estabilidad corregida

Identificación	Estabilidad real (lb)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lb)	Estabilidad promedio (lb)
1	1672,86	0,87	1460,74	2885,08
2	2855,00	0,89	2540,95	
3	5017,31	0,93	4653,56	

Fuente: Elaboración propia

Para la fluencia, se procede a promediar los 3 valores tomados de la lectura para un 3,93 % de cemento asfáltico:

Tabla 3.28. Promedio de fluencia

Identificación	Fluencia 1/100	Promedio
1	13	13,67
2	13	
3	15	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29. Resultado de la estabilidad y fluencia para un 3,93% de C.A.

Identificación	Estabilidad		Fluencia	
	Real (lb)	Promedio	1/100 (pulg)	Promedio
1	1460,74	2885,08	13	13,67
2	2540,95		13	
3	4653,56		15	

Fuente: Elaboración propia

3.8 Resultados de las propiedades de mezcla asfáltica convencional

A continuación, se presenta la planilla de resultados:

Tabla 3.30. Resultado del diseño de la mezcla asfáltica convencional

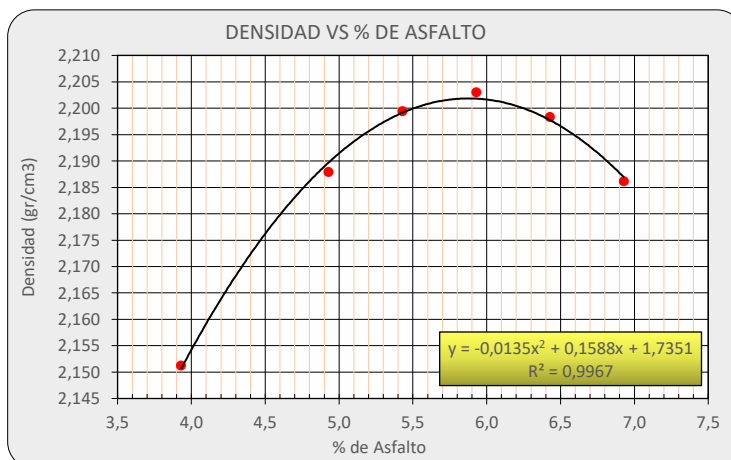
% de Asfalto	Identificación	Altura promedio (cm)	Densidad real promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (V _v)	% Vacíos de agregado mineral (VAM)	% Vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad corregida promedio (lb)	Fluencia promedio (1/100)
3,93	1	6,92	2,151	8,65	17,67	51,06	2885,08	11,67
	2	6,83						
	3	6,68						
4,93	4	6,66	2,188	5,72	16,87	66,11	3045,54	12,33
	5	6,65						
	6	6,68						
5,43	7	6,46	2,199	4,52	16,71	72,96	3071,72	13,00
	8	6,51						
	9	6,55						
5,93	10	6,44	2,203	3,65	16,87	78,34	3046,38	13,67
	11	6,44						
	12	6,59						
6,43	13	6,39	2,198	3,14	17,37	81,90	2964,04	16,67
	14	6,45						
	15	6,49						
6,93	16	6,49	2,186	2,96	18,18	83,72	2820,36	17,33
	17	6,39						
	18	6,41						

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido todos los valores se procede a dibujar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones:

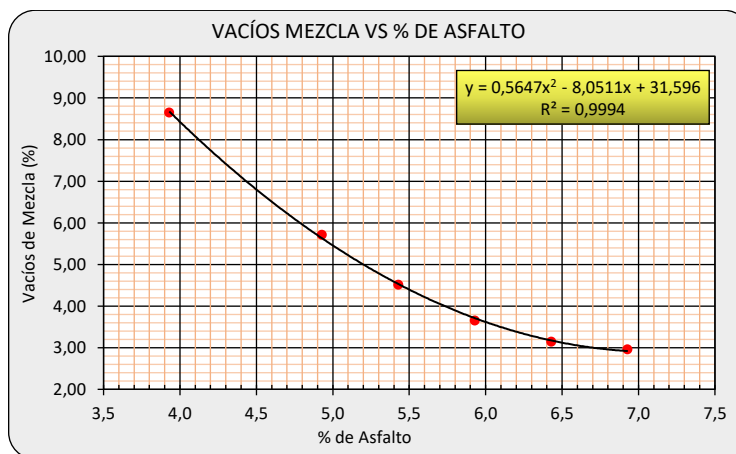
- Porcentaje de asfalto vs densidad de la briqueta.
- Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total.
- Porcentaje de asfalto vs vacíos de agregado mineral (VAM).
- Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV).
- Porcentaje de asfalto vs estabilidad corregida.
- Porcentaje de asfalto vs fluencia.

Gráfica 3.5. Porcentaje de asfalto vs densidad



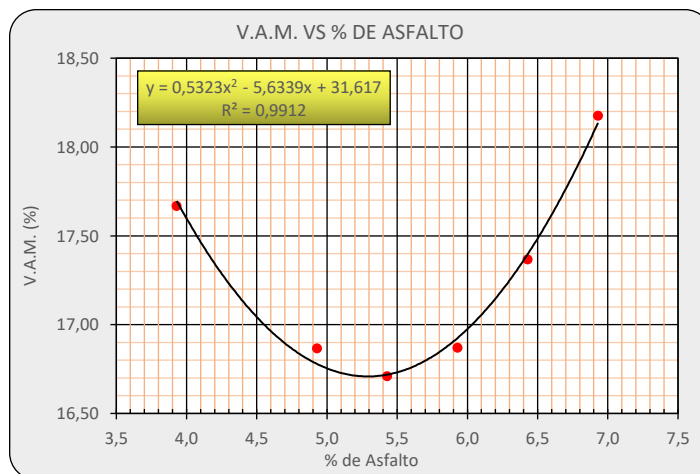
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.6. Porcentaje de asfalto vs Vacíos de la mezcla total



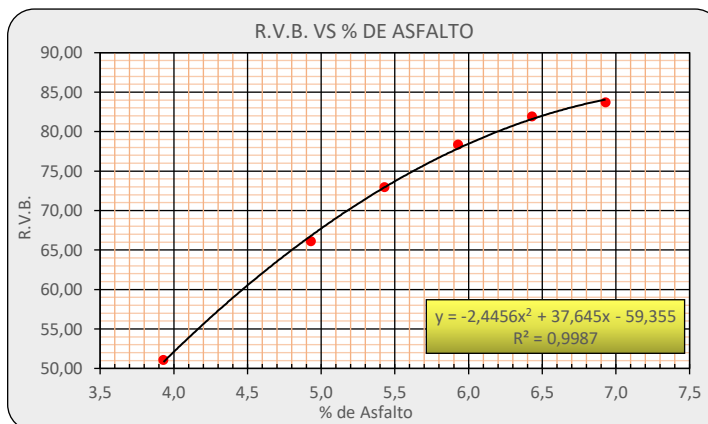
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.7. Porcentaje de asfalto vs Vacíos de agregado mineral



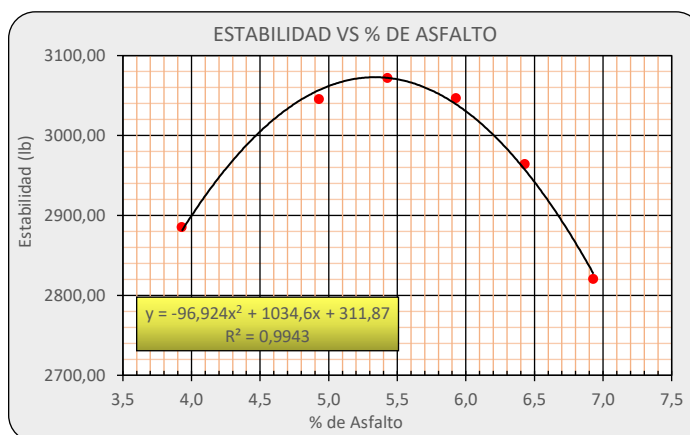
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.8. Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos llenos de asfalto



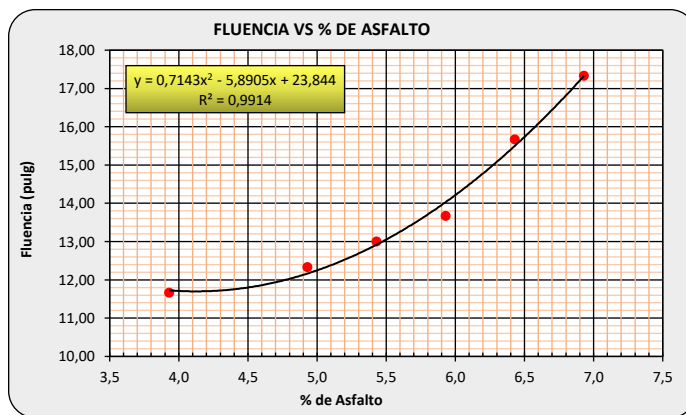
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.9. Porcentaje de asfalto vs Estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.10. Porcentaje de asfalto vs Fluencia



Fuente: Elaboración propia

3.9 Contenido óptimo de cemento asfáltico convencional

De acuerdo a las anteriores gráficas obtenidas y según sus ecuaciones se tienen los siguientes resultados:

Tabla 3.31. Resultado del diseño de la mezcla asfáltica convencional

Características	Valores obtenidos de las gráficas	% de asfalto	Especificaciones técnicas
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,202	5,88	---
Estabilidad máxima (lb)	3072,79	5,34	> 1800 lb
Porcentaje de Vacíos (%)	4,00	5,73	3 – 5 %
V.A.M. (%)	16,71	5,29	> 13 %
Promedio (%)		5,56	

Fuente: Elaboración propia

El contenido óptimo de cemento asfáltico es de 5,56%.

Después con el contenido óptimo de cemento asfáltico 5,56%, se realizaron 15 briquetas y se obtuvieron los siguientes resultados de las propiedades de la mezcla asfáltica según el método Marshall:

Tabla 3.32. Resultados de las propiedades con el contenido óptimo de 5,56%

Valores de las propiedades obtenidos del diseño Marshall			
Características	% de asfalto	Obtenidos de gráficas	Especificaciones técnicas
Densidad	5,56	2,20	---
Estabilidad	5,56	3069,51	> 1800 lb
Fluencia	5,56	13,07	8 – 14 de 0,01pulg.
% de Vacíos	5,56	4,24	3 – 5 %
R.B.V.	5,56	74,61	65 – 75 %
V.A.M.	5,56	16,70	> 13 %

Fuente: Elaboración propia.

3.10 Mezcla asfáltica modificada con polímero E.V.A.

Para realizar las mezclas asfálticas modificadas con diferentes porcentajes de polímero E.V.A., se procedió con los siguientes pasos:

3.10.1 Presentación de las partículas del polímero E.V.A.

Tabla 3.33. Polímeros típicos utilizados para modificar asfaltos.

POLÍMEROS TÍPICOS UTILIZADOS PARA MODIFICAR ASFALTOS		
TIPO	PRESENTACIÓN	COMPOSICIÓN QUÍMICA
ELASTÓMEROS		
Copolímero de bloque	Latéx	Estireno-Butadieno (SB)
Copolímeros aleatorios	Latéx	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
Copolímero de bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
Copolímero de bloque	Grumos	Estireno-Butadieno (SB)
Copolímero de bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
Homopolímero	Latéx	Policloropreno
Copolímeros aleatorios	Latéx	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
Copolímero de bloque	Pre mezclado	Estireno-Butadieno (SB)
Copolímeros aleatorios	Latéx	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
Copolímero de bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
PLASTÓMEROS		
Copolímeros	Granulado o en polvo	Etileno Vinilo Acetato (EVA)
Homopolímero	Pre mezclado en CA	Poliétileno de Baja Densidad (LDPE)
Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Vinilo Acetato (EVA)
Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Metilacrilato (EMA)
Copolímero	Pelotitas (Pellets)	Etileno Vinilo Acetato (EVA)

Fuente: Manual de especificaciones técnicas generales de construcción Vol. VII, ABC.

3.10.2 Modificación del cemento asfáltico convencional con polímero E.V.A.

De acuerdo a la tabla los polímeros o copolímeros que pertenecen a los PLASTÓMEROS se pueden presentar en granos, polvos o pelotitas.

- **Metodología fallida para la modificación del cemento asfáltico:**

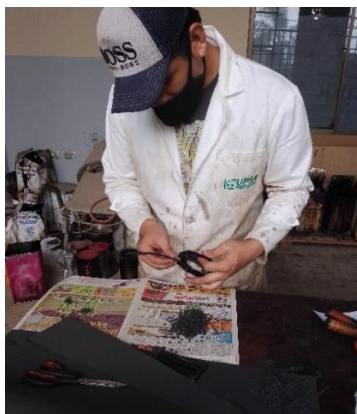
El procedimiento del corte de las partículas de E.V.A. se realizó de forma manual.

Figura 3.35. Goma E.V.A (Etileno Vinil Acetato) polímero a utilizar.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.36. Corte de E.V.A. en pequeñas fracciones.



Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de que las partículas de E.V.A. se corten de forma uniforme se utilizó una perforadora.

Figura 3.37. Perforadora utilizada para cortar el polímero.



Fuente: Elaboración propia.

Se procede a calentar el cemento asfáltico a una temperatura inicial de 125 °C. en este primer intento.

Luego se agregó las partículas de E.V.A. en una de las taras con cemento asfáltico ya calentado y se vuelve a calentar a la misma temperatura.

Figura 3.38. Cemento asfáltico mezclado con E.V.A. en el horno a 125 °C.



Fuente: Elaboración propia

Luego de dos horas de estar en el horno a temperatura constante se retiró del horno.

Figura 3.39. Cemento asfáltico mezclado con E.V.A.



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede observar que las partículas de polímero no se mezclan en su totalidad con el cemento asfáltico, es decir no forma una sola pasta uniforme. Por lo tanto, se aplica otra metodología con buenos resultados para formar el cemento asfáltico modificado:

- **Metodología óptima para la modificación del cemento asfáltico con E.V.A.**

a) Cortar las partículas de E.V.A. con dimensiones de 1 mm x 1 mm aprox.

Figura 3.40. Partículas de E.V.A. cortadas en fracciones más pequeñas.



Fuente: Elaboración propia.

- b) Colocar el cemento asfáltico convencional en taras y precalentar en horno preferentemente rotatorio a 140 °C, por 30 min. Después de ese tiempo se observa una textura fluida.
- c) Luego vaciar las partículas de E.V.A. en el cemento asfáltico y llevarlo nuevamente al horno por 2 hr a 140°C.
- d) Retirar del horno las taras y verificar que todas las partículas estén disueltas en el cemento asfáltico.
- e) Con una pequeña espátula, mezclar bien, hasta que se homogenice el polímero E.V.A. con el cemento asfáltico.

Figura 3.41. Partículas de polímero E.V.A. agregadas al cemento asfáltico caliente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.42. Cemento asfáltico modificado con polímero E.V.A.



Fuente: Elaboración propia.

- f) Finalmente reservar la mezcla bien tapada, en lugar fresco evitando el contacto con el sol, para mantener intactas sus propiedades.
- g) Este procedimiento se realizó para los diferentes porcentajes de polímero E.V.A.

3.10.3 Elaboración de briquetas con asfalto modificado con polímero E.V.A

- **Aspectos previos**

Número de briquetas: Según la norma INV E – 748 – 13 de Colombia, indica que, para una gradación particular de agregado, original o mezclado, se deberá preparar una serie de briquetas con diferentes contenidos de asfalto (con incrementos de 0,5 % en masa entre ellos), de manera que los resultados se puedan graficar y encontrar un contenido “óptimo”, como mínimo se prepararán tres briquetas para cada contenido de asfalto.

Cantidad de materiales: La norma INV – 748 – 13 también dice que un diseño con seis contenidos de asfalto, necesitará por lo menos dieciocho (18) briquetas. Para cada briketa se necesitan unos 1200,00 g de ingredientes.

También, el Manual de Carreteras Volumen VII de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), en las especificaciones técnicas generales ETG 2 – 20, Suministro de cemento asfáltico modificado con polímeros, indica que: Los polímeros tienen una estructura de cadena relativamente larga de hidrocarburos en comparación con el asfalto y, por lo tanto, la adición de polímeros usualmente incrementa la rigidez o la viscosidad del cemento asfáltico a altas temperaturas. La adición de pequeñas cantidades de polímeros, en el rango de 1, 2 por ciento, provee refuerzo general y rigidez al cemento

asfáltico. Cantidades mayores de polímero, en el rango de 3 a 4 por ciento, pueden formar una estructura de red. La elección adecuada de asfalto, grado de asfalto, tipo de concentración de polímero y método de mezcla determinará si se forma una estructura de red.

Bajo estos parámetros, y una vez encontrado el contenido óptimo de cemento asfáltico de 5,56 %, se consideró los siguientes porcentajes de polímeros: 0,50 %, 1,00 %, 1,50 %, 2,00 %, 2,50% y 3,00%.

- **Dosificación de la mezcla asfáltica modificada con polímero E.V.A.**

Para ver el comportamiento del polímero Etileno Vinil Acetato (E.V.A.) dentro de la mezcla asfáltica previamente dosificada: grava 26%, gravilla 30%, arena el 44% y cemento asfáltico convencional óptimo 5,56%, se procede a realizar una dosificación con diferentes porcentajes de polímero E.V.A.: 0,50 %, 1,00 %, 1,50 %, 2,00 %, 2,50% y 3,00%.

Los pesos de cada componente de la mezcla asfáltica modificada, se expresa en la siguiente tabla:

Tabla 3.34. Dosificación de mezclas asfálticas modificadas

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	5,56%	5,56%	5,56%	5,56%	5,56%	5,56%
Porcentaje de polímero E.V.A. (%)	0,50%	1,00%	1,50%	2,00%	2,50%	3,00%
Porcentaje de agregado (%)	94,44%	94,44%	94,44%	94,44%	94,44%	94,44%
Peso del cemento asfáltico (gr)	66,39	66,05	65,72	65,39	65,05	64,72
Peso de polímero E.V.A. (gr)	0,33	0,67	1,00	1,33	1,67	2,00
Peso de grava (gr)	294,65	294,65	294,65	294,65	294,65	294,65
Peso de gravilla (gr)	339,98	339,98	339,98	339,98	339,98	339,98
Peso de arena (gr)	498,64	498,64	498,64	498,64	498,64	498,64
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Una vez dada la dosificación para las mezclas modificadas con los diferentes porcentajes de polímero E.V.A., se procede a elaborar las briquetas como indica el punto 3.6. del presente capítulo.

Y posteriormente para conocer las propiedades de las mezclas asfálticas modificadas, se aplica el procedimiento de cálculo del punto 3.7. del presente capítulo.

Figura 3.43. Briquetas con C.A. con diferentes porcentajes de polímero



Fuente: Elaboración propia

3.10.4 Datos y resultados de las propiedades de las mezclas asfálticas modificadas con polímero E.V.A.

Tabla 3.35. Resultados de densidades de las mezclas modificadas con E.V.A.

Nº de probeta	% de Polímero E.V.A.	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta		
		Base mezcla	Base agregados	Seco	Sat. Sup. Seco	Sumergido en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica
	%	%	%	gr.	gr.	gr.	cm³	gr/cm³	gr/cm³	gr/cm³
1	0,50%	5,56	5,89	1188,0	1193,3	685	508,3	2,3372	2,3562	2,467
2		5,56	5,89	1172,0	1176,3	680	496,3	2,3615		
3		5,56	5,89	1165,3	1169,7	678	491,7	2,3699		
4	1,00%	5,56	5,89	1185,1	1189,6	687	502,6	2,3579	2,3678	2,467
5		5,56	5,89	1183,4	1188,2	689	499,2	2,3706		
6		5,56	5,89	1177,4	1181,8	686	495,8	2,3747		
7	1,50%	5,56	5,89	1184,2	1188,3	689	499,3	2,3717	2,3736	2,467
8		5,56	5,89	1189,3	1192,8	693	499,8	2,3796		
9		5,56	5,89	1186,6	1190,8	690	500,8	2,3694		
10	2,00%	5,56	5,89	1185,6	1190,5	689	501,5	2,3641	2,3813	2,467
11		5,56	5,89	1180,8	1186,5	693	493,5	2,3927		
12		5,56	5,89	1185,5	1191,6	695	496,6	2,3872		
13	2,50%	5,56	5,89	1178,1	1183,8	687	496,8	2,3714	2,3806	2,467
14		5,56	5,89	1166,2	1169,6	679	490,6	2,3771		
15		5,56	5,89	1183,8	1187,6	693	494,6	2,3934		
16	3,00%	5,56	5,89	1178,6	1183,0	688	495,0	2,3810	2,3782	2,467
17		5,56	5,89	1187,6	1192,6	693	499,6	2,3771		
18		5,56	5,89	1187,5	1193,7	694	499,7	2,3764		
ESPECIFICACIONES				Mínimo						
				Máximo						

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.36. Resultados de vacíos de las mezclas modificadas con E.V.A.

N° de probeta	% de Polímero E.V.A.	% de Asfalto		% de Vacíos		
		Base mezcla	Base agregados	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
	%	%	%	%	%	%
1	0,50%	5,56	5,89	4,49	17,86	74,85
2		5,56	5,89			
3		5,56	5,89			
4	1,00%	5,56	5,89	4,02	17,39	76,87
5		5,56	5,89			
6		5,56	5,89			
7	1,50%	5,56	5,89	3,79	17,16	77,92
8		5,56	5,89			
9		5,56	5,89			
10	2,00%	5,56	5,89	3,47	16,84	79,38
11		5,56	5,89			
12		5,56	5,89			
13	2,50%	5,56	5,89	3,50	16,87	79,25
14		5,56	5,89			
15		5,56	5,89			
16	3,00%	5,56	5,89	3,60	16,97	78,78
17		5,56	5,89			
18		5,56	5,89			
ESPECIFICACIONES				3	13	65
				5	-	75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.37. Resultados de estabilidad y fluencia de las mezclas modificadas con E.V.A.

N° de probeta	% de Polímero E.V.A.	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
		Base mezcla	Base agregados		Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%	%		mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg.	0,01 pulg.
1	0,50%	5,56	5,89	6,53	1232	3299,31	0,9563	3155,13	2941,48	10	10,00
2		5,56	5,89	6,47	1088	2911,55	0,9700	2824,20		9	
3		5,56	5,89	6,39	1074	2873,85	0,9900	2845,11		11	
4	1,00%	5,56	5,89	6,50	1353	3625,14	0,9625	3489,19	3267,40	10	9,00
5		5,56	5,89	6,50	1180	3159,28	0,9625	3040,81		8	
6		5,56	5,89	6,49	1266	3390,86	0,9650	3272,18		9	
7	1,50%	5,56	5,89	6,53	1571	4212,17	0,9563	4028,10	3401,58	12	11,00
8		5,56	5,89	6,62	1325	3549,74	0,9394	3334,62		10	
9		5,56	5,89	6,61	1128	3019,26	0,9413	2842,03		11	
10	2,00%	5,56	5,89	6,55	1459	3910,57	0,9525	3724,82	3623,44	14	11,67
11		5,56	5,89	6,51	1348	3611,67	0,9600	3467,21		10	
12		5,56	5,89	6,60	1455	3899,80	0,9432	3678,29		11	
13	2,50%	5,56	5,89	6,50	1470	3940,19	0,9625	3792,44	3694,43	13	12,33
14		5,56	5,89	6,43	1330	3563,20	0,9800	3491,94		12	
15		5,56	5,89	6,53	1482	3972,51	0,9563	3798,91		12	
16	3,00%	5,56	5,89	6,50	1428	3827,10	0,9625	3683,58	3609,09	15	17,67
17		5,56	5,89	6,55	1354	3627,83	0,9525	3455,51		18	
18		5,56	5,89	6,53	1439	3856,72	0,9563	3688,18		20	
ESPECIFICACIONES									1800		8
									-		

Fuente: Elaboración propia

3.10.5 Resultados finales de las propiedades de las mezclas asfálticas modificadas con polímero E.V.A.

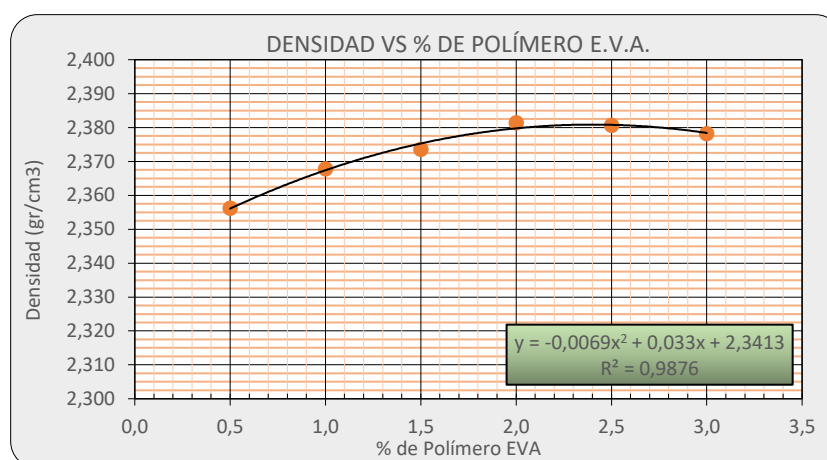
Tabla 3.38. Resumen de resultados de las propiedades de las mezclas modificadas

Porcentajes de polímero E.V.A.	Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	Estabilidad (libras)	Fluencia (pulg.)
0,5	5,56	2,36	4,49	17,86	74,85	2941,48	10,00
1,0	5,56	2,37	4,02	17,39	76,87	3267,40	9,00
1,5	5,56	2,37	3,79	17,16	77,92	3401,58	11,00
2,0	5,56	2,38	3,47	16,84	79,38	3623,44	11,67
2,5	5,56	2,38	3,50	16,87	79,25	3694,43	12,33
3,0	5,56	2,38	3,60	16,97	78,78	3609,09	17,67

Fuente: Elaboración propia

3.11 Análisis de resultados de las mezclas modificadas con el polímero E.V.A.

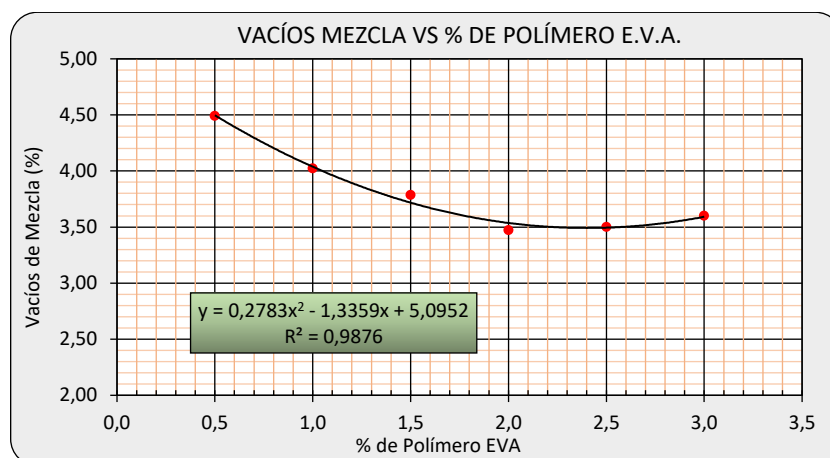
Gráfica 3.11. Comportamiento de la densidad vs. el porcentaje de E.V.A.



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.11. se puede observar que la densidad aumenta hasta el 2 % de polímero E.V.A., y después los resultados son casi constantes con leve descenso al 2,5% y 3%, esto se debe a que, al exceder de porcentaje de polímero E.V.A. en la mezcla, llega un punto de compactado que no permite que se densifique más. Analizando, el comportamiento excesivo del polímero E.V.A. en la mezcla, hace que la misma se esponje levemente, de manera poco perceptible visualmente.

Gráfica 3.12. Comportamiento de los vacíos de la mezcla vs. el porcentaje de E.V.A.

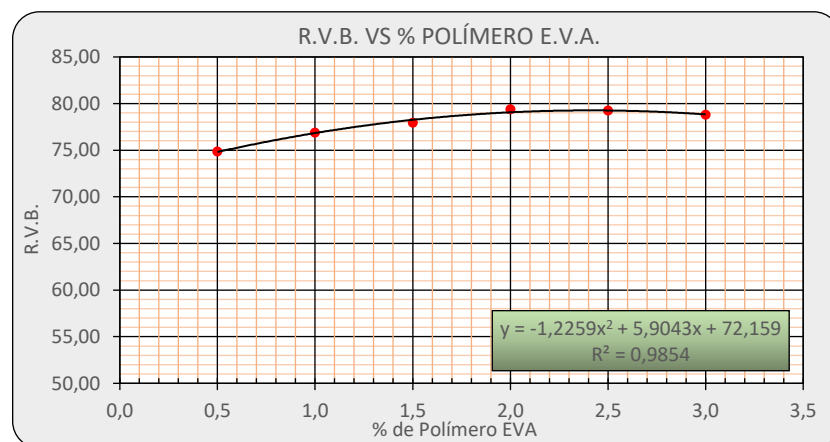


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.12. se observa el comportamiento de los vacíos de la mezcla, es la manera contraria al comportamiento de la densidad, porque los vacíos dependen de la densidad de la mezcla.

La norma para una mezcla asfáltica densa, especifica que los valores aceptables de vacíos en la mezcla deben estar entre 3% y 5%, En tal sentido, se observa que todos los resultados cumplen. Sin embargo, analizando el comportamiento de los vacíos de la mezcla según aumenta el porcentaje del polímero E.V.A. se puede observar que existe un descenso máximo hasta el 2,5% de E.V.A con el 3,5% de vacíos, es decir que, con este porcentaje la mezcla es más impermeable.

Gráfica 3.13. Comportamiento del R.B.V. de la mezcla vs. el porcentaje de E.V.A.

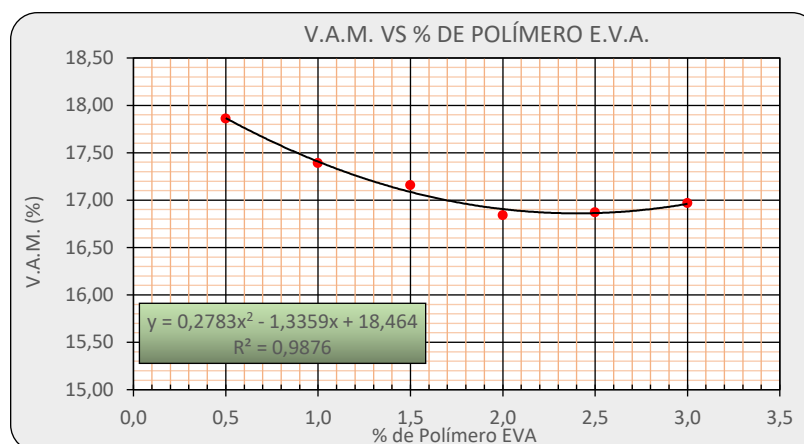


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.13. se observa el comportamiento de la Relación Betún Vacíos (R.B.V.) de la mezcla, evidencia que el cemento asfáltico modificado (betún) a medida que aumenta el porcentaje del polímero E.V.A., el mismo no puede cubrir todos los vacíos, esto se debe justamente al esponjamiento de la goma E.V.A. que impide la cobertura total de vacíos.

La norma determina que la Relación Betún Vacíos, para una mezcla densa debe ser de 65 a 75%, y observando los resultados, sólo el 0,5% de E.V.A. cumple con esta especificación, el resto no cumplen porque sobrepasan el valor máximo de la norma, porque los resultados están entre 75% a 80%, es decir que el asfalto modificado con E.V.A. cubre más los vacíos.

Gráfica 3.14. Comportamiento del V.A.M. de la mezcla vs. el porcentaje de E.V.A.



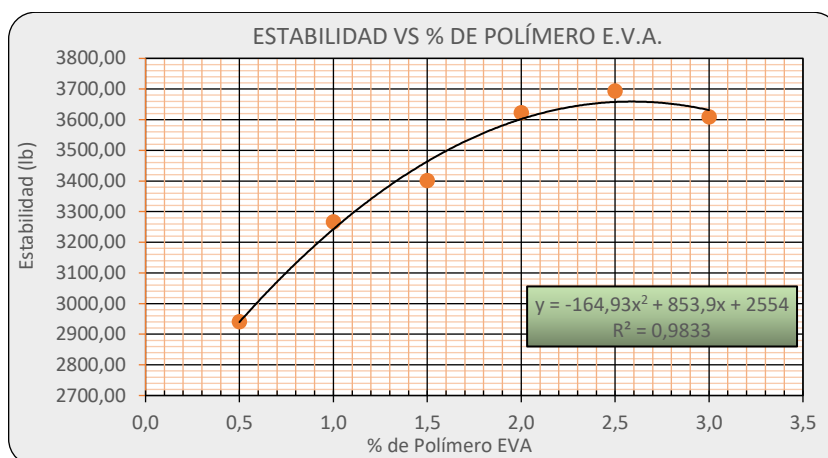
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.14. se observa el comportamiento de los Vacíos del Agregado Mineral (V.A.M.), es descendiente a medida que aumenta el contenido de polímero E.V.A., reduce hasta el 2% de E.V.A., después al 2,5% y 3% tiene un leve ascenso.

La norma determina que el VAM debe ser superior al 13%, en este caso, todos los porcentajes con polímero E.V.A. cumplen.

El VAM refleja el comportamiento de los vacíos de la mezcla, porque se entiende que la mezcla es homogénea y que el cemento asfáltico modificado cubre de manera proporcional las partículas del agregado mineral, es decir que el VAM debe ser mínimo 13% y los vacíos de la mezcla 3% a 5%, la diferencia (8% a 10%) está cubierto por el cemento asfáltico modificado.

Gráfica 3.15. Comportamiento de la estabilidad. de la mezcla vs. el % de E.V.A.

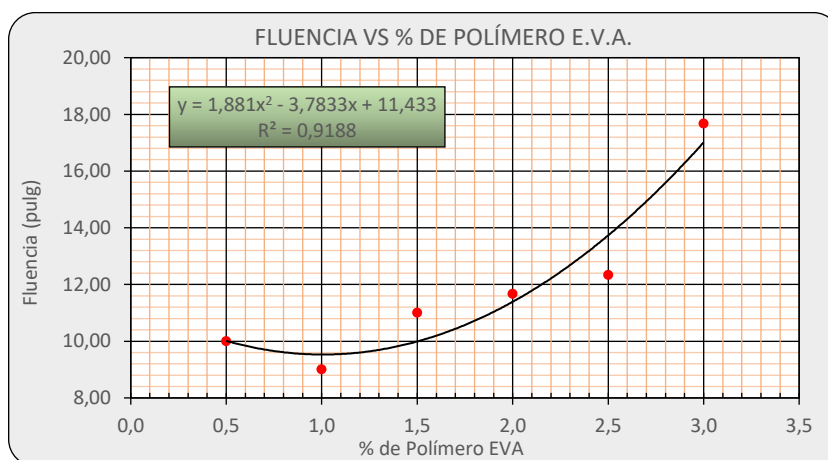


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.15. se observa el comportamiento de la estabilidad, a medida que aumenta el porcentaje de polímero E.V.A., aumenta, hasta alcanzar su valor máximo al 2,5% de E.V.A. y reduce levemente al 3%; es decir que el asfalto modificado con este polímero, aumenta las propiedades de resistencia mecánica de la mezcla asfáltica, lo cual es muy favorable para el tránsito de tráfico de alto tonelaje.

La norma determina que la estabilidad mínima de una mezcla asfáltica para un tráfico pesado es de 1800 lb, y comparando con los resultados obtenidos, todos sobrepasan el valor mínimo requerido.

Gráfica 3.16. Comportamiento de la fluencia de la mezcla vs. el % de E.V.A.



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.16. se observa el comportamiento de la fluencia, es ascendente a medida que aumenta el porcentaje del polímero E.V.A., es decir a mayor polímero E.V.A. dentro de la mezcla asfáltica modificada, mayor será la deformabilidad, esto se debe a las propiedades físicas que tiene la goma E.V.A. y la poca resistencia al calor.

La norma determina que la fluencia para una mezcla densa, debe estar entre 8 a 14 de 0,01 pulgadas, y revisando los resultados del 0,5% al 2,5% de polímero E.V.A, cumplen con las especificaciones, sin embargo, el 3% de polímero E.V.A. no cumple, es decir con este porcentaje la mezcla se vuelve muy deformable, lo cual representa futuros problemas de ahuellamiento en las carpetas asfálticas.

3.12 Determinación del contenido óptimo del polímero E.V.A.

Para determinar el contenido óptimo de polímero E.V.A. en la mezcla asfáltica modificada, se consideraron las propiedades de mayor importancia, como ser la densidad y la estabilidad, sus valores máximos garantizan una mezcla asfáltica densa y durable.

Tabla 3.39. Contenido óptimo de polímero E.V.A. en la mezcla modificada

Ensayo	Valor de Diseño	% de E.V.A.
Estabilidad Marshall (lb)	3642,7	2,59
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,38	2,40
% Porcentaje óptimo de E.V.A.	Promedio (%) =	2,50

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el contenido óptimo de polímero E.V.A. en la mezcla es de 2,50%.

3.13 Caracterización del asfalto modificado con el % óptimo del polímero E.V.A.

Con el contenido óptimo de polímero E.V.A. (2,50%) se puede observar y analizar el cambio que genera en las propiedades del cemento asfáltico convencional.

Para tal efecto, se procedió a realizar los mismos ensayos de caracterización que se realizó al asfalto convencional, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.40. Penetración del asfalto modificado con 2,50% de E.V.A.

Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio final
Penetración a 25 °C, 100g, 5seg.(0.1 mm) AASHTO T-49	Muestra 1	0,1 mm	70	65	77	
	Muestra 2		68	74	69	
	Muestra 3		75	70	75	
	Promedio parcial		71	70	74	71

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.41. Ductilidad del asfalto modificado con 2,50% de E.V.A.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Ductilidad a 25 °C AASHTO T-51	cm	65	67	69	67

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.42. Punto de inflamación del asfalto modificado con 2,50% de E.V.A.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	220	229	226	225	>232	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.43. Punto de ablandamiento del asfalto modificado con 2,50% de E.V.A.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento AASHTO T53-96	°C	48	47	49	48	43	53

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.44. Viscosidad Saybolt del asfalto modificado con 2,50% de E.V.A.

Muestra 1 (Izquierdo)		Muestra 2 (Derecho)	
Tiempo (minutos)	Tiempo (sSF)	Tiempo (minutos)	Tiempo (sSF)
4':19":45	259	4':33":16	273
Viscosidad promedio (sSF)		266	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.45. Densidad del asfalto modificado con 2,50% de E.V.A.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Peso Picnómetro	gr	34,4	34,7	33,9	
Peso Picnómetro + Agua (25 °C)	gr	85,2	84,6	85,5	
Peso Picnómetro + Muestra	gr	64,9	63,8	64,1	
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	85,4	84,5	84,9	
Peso Específico	gr/cm³	1,00	0,99	0,98	0,99

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados de la caracterización de los componentes de la mezcla asfáltica

4.1.1 Agregados pétreos

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la recopilación de la información, mismos que son comparados con las especificaciones propuestas por la norma ASTM.

Tabla 4.1 Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados pétreos.

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultados	ASTM
		Min.	Máx.		
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	Grava ¾"	-	-	2,59 gr/cm ³	C-127
	Gravilla 3/8"			2,46gr/cm ³	
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	-	-	2,46gr/cm ³	C-128
Desgaste mediante la máquina de los ángeles	Grava ¾"	-	35%	24,21 %	C-131
	Gravilla 3/8"	-	35%	21,07 %	
Equivalente de arena	Arena	50%	-	82,61 %	D-2419

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2. Resumen de la granulometría de agregados

Tamices	tamaño (mm)	Grava ¾"	Gravilla 3/8"	Arena N°4
1"	25,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	90,53	100,00	100,00
1/2	12,50	39,11	100,00	100,00
3/8	9,50	9,15	99,66	100,00
N°4	4,75	0,20	3,75	97,43
N°8	2,36	0,13	0,14	85,14
N°16	1,18	0,13	0,12	72,77
N°30	0,60	0,12	0,10	56,99
N°50	0,30	0,12	0,09	36,31
N°100	0,150	0,11	0,08	5,91
N°200	0,075	0,10	0,08	5,07
BASE		0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Cemento asfáltico

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la recopilación de la información, mismos que son comparados con las especificaciones propuestas por la norma ASTM.

Tabla 4.3. Resultados de los ensayos de caracterización del C.A. convencional

Ensayo	Especificación		Resultados	Norma
	Mínimo	Máximo		
Peso específico (gr/cm ³)	1	1,05	1,026	ASTM D-70
Punto de ablandamiento (°C)	43	53	45	ASTM D-36
Punto de inflamación (°C)	232	-	240	ASTM-92
Penetración (0,1 mm)	85	100	90,3	ASTM D-5
Ductilidad (cm)	100	-	100,33	ASTM D-102
Viscosidad (sSf)	80	400	176,5	ASTM D 2170

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4. Resultados de los ensayos de caracterización del C.A. modificado

Ensayo	Especificación		Resultados	Norma
	Mínimo	Máximo		
Peso específico (gr/cm ³)	1	1,05	0,99	ASTM D-70
Punto de ablandamiento (°C)	43	53	48	ASTM D-36
Punto de inflamación (°C)	232	-	225	ASTM-92
Penetración (0,1 mm)	85	100	71	ASTM D-5
Ductilidad (cm)	100	-	67	ASTM D-102
Viscosidad (sSf)	80	400	266	ASTM D 2170

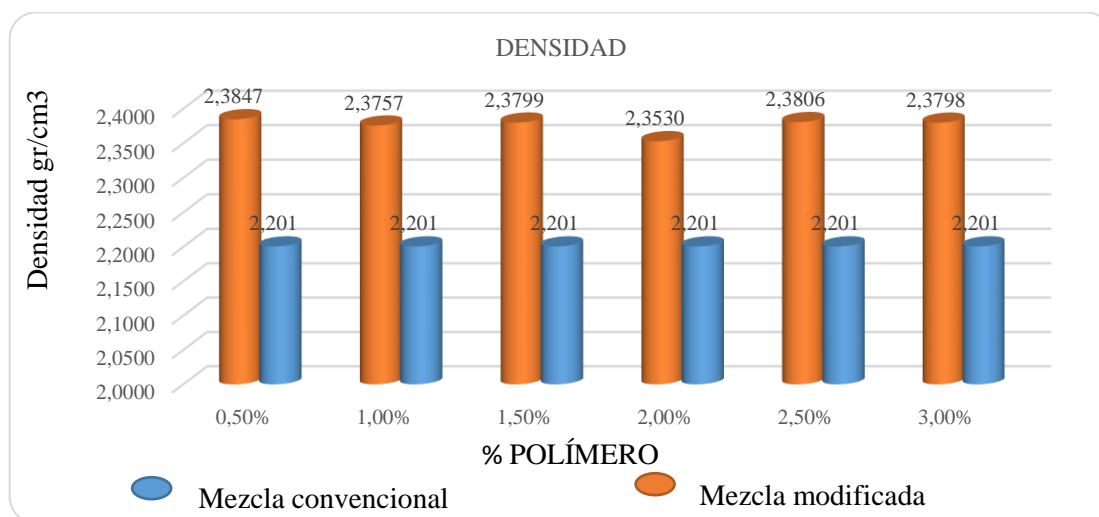
Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis comparativo de las mezclas asfálticas convencional y modificada

4.2.1 Análisis comparativo de densidad

En el Gráfico N°4.1. se puede apreciar que la densidad en la mezcla asfáltica convencional es menor al asfalto modificado con los diferentes porcentajes de polímero. Se determina que la densidad máxima se da en el porcentaje de 0,50 % de polímero E.V.A. con un valor de 2,3847 gr/cm³ y con 2,50 % de polímero se tiene valor de 2,3806 gr/cm³ de densidad. Estos porcentajes de polímero son los que dan mejores resultados.

Gráfico 4.1. Comparación de densidad



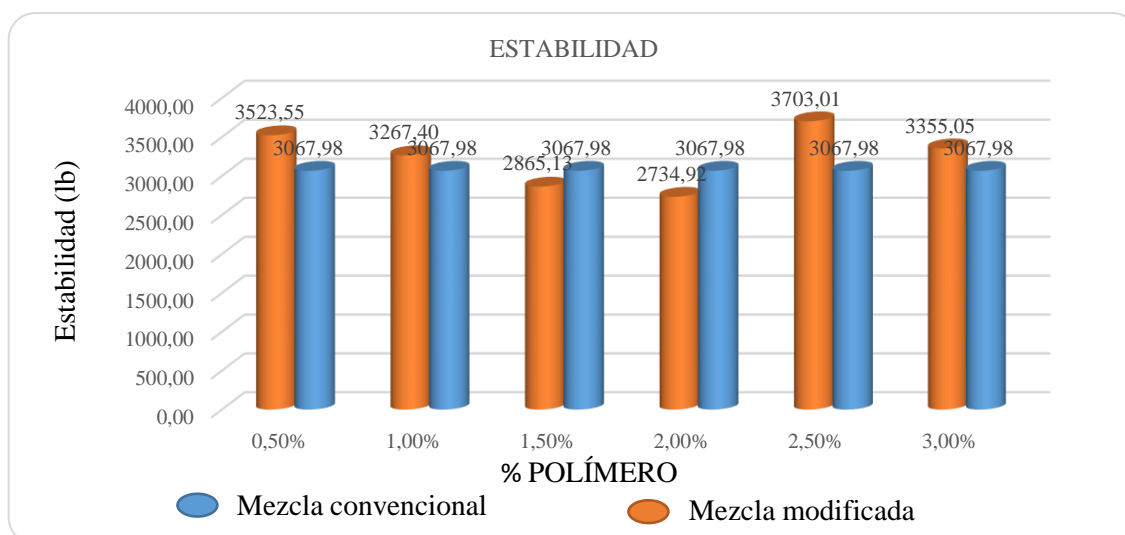
Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Análisis comparativo de estabilidad

En el Gráfico N°4.2. Similar a los resultados comparativos de la densidad, se puede notar un mejor comportamiento en la resistencia (estabilidad) en los asfaltos modificados.

Se determina que el punto máximo de estabilidad se da en el porcentaje de 2.5 % de E.V.A. en la mezcla asfáltica con un valor de 3703,01 lb y con 0,5 % de polímero se tiene un valor de 3523, 55 lb. También estos porcentajes de polímero son los que dan mejores resultados.

Gráfico 4.2. Comparación de estabilidad

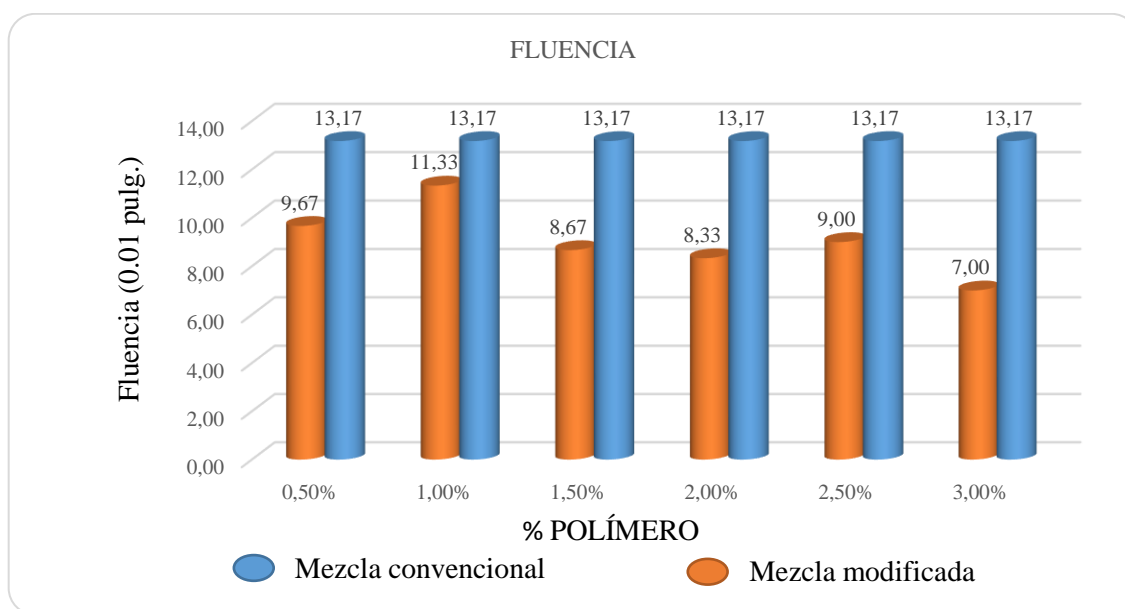


Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Análisis comparativo de fluencia

Del gráfico 4.3, Analizando el flujo para estas dosificaciones de mezclas se observa que están dentro del rango permisible que es de 8 a 14, tanto para 0,50 % como para un 2,50 % de polímero E.V.A.

Gráfico 4.3. Comparación de fluencia



Fuente: Elaboración propia

Con el 3% de polímero E.V.A., se obtiene una fluencia igual a 7 de 0,01 pulg., por lo tanto, no cumple con la norma.

Como se pueden apreciar en las tres propiedades esenciales de la mezcla asfáltica, el porcentaje de E.V.A. que proporciona mejores características es del 2,50%, porque se obtiene la mayor densidad, la mayor estabilidad y la fluencia está dentro del rango permitido de la norma.

4.3 Estadística descriptiva e inferencial

Estadística descriptiva

Para poder realizar la estadística descriptiva e inferencial, se procedieron a realizar 30 briquetas, todas con las mismas características, es decir el mismo diseño granulométrico inicial de estudio, con el 5,56% de cemento asfáltico óptimo determinado previamente y con el contenido óptimo de goma E.V.A. igual a 2,50%.

Los pasos para el estudio estadístico son:

- Ordenar los datos de menor a mayor:

Tabla 4.5. Datos del ensayo de estabilidad de menor a mayor

Nº muestra	Estabilidad (mm)	Nº muestra	Estabilidad (mm)
1	3459,24	16	3625,77
2	3486,59	17	3637,08
3	3489,57	18	3648,16
4	3543,26	19	3654,12
5	3551,69	20	3668,03
6	3566,99	21	3668,90
7	3580,00	22	3673,14
8	3580,89	23	3676,65
9	3593,23	24	3717,51
10	3595,65	25	3725,72
11	3599,09	26	3747,98
12	3603,59	27	3766,67
13	3620,47	28	3776,12
14	3621,61	29	3846,46
15	3625,53	30	3923,66

Fuente: Elaboración propia.

- Obtención del rango:

$$N = 30$$

$$X_{\text{Max}} = 3923,66$$

$$X_{\text{Min}} = 3459,24$$

$$\text{Rango} = 464,42$$

- Intervalos, cálculo de numero de intervalos de clase según Sturges:

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

- Amplitud de cada intervalo:

$$\text{Amplitud} = 77,40$$

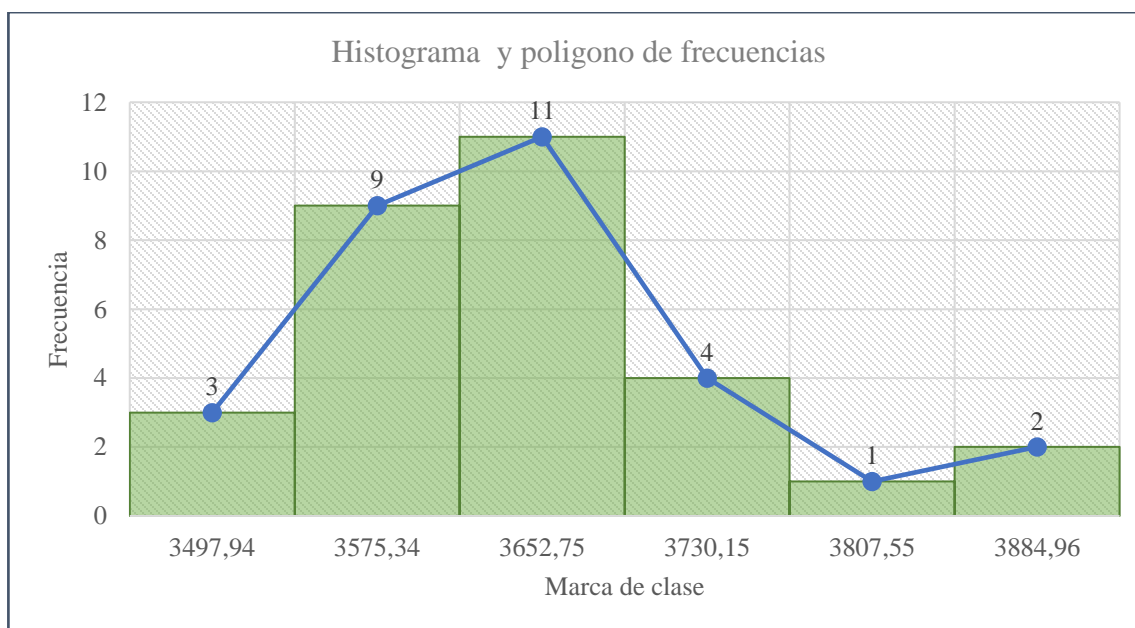
- Cálculo de los intervalos de clase, marca de clase, frecuencia absoluta y relativa

Tabla 4.6. Cálculo de frecuencia absoluta y relativa

Nº de clases	Intervalos de clase		Marca	Frecuencia observada	Frecuencia Acum.	% de F	% F Acumulado
	Lím. inferior	Lím. superior					
1	3459,24	3536,64	3497,94	3	3	10,00%	10,00%
2	3536,64	3614,04	3575,34	9	12	30,00%	40,00%
3	3614,04	3691,45	3652,75	11	23	36,67%	76,67%
4	3691,45	3768,85	3730,15	4	27	13,33%	90,00%
5	3768,85	3846,26	3807,55	1	28	3,33%	93,33%
6	3846,26	3923,66	3884,96	2	30	6,67%	100,00%

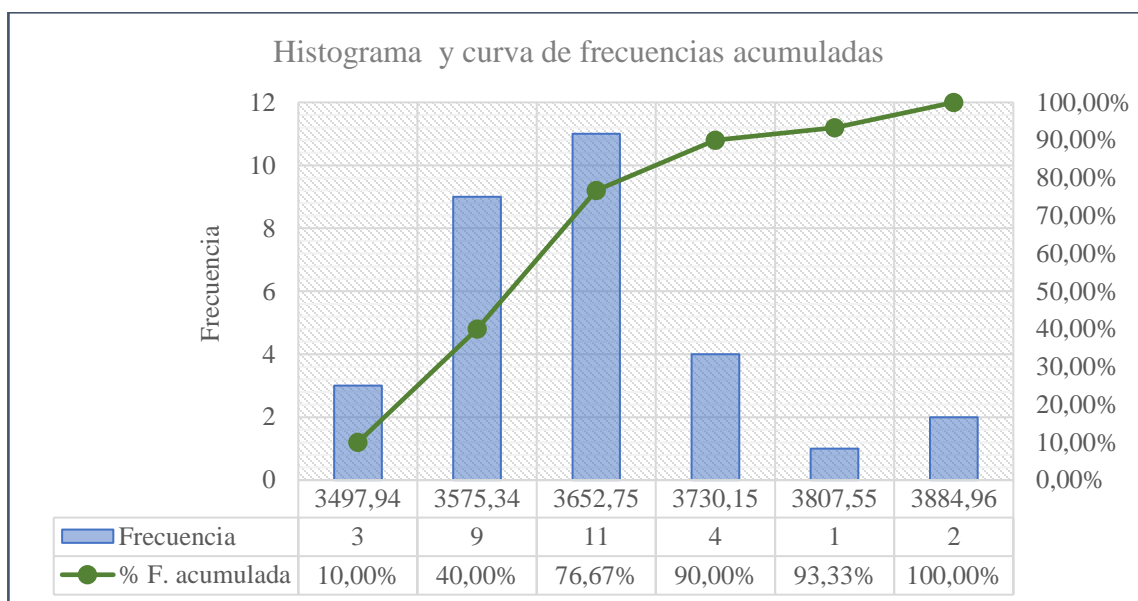
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.4. Determinación del histograma y polígono de frecuencias.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.5. Determinación de la curva de frecuencia acumulada



Fuente: Elaboración propia.

- Cálculo de medias de tendencia central:

Tabla 4.7. Resultados de medidas de tendencia central de los ensayos de estabilidad

Medida de tendencia	Resultado	Unidad
Media	3648,76	libras
Error típico	18,20	libras
Mediana	3625,77	libras
Desviación estándar	97,98	libras
Varianza de la muestra	9600,81	-
Curtosis	1,22	-
Coefficiente de asimetría	0.89	-
Rango	437,07	libras
Mínimo	3459,24	libras
Máximo	3923,66	libras
Suma	105814,15	libras
Cuenta	30.00	-
Nivel de confianza (95.0 %)	37,27	-

Fuente: Elaboración propia.

Estadística inferencial

A partir de los datos de estadística descriptiva, para calcular la estadística inferencial se aplica el método de t de Student, como se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 4.8. Cálculo de error medido de la media

Error medido de la media	e=	95%
Para Nivel de confianza = 95%	Z=	1.96
Error típico	Ex=	18,20
Error probable	Ep=	35,06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9. Cálculo del rango de confianza

Rango de confianza	Va= $X \pm Ep$
Va = $3648,76 + 35,06 =$	3683,83 lbf
Va = $3648,76 - 35,06 =$	3613,70 lbf

Fuente: Elaboración propia

Intervalo de confianza: 3613,70 lbf - 3683,83 lbf

– Asociación de hipótesis de investigación:

Hipótesis de investigación causal/explicativa:

“Si, en una mezcla asfáltica, utilizamos cemento asfáltico modificado con polímero Etileno Vinil Acetato (EVA), entonces se mejorarán sus propiedades en comparación a otra mezcla con cemento asfáltico convencional”.

Hipótesis Alterna $\rightarrow H_1: \bar{x} > u$ Estabilidad_{mín}

Donde:

u = Estabilidad mínima que especifica la norma para tráfico pesado igual a 1800 lbf.

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

Hipótesis Nula $\rightarrow H_0: \bar{x} \leq$ Estabilidad_{mín}

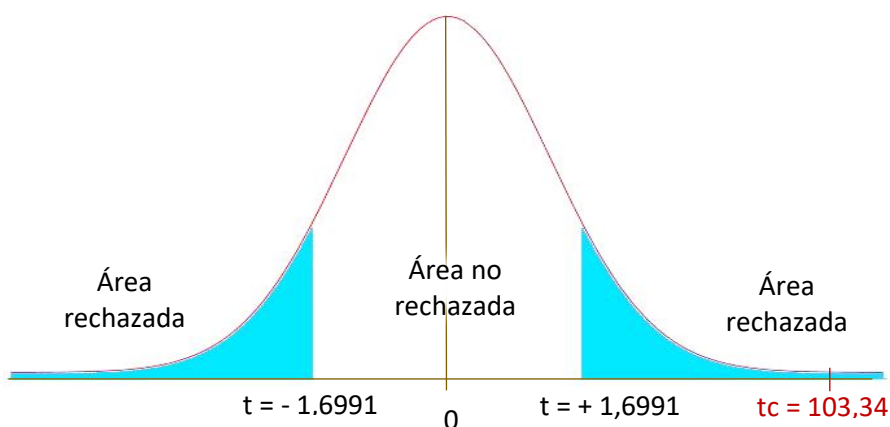
Su interpretación es: “Si, en una mezcla asfáltica, utilizamos cemento asfáltico modificado con polímero Etileno Vinil Acetato (EVA), entonces NO mejorarán sus propiedades en comparación a otra mezcla con cemento asfáltico convencional”.

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

Prueba de hipótesis			
Hipótesis Nula	$H_0 : \bar{x} \leq 1800$	libras	
Hipótesis Alterna	$H_1 : \bar{x} > 1800$	libras	
Significancia	$\alpha =$	0.05	
Media muestral	$\bar{x} =$	3648,76	libras
Numero de datos	$n =$	30	
Desviación estándar	$s =$	97,98	
Media muestral	$u =$	1800	libras
Grado de libertad	$GL =$	29	
T teórico	$t\alpha =$	± 1.6991	
T calculado	$t_c =$	103,34	
$t_c > t\alpha \rightarrow$ Se rechaza la hipótesis nula y Se acepta la hipótesis alterna			

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1. Área de rechazo de la hipótesis



Fuente: Elaboración propia

Debido a que el valor $t_c > t\alpha$ se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir que la goma E.V.A. sí mejora las propiedades de la mezcla asfáltica.

4.4 Análisis de precios unitarios de mezcla convencional y modificada

RENDIMIENTO DE LOS COMPONENTES DE UNA CARPETA ASFÁLTICA

1. Descripción

Tipo de ligante asfáltico = Cemento Asfáltico 85/100
 Tipo de modificante = Goma E.V.A. al 2,5%
 Densidad de la mezcla (kg/m³) = 2.390

2. Volumen de producción por m²

Unidad = m²
 Largo (m) = 1
 Ancho (m) = 1
 Espesor (m) = 0,05
 Volumen compactado (m³) = 0,05
 Esponjamiento (%) = 35
 Volumen suelto (m³) = 0,068

3. Dosificación

Cantidad total de mezcla por m²:

Componente	Proporción en la Mezcla (%)	Cantidad (Kg)
Ligante Asfáltico modificado	5,56	8,97
Agregado	94,44	152,36
Total	100	161,33

Cantidad de agregado por m²:

Agregado	Proporción de diseño granulométrico (%)	Proporción en Mezcla (%)	Cantidad (Kg)	Peso específico (%)	Volumen (m ³)
Grava	26,0	24,55	39,61	2.886	0,014
Gravilla	30,0	28,33	45,71	2.875	0,016
Arena y filler	44	41,55	67,04	2.876	0,023
Total	100	94,44	152,36	-	-

4. Rendimientos por m² de carpeta asfáltica:

Componente	Rendimiento	Unidad
Ligante Asfáltico	8,97	Kg
Grava	0,014	m ³
Gravilla	0,016	m ³
Arena	0,023	m ³
Goma E.V.A.	0,938	Kg

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

MEZCLA CON ASFALTO CONVENCIONAL

Actividad: Carpeta asfáltica de espesor 5 cm
Tipo de ligante asfáltico: Cemento asfáltico 85/100
Unidad: m²
Cantidad: 1

A	MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
-	Cemento asfáltico 85/100	kg	8,97	7,31	65,55
-	Grava triturada 3/4"	m ³	0,014	110,00	1,51
-	Gravilla triturada 3/8"	m ³	0,016	125,00	1,99
-	Arena triturada	m ³	0,023	140,00	3,26
-	Gasolina	lt	0,85	3,74	3,18
D	TOTAL, MATERIALES			(A)	75,49
B	MANO DE OBRA				
-	Capataz	Hr	0,050	10,00	0,50
-	Operador de planta de asfalto	Hr	0,085	9,00	0,77
-	Operador terminadora de asfalto	Hr	0,080	9,00	0,72
-	Operador vibrocompactador liso	Hr	0,075	9,00	0,68
-	Operador compactador neumático	Hr	0,070	9,00	0,63
-	Operador cargador frontal	Hr	0,075	8,00	0,60
-	Chofer	Hr	0,080	8,00	0,64
-	Ayudante de maquinaria	Hr	0,075	4,50	0,34
-	Peon	Hr	0,055	8,00	0,44
E	SUBTOTAL MANO DE OBRA			(B)	5,31
F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	3,78
O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F)=	1,36
G	TOTAL, MANO DE OBRA			(E+F+O)=	10,44
C	EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0,0020	340,00	0,68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0,0045	280,00	1,26
-	Compactador neumático	Hr	0,0090	220,00	1,98
-	Compactador rodillo liso	Hr	0,0400	250,00	10,00
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0,0050	1.250,00	6,25
-	Volquete 10 m ³	Hr	0,0700	150,00	10,50
	Herramientas menores		5,00%	(G)	0,52
I	TOTAL, HERRAMIENTAS Y EQUIPOS			(C+H)	31,19
J	SUB TOTAL			(D+G+I)	117,12
L	GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS		15,50%	(J)	18,15
M	PARCIAL			(J+L)	135,28
N	UTILIDAD		10,00%	(M)	13,53
Q	TOTAL, PRECIO UNITARIO			(M+N)	148,81
	PRECIO FINAL				148,81

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON E.V.A. AL 2,5%

Actividad: Carpeta asfáltica de espesor 5 cm

Tipo de ligante asfáltico: Cemento asfáltico modificado con E.V.A.

Unidad: m²

Cantidad: 1

A	MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
-	Cemento asfáltico 85/100	kg	8,97	7,31	65,55
-	Grava triturada 3/4"	m ³	0,014	110,00	1,51
-	Gravilla triturada 3/8"	m ³	0,016	125,00	1,99
-	Arena triturada	m ³	0,023	140,00	3,26
-	Goma E.V.A.	kg	0,938	23,00	21,58
-	Gasolina	lt	0,85	3,74	3,18
D	TOTAL, MATERIALES			(A)	97,07
B	MANO DE OBRA				
-	Capataz	Hr	0,050	10,00	0,50
-	Operador de planta de asfalto	Hr	0,085	9,00	0,77
-	Operador terminadora de asfalto	Hr	0,080	9,00	0,72
	Operador vibrocompactador liso	Hr	0,075	9,00	0,68
	Operador compactador neumático	Hr	0,070	9,00	0,63
	Operador cargador frontal	Hr	0,075	8,00	0,60
-	Chofer	Hr	0,080	8,00	0,64
-	Ayudante de maquinaria	Hr	0,075	4,50	0,34
-	Peon	Hr	0,055	8,00	0,44
E	SUBTOTAL MANO DE OBRA			(B)	5,31
F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	3,78
O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F)=	1,36
G	TOTAL, MANO DE OBRA			(E+F+O)=	10,44
C	EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0,0020	340,00	0,68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0,0045	280,00	1,26
-	Compactador neumático	Hr	0,0090	220,00	1,98
-	Compactador rodillo liso	Hr	0,0400	250,00	10,00
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0,0050	1.250,00	6,25
-	Volquete 10 m ³	Hr	0,0700	150,00	10,50
	Herramientas menores		5,00%	(G)	0,52
I	TOTAL, HERRAMIENTAS Y EQUIPOS			(C+H)	31,19
J	SUB TOTAL			(D+G+I)	138,70
L	GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS		15,50%	(J)	21,50
M	PARCIAL			(J+L)	160,20
N	UTILIDAD		10,00%	(M)	16,02
Q	TOTAL, PRECIO UNITARIO			(M+N)	176,22
	PRECIO FINAL				176,22

Cuadro comparativo de precios unitario

Descripción	Precio Unitario para 1 m² (Bs.)	Incremento del costo (%)
Carpeta asfáltica con cemento asfáltico convencional 85/100	148,81	0%
Carpeta asfáltica cemento asfáltico modificado con goma E.V.A. al 2,5%	176,22	18,42%

Como se observa el costo más bajo lo tiene la mezcla con cemento convencional igual a 148,81 Bs. Y el costo más caro lo tiene la mezcla con cemento asfáltico modificado con E.V.A. al 2,5%, con un incremento del 18,42 %.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

De acuerdo con el estudio correspondiente al comportamiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas convencional y modificadas con polímero Etileno Vinil Acetato E.V.A. y según los resultados obtenidos, se dará a conocer las siguientes conclusiones:

- Una vez analizado comparativamente las propiedades mecánicas en mezclas asfálticas convencional modificada con el polímero Etileno Vinil Acetato (EVA), utilizando el método Marshall, y en base a los resultados obtenidos se pudo determinar variaciones de sus propiedades de resistencia y deformación; es decir en la estabilidad y la fluencia, obteniendo resultados significativos para la estabilidad.
- De acuerdo a la hipótesis planteada inicialmente se verificó en la investigación que utilizando cemento asfáltico convencional modificado con polímero Etileno Vinil Acetato (EVA) en una mezcla asfáltica, se mejora sus propiedades de resistencia y deformación en comparación a otra mezcla con cemento asfáltico convencional.
- Se identificaron las relaciones físicas que brinda las mezclas asfálticas convencional y modificadas con EVA, donde se aprecian un peso específico dentro de los rangos esperados por la Norma AASTHO.
- Al analizar los resultados obtenidos de Estabilidad y fluencia queda demostrado que la mezcla asfáltica elaborada con asfaltos modificados posee un mejor comportamiento que las mezclas elaboradas con asfalto convencional, tal como se esperaba, ya que la finalidad de modificar el asfalto es mejorar sus propiedades.
- De acuerdo a los ensayos realizados se pudo observar que la fluencia en una mezcla asfáltica modificada se encuentra por debajo de la convencional, el Asphalt-Institute-MS2-7th-Edition-Asphalt-Institute-Mix-Design indica que: Si el flujo en el contenido de ligante óptimo seleccionado está por encima del límite superior especificado, la mezcla se considera demasiado plástica o inestable. Si el flujo está por debajo del límite inferior especificado, la mezcla se considera

demasiado frágil. Para los porcentajes de 0,50 % y 2,50 % de polímero en una mezcla asfáltica, cumple con la especificación en cuanto a fluencia; es decir, se encuentran dentro del rango permisible de 8 a 14 (0,01 pulg.).

- Se realizó el diseño de las mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de EVA para determinar el rendimiento máximo en resistencia y deformación, así mismo se establece la reducción en el empleo de asfalto convencional remplazando con un 2,5% de EVA en función al peso del asfalto agregado, logrando resultados superiores al tradicional.
- Se realizó el diseño de las mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall variando las cantidades de cemento asfáltico convencional y se encontró el contenido óptimo de cemento asfáltico, el cual es de 5,56 %.
- De acuerdo a los resultados de estabilidad, el porcentaje adecuado de polímero E.V.A. a partir del 5,56% de porcentaje óptimo de cemento asfáltico convencional, es de 2,50% ya que con este porcentaje se presenta el mayor valor de estabilidad.
- Se determinó que las mezclas asfálticas modificadas con un porcentaje máximo de 3,0% de EVA la fluencia (deformación) se encuentra por debajo del rango permisible por lo tanto en este caso la mezcla pasaría a considerarse frágil.
- Se comparó las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas a partir de un tratamiento estadístico inferencial donde la muestra de promedio es cercana a la dispersión de datos, se realizó una prueba de bondad donde los datos se ajustan para una densidad de área Normal, con un 95% de confianza se obtuvieron los resultados que representan a la población.
- El precio unitario de la mezcla modificada con polímero es más costoso con un incremento del 18,42% respecto a la mezcla convencional. A pesar del costo, su uso es favorable desde el punto de vista costo-beneficio, porque se verifica que la mezcla con polímero E.V.A. tiene mejores propiedades que permiten prolongar la vida útil de cualquier tramo carretero que aplique este tipo de mezcla asfáltica modificada.

5.2 Recomendaciones

Recomendaciones para mejorar y continuar las investigaciones:

- En el presente trabajo de investigación, se realizó una variedad de ensayos de acuerdo a normas y manuales tanto nacional como internacional, para poder desarrollar de mejor manera este cometido.
- Con un estudio de esta índole se pueden llevar a cabo propuestas de mantenimiento de calles y así evitar que el daño se propague y aumenten los costos de mantenimiento.
- Los criterios de flujo a menudo se exceden cuando se utilizan polímeros modificados, por lo tanto, se debe omitir el límite superior de los criterios de flujo cuando se utilizan asfaltos modificados con polímeros o modificados con caucho.
- Para garantizar la calidad de las mezclas asfálticas se deberá utilizar cuidadosamente todos los materiales y equipos para evitar daños y/o errores en la elaboración de las muestras puestas en las briquetas.
- Se deberá realizar las mediciones cuidadosamente de los pesos de las muestras a diseñarse, de manera que pueda ser más exacto en el diseño para hallar el porcentaje óptimo y así realizar su respectiva comparación.
- Se recomienda ser muy cuidadosos al momento de trabajar con mezclas asfálticas, ya que se trabaja a altas temperaturas, se debe utilizar el equipo de seguridad necesario para la manipulación de los materiales.