

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO

1.1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el polietileno de alta densidad se utiliza mucho en nuestro entorno, por su estructura muy resistente y económica para, envases de limpieza, en tuberías de alta resistencia, al tener una gran demanda en los hogares y en las empresas de construcciones civiles se produce una gran cantidad de residuos que no se recicla de la mejor manera, en la parte de las tuberías de alta densidad es el mayor problema por sus dimensiones no se puede reciclar, la mayor parte de la población opta por guardarlas o desecharla en área abandonada, en el presente trabajo se analizará el uso de los residuos de polietileno en el cemento asfáltico como agente modificador, y poder darle un buen uso a los residuos de polietileno de alta densidad.

Dicha investigación se basa en trabajos similares que vinieron investigando de cómo mejorar el cemento asfáltico con polímeros en el país de Colombia que se realizó (Caracterización física de un ligante asfáltico 60/70 modificado con desechos de polietileno de alta densidad (D-PEAD)), del cual se obtuvieron buenos resultados.

En el presente trabajo el objetivo principal es analizar la propiedad de la consistencia de un cemento asfáltico, si se incrementa al adicionar los residuos de polietileno de alta densidad, que servirá como modificador, el cual se analizará con ensayos en los laboratorios de asfaltos.

Su relevancia social es de proporcionar un cemento asfáltico con mejoras, en sus propiedades físico-mecánicas, nos dará una garantía en su durabilidad y mayor consistencia, beneficiará de gran manera en el área de las obras civiles, que hacen uso del cemento asfáltico, como también se podrá reducir la contaminación que produce el polietileno de alta densidad, a nuestro medio ambiente, que cada día va creciendo los posos sanitarios que contienen residuos plásticos de diferentes polímeros.

1.2. ANTECEDENTES

La necesidad de reducir la cantidad de residuos de polietileno que se presenta en nuestros medios, motivó a realizar una investigación de como reutilizar el polietileno de alta

densidad, para aplicarlo como un refuerzo al cemento asfáltico, dado que el polietileno de alta densidad es un termo-plástico producido a partir del fraccionamiento del petróleo.

En vista de la necesidad de un cemento asfáltico más resistente surgieron diferentes investigaciones que analizaron la modificación del cemento asfáltico con diferentes materiales derivados del petróleo, como son los polímeros, que tiene sus derivados como los plasto mero y elastómeros, que son los principales materiales que se analizaron por sus propiedades que pueden aportar si se adicionan al cemento asfáltico entre los más usados son el caucho, S.B.S(estireno, butadieno, estireno), E.V.A. (etileno-acetato de vinilo), P.V.C. (poli cloruro de vinilo), P.E.(polietileno).

La investigación se basa en un trabajo realizado en el país de Colombia “Evaluación de las propiedades físicas de un cemento asfáltico 60/70 modificado con residuos de la fabricación de productos con polietileno de baja densidad”, que trabajaron con residuos de polietileno de baja densidad, su objetivo principal es evaluar las propiedades físicas del cemento asfáltico con residuos de productos de polietileno de baja densidad, en dicha investigación se concluyó que al añadir el modificador al cemento asfáltico las propiedades de la consistencia, la temperatura de fluidez, la recuperación elástica y la viscosidad se incrementan, lo cual da una base de respaldo para realizar el presente trabajo de investigación.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Debido a que hoy en día se sigue optando por el uso del cemento asfáltico convencional en la elaboración de mezclas asfálticas convencionales sin realizar un análisis de los principales cambios que está pasando el país, en lo industrial y climático, el aumento del flujo vehicular, las elevadas temperaturas, son los principales factores que afectan las carreteras haciendo que se deterioren rápidamente, por tal motivo se busca mejorar una de las principales propiedades la consistencia del cemento asfáltico que es la que proporciona la capacidad de fluir y poder adherirse al agregado, la dureza para soportar las cargas sobre la capa de rodadura y a la temperatura que es susceptible, muy importantes en una mezcla asfáltica. se eligió para reforzar la propiedad de la consistencia un material reciclado que es el (HDPE) que hoy en día nuestro país importa una gran cantidad y solo recicla un 9% según el (UPAB).

El propósito de la investigación es aportar al conocimiento existente, sobre el uso de los cementos asfálticos modificados con materiales reciclados (HDPE), como instrumento de uso para todos los profesionales, empresas y distintas instituciones relacionadas a la ingeniería civil que se dedican tanto al diseño, así como a la construcción vial, se describirá la caracterización y el proceso de modificación, con la finalidad de proyectar en un futuro que se pueda usar los cementos asfálticos modificados con materiales reciclados en las construcciones civiles.

Se busca desarrollar un cemento asfáltico más resistente y duradero que pueda suplir las necesidades de las que carecen los cementos asfáltico convencionales, al adicionar el residuo del polietileno de alta densidad se busca que funcione como agente que refuerce las propiedades físico-mecánicas del cemento asfáltico principalmente la consistencia que le proporciona la dureza , y la capacidad de fluir a una determinada temperatura, el objetivo se lograra al precisar un porcentaje de adición del residuo de (HDPE) que mejore las propiedades del cemento asfáltico.

El principal efecto positivo en la sociedad, se proporcionaría carreteras más seguras y de mayor durabilidad, dado que el cemento asfáltico es el principal componente de un pavimento flexible, que beneficiara de gran manera al desarrollo de la economía del país. Con el uso del residuo de polietileno de alta densidad se mitigará un pequeño porcentaje de la contaminación que producen anualmente en nuestro país, reciclándolo y reutilizándolo como modificar del cemento asfáltico.

1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.4.1. Situación problemica

Los residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) pueden someterse a un reciclado, gracias a sus propiedades, es una alternativa que se tiene para mejorar la propiedad de la consistencia del cemento asfáltico.

La consistencia del cemento asfáltico al adicionar residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) en porcentaje se expresan como mejoras en el grado de fluidez a mayores temperaturas y la dureza a temperatura ambiente, del cemento asfáltico, que son las características principales de la consistencia que se necesita para la mejor aplicación en las obras civiles.

El no realizar la prueba, no se podrá estimar los porcentajes óptimos que se requieran para mejorar la propiedad de la consistencia teniendo la incertidumbre si podrá mejorar el cemento asfáltico.

El análisis servirá como referencia para la utilización del residuo de polietileno de alta densidad como: agente de mejora en las propiedades del cemento asfáltico y la reducción de polietileno desechados lo cual se trata de reutilizar para un beneficio que es el refuerzo de un cemento asfáltico con un material reciclado.

1.4.2. Delimitación del tiempo

El fenómeno ocurre en tiempo presente.

1.4.3. Delimitación del espacio

- Área de trabajo: asfaltos.
- Base de operaciones: laboratorio de asfaltos.

1.4.4. Formulación del problema

¿De qué manera influye en la consistencia del cemento asfáltico, la adición de residuos de polietileno de alta densidad?

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Analizar la consistencia del cemento asfáltico; considerando la adición de residuos de polietileno de alta densidad; con la finalidad de precisar su comportamiento y mejoras en otras propiedades relacionadas.

1.5.2. Objetivo específicos

- Recopilar información sobre cementos asfálticos modificados con polímeros.
- Caracterizar las muestras de los residuos de polietileno de alta densidad.
- Determinar con diferentes porcentajes la optimización de la combinación de cemento asfáltico con los residuos de polietileno de alta densidad.
- Verificar el comportamiento del cemento asfáltico, mediante un número confiable de pruebas.
- Evaluar si el cemento asfáltico presenta ventajas y mejoras en otras propiedades.
- Elaborar mediante el método Marshall, una mezcla asfáltica con cemento asfáltico normal y otra con el porcentaje óptimo del cemento asfáltico modificado con residuos de polietileno de alta densidad (HDPE).

- Evaluar los parámetros mecánicos, de la mezcla asfáltica con cemento asfáltico modificado con (HDPE), en comparación con una mezcla asfáltica con cemento asfáltico normal.

1.5.3. Hipótesis

Cantidad óptima de residuos de polietileno de alta densidad mejoran la consistencia de los cementos asfálticos.

- Variable independiente: cantidad de residuos de polietileno de alta densidad
- Variable dependiente: consistencia del cemento asfáltico (viscosidad, penetración)

1.5.4. Conceptualización de variable

Cantidad de residuo de polietileno de alta densidad: Es un modificador que se empleará para mejorar el cemento asfáltico.

Consistencia de cemento asfáltico: Es la capacidad que tiene de adherir y mantener unidos los agregados cuando son sometidos a fuerzas externas.

Tabla 1.1: Variable dependiente y variable independiente

Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Consistencia del cemento asfáltico	Valor de la fluidez	seg.	Viscosímetro
	Valor de la dureza	0,1mm	Equipo de penetración

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Cantidad de residuos de polietileno de alta densidad	Valor de adición	%	Molido mecánico
			Granulometría

Fuente: Elaboración propia

1.5.5. Alcance

El presente trabajo corresponde al tipo de investigación aplicada, a un nivel de investigación que tiene un alcance causal o explicativo con diseño experimental en la categoría cuasi-experimental donde llegaremos a describir las causas, por qué y el cómo se dan los fenómenos, manipulando la variable independiente, para analizar si al adicionar los residuos de polietileno de alta densidad el cemento asfáltico presenta ventajas para su aplicación en obras civiles.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se pretende indagar en los conceptos básicos y enfoques teóricos relacionados con el cemento asfáltico, así como también definiciones básicas de las propiedades de los cementos asfálticos y su clasificación, reciclaje del polietileno de alta densidad técnicas de aprovechamiento.

2.1.1. Cemento asfáltico

Este material es una sustancia que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo, del cual es su residuo en el proceso de destilación.

Los asfaltos naturales se encuentran en depresiones de la corteza terrestre formando los lagos de asfalto o aparecen impregnados en calizas, formaciones de areniscas o similares, formando las llamadas rocas asfálticas, también se encuentran mezclados por impurezas minerales, como, por ejemplo, los depósitos naturales en el lago Asfaltites (de ahí su nombre) o mar Muerto. El cemento asfáltico es un material al que los ingenieros civiles del Departamento de Tarija destinan un amplio, y funcional, número de aplicaciones en la actualidad. Se emplea significativamente en la construcción de carpetas, superficie de rodamiento; revestimientos de obras hidráulicas, impermeabilización de edificaciones, etc. Se utiliza en mezclas asfálticas como aglomerante o ligante para la construcción de caminos, mezclando usualmente con áridos pétreos. Cemento asfáltico es el material aglomerante sólido o semisólido de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse y cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados, que se obtienen de la refinación del petróleo, cuyo comportamiento visco-elástico.

2.1.2. Refinación del petróleo

Los procesos de refinación para la obtención de asfaltos, dependen del rendimiento en asfalto que presenta el petróleo. En los petróleos que presentan bajo rendimiento, se utiliza la destilación en dos etapas: una a presión atmosférica, seguida de otra al vacío. Si el rendimiento del asfalto es alto, basta la etapa de destilación al vacío. Si se tuviese en un depósito alcohol y agua y éste se llevase a calentar, a 72°C aprox. El alcohol comenzaría

a evaporarse. Cuando la temperatura alcance los 100°C el agua se evaporaría de manera similar se refina el petróleo. Mediante el incremento paulatino de temperatura el crudo del petróleo se descompone liberando los solventes más livianos, como la gasolina, el kerosene y el diésel. Para separar los destilados más pesados, no solo es necesario incrementar la temperatura sino someterlo a vacío luego de un periodo de tiempo se obtendrá el cemento asfáltico.

2.1.3. Composición química del cemento asfáltico

El cemento asfáltico posee características tanto químicas como físicas, que son los elementos que los proveen todas sus particularidades y hacen de este producto esencial que es hoy en la industria de la construcción. Este cementante contiene tres importantes propiedades químicas: consistencia, pureza y seguridad, donde la primera se debe a su habilidad para fluir a diferentes temperaturas, esto en razón a que el asfalto es un material termoplástico, es decir, se fluidifica a altas temperaturas. La segunda define la composición química del asfalto, donde las impurezas de éste, son prácticamente inertes. La tercera precisa el comportamiento de afinidad química con las diferentes cargas eléctricas. De la misma manera, dentro de su composición química contiene características de aglutinación, debido a su constitución principalmente de asfáltenos y máltenos, que son los elementos que le proporcionan dichas particularidades; este último define la capacidad del asfalto para ser manejado a altas temperaturas con seguridad.

2.1.3.1. Asfáltenos

Los asfáltenos le dan al asfalto las propiedades de elasticidad y rigidez a distintas temperaturas, su color y dureza.

2.1.3.2. Máltenos

Los máltenos se disuelven en el heptano, son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro.

2.1.4. Propiedades físicas - mecánicas del asfalto

2.1.4.1. Consistencia

Se refiere a la dureza del material, la cual depende de la temperatura a la que se exponga el asfalto. A altas temperaturas se considera el concepto de viscosidad para definirla y caracterizarla.

2.1.4.2. Endurecimiento y envejecimiento

Los asfaltos tienden a endurecerse aumentando sus características de consistencia en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder minimizar el endurecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

2.1.4.3. Durabilidad

Es una medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

2.1.4.4. Adhesión y cohesión

La adhesión se refiere a la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla asfáltica. Cohesión por otro lado, es la capacidad del asfalto de mantener firme las partes del agregado en el pavimento terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunas como relacionadas con la adhesión y la cohesión. En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica – no califica”, y sólo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos.

2.1.4.5. Susceptibilidad a la temperatura

Es el asfalto un material termoplástico se vuelve más viscoso (duro) a menor temperatura y menos viscosos (blando) conforme la temperatura aumenta.

Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura o tasa de variación de viscosidad con la temperatura y es una de las propiedades más valiosas de un asfalto.

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizada pues indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera.

Debe entenderse que es de vital importancia conocer las características de viscosidad de un asfalto en todo el rango de temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación.

2.1.5. Ensayos para medir la consistencia de los cementos asfálticos

La consistencia se define como el grado de fluidez que tiene el cemento asfáltico a una determinada temperatura. El cemento asfáltico es un material termoplástico por lo que su consistencia varía en mayor o menor grado con la temperatura. Si se quiere realizar comparaciones entre ellos, es necesario medir su consistencia a una misma temperatura e igual condición de carga. Los ensayos más utilizados para medir la consistencia de los cementos asfálticos son los siguientes:

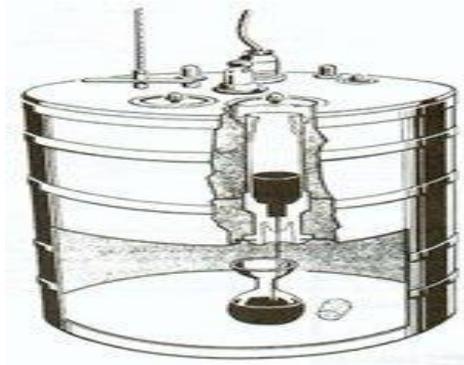
- Viscosidad
- Penetración

2.1.5.1. Viscosidad

La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a la temperatura que se emplea durante su aplicación. La viscosidad o consistencia del asfalto se mide en el ensayo de viscosidad Saybolt-Furol, se emplea un viscosímetro Saybolt con orificio furol. Se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho una cantidad específica de asfalto. Como la temperatura a que se determina la viscosidad de los asfaltos son frecuentemente superior 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 viscoso son los materiales más tiempo es necesario para que pasen a través del orificio. La figura 2 representa el procedimiento del ensayo. Los valores obtenidos se expresan como segundos Saybolt-Furol (SSF). Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método ASTM E-102.

Figura 2.1: Equipo viscosímetro

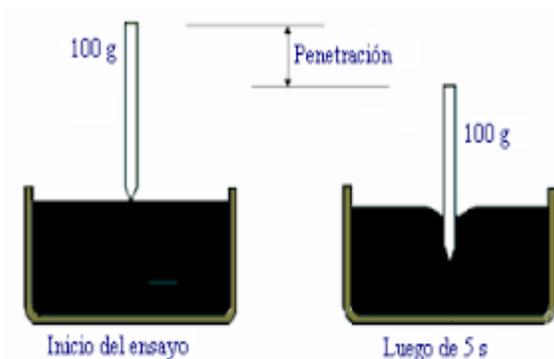


Fuente: Principio de construcción de pavimento de mezcla asfáltica en caliente pag. 21

2.1.5.2. Penetración

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetre verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otra condición, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100 gr y que la carga se aplica durante 5 s. 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.

Figura 2.2: Ensayo de penetración



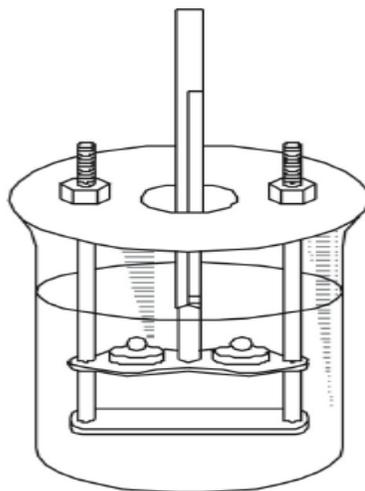
Fuente: Principio de construcción de pavimento de mezcla asfáltica en caliente pag. 16
Los asfaltos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración. El Instituto de Asfalto ha adoptado cuatro grados de asfalto para pavimentación con penetraciones comprendidas dentro 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.

2.1.6. Ensayo de punto de ablandamiento

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 pavimentos, 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 dos anillos de latón de dimensiones normalizadas. Las muestras así preparadas se suspenden de un baño de agua destilada 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 de 5°C por minuto y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero caiga desde una distancia de 25 mm. 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.

Figura 2.3: Ensayo de punto de ablandamiento

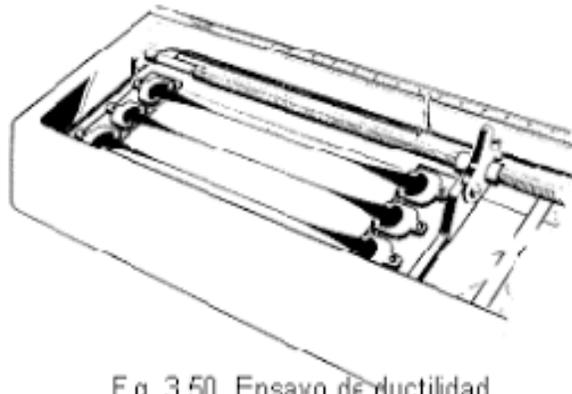


Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales asfalto

2.1.7. Ensayo de 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 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, consiste en moldear en condiciones y con dimensiones normalizadas una probeta de asfalto que después se somete a la temperatura normalizada del ensayo y se somete a alargamiento con una velocidad especificada hasta que el hilo que une los dos extremos 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 el método ASTM D-113.

Figura 2.4: Ensayo de ductilidad



F g. 3.50 Ensayo de ductilidad

Fuente: Principio de construcción de pavimento de mezcla asfáltica en caliente pag. 26

2.1.8. Ensayos para determinar la pureza del cemento asfáltico

Los cementos asfálticos están constituidos casi siempre por bitumen puro, el cual por definición es complemento soluble en disulfuro de carbono. Sólo un porcentaje muy pequeño de impurezas está presente en el cemento asfáltico obtenido de refinería para determinar el grado de pureza del asfalto se utiliza el ensayo de solubilidad. Los máltenos,

los constituyentes cementantes (resinas) y los asfáltenos, son solubles en disulfuro de carbono, tricloroetileno, tetracloruro de carbono y otros solventes orgánicos de bajo punto de ebullición, mientras que la materia inerte (no cementante) como sales, carbón libre o impurezas orgánicas son insolubles en estos solventes.

Una muestra de cemento asfáltico de peso conocido es disuelta en tricloroetileno y se pasa a través de un goosh con asbesto. El material retenido en el filtro se lava varias veces y la parte insoluble constituye las impurezas el cemento asfáltico. Las especificaciones por lo general exigen un mínimo de 99 % de solubilidad en tricloroetileno.

2.1.9. Ensayos de seguridad

2.1.9.1. Punto de inflamación

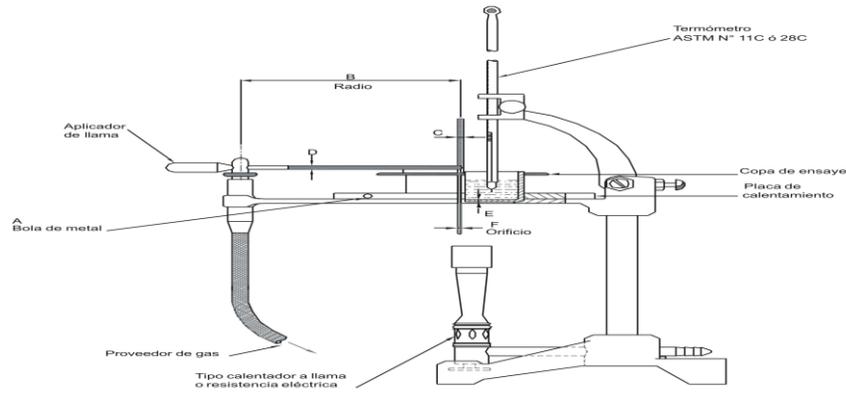
Conocido también como punto de chispa es la temperatura a la cual el cemento asfáltico puede ser calentado sin peligro de incendio en presencia de una chispa.

Esta temperatura es más baja que la correspondiente al punto de llama, la cual es la temperatura a la que el asfalto se enciende aunque el punto de chispa es mucho más alto que la temperatura de manejo del cemento asfáltico en una planta, es necesario conocerla y controlarla por razones de seguridad, ya que es muy posible que el producto sufra alguna contaminación durante el transporte de la refinería a la obra, lo cual produce un descenso en la temperatura correspondiente al punto de inflamación (por ejemplo un carro tanque mal lavado con residuos de gasolina u otros solventes livianos).

El método de la Copa de Cleveland es utilizado para determinar el punto de flasch o punto de inflamación. La copa de bronce se llena con un volumen especificado de cemento asfáltico y se calienta a una velocidad prefijada. Se pasa sobre la superficie del asfalto una llama auxiliar a intervalos de tiempos definidos.

La temperatura a la cual el asfalto libera suficientes vapores para producir chispa o destellos instantáneos al paso de una pequeña llama, se define como punto de inflamación o punto de flash.

Figura 2.5: Equipo de punto de inflamación cuchara de Cleveland



Fuente: Manual de ensayos de suelos y material asfalto

2.1.9.2. Ensayo de peso específico

Se define como la relación entre la masa del material a una temperatura dada y la masa de igual volumen del agua a la misma temperatura. El peso específico cambia cuando el asfalto se expande por calentamiento.

La determinación del peso específico del cemento asfáltico a diversas temperaturas es de gran interés práctico por sus numerosas aplicaciones en las que es preciso emplear una cantidad determinada del material caliente, siendo más fácil medir volúmenes que pesos. El peso específico del cemento asfáltico varía según su origen y proceso de obtención, manteniéndose siempre sensiblemente igual a la unidad. En asfaltos del mismo origen, el peso específico aumenta cuando la penetración disminuye. El método del picnómetro es el más utilizado para su determinación. Generalmente se expresa en términos de peso específico a una temperatura dada para ambos materiales: agua y cemento asfáltico. Un peso específico de 1.030 a 25 ° C significa que el cemento asfáltico tiene un peso específico de 1.030 cuando el agua y el cemento asfáltico están a una temperatura de 25 ° C.

2.1.10. Influencia de los componentes químicos del asfalto en sus propiedades

Los asfáltenos contienen las moléculas más pesadas del asfalto con un carácter aromático muy marcado, presentándose un descenso de esta característica en la serie resinas y aceites. Los asfáltenos están formados por hidrocarburos aromáticos con muy pocas

cadena parafinicos, con cierto número de anillos aromáticos, elevado en las resinas pasadas y reducido en aceites ligeros.

Los asfáltenos son los responsables de la dureza de los asfaltos. Las resinas le proporcionan sus características cementantes o aglutinante, mientras que los aceites la consistencia necesaria para hacerlos trabajables.

Los aceites son líquidos poco viscosos, de color claro, no adherentes, muy estables y semejantes a los aceites lubricantes. El asfalto debe gran parte de su deformabilidad a este componente, pues permite el desplazamiento entre micelas. Por su parte, las resinas son cuerpos translucidos, semisólidos y muy adherentes. Su adhesividad se debe al contenido de aromáticos y a los ácidos naftenicos.

Los asfáltenos son intrínsecamente muy adherentes, pero al estar rodeados por una cortina de resinas no intervienen directamente en la adherencia con los materiales pétreos. Su presencia es fundamental en las propiedades mecánicas del asfalto, pues el alto poder de adsorción de las resinas, proporciona a su núcleo una alta rigidez.

Las propiedades físicas del asfalto dependen de las proporciones de asfáltenos, resinas y aceites que contiene. Un asfalto con un alto contenido de aceites, se comportará como un fluido viscoso, ya que las micelas formadas por los asfáltenos rodeados de las resinas adsorbidas, flotarán en el líquido aceitoso sin tocarse. Cuando el asfalto es sometido a los efectos del calentamiento en la planta, se va presentando una reducción gradual de los aceites, hay un acercamiento entre los núcleos de los asfáltenos y la fricción originada hace que el asfalto incremente su viscosidad. Como se puede observar, es muy importante la proporción en que intervienen cada uno de estos componentes en la consistencia del asfalto.

En los cementos asfálticos normales hay un predominio de los asfáltenos y las resinas, ante un bajo contenido de aceites

También mediante un proceso de oxidación, se pueden modificar las cantidades de estos componentes en el asfalto. Mediante este fenómeno, los aceites se convierten en resinas y estas en asfáltenos. Los aceites protegen al asfalto de la oxidación debido a su gran estabilidad química. Lo cual hace concluir que un asfalto que tenga un alto contenido de aceites será más resistente al envejecimiento y más durable, pero será igualmente muy deformable a temperaturas ordinarias. Es necesario entonces que exista un equilibrio en

esta composición, siendo lo ideal un asfalto poco deformable y durable o poco sensible al envejecimiento.

2.1.11. Control de las temperaturas de aplicación del cemento asfáltico

Como ya se conoce que el asfalto es un material termoplástico cuya viscosidad disminuye al crecer su temperatura. La relación entre la temperatura y la viscosidad, sin embargo, puede no ser la misma para diferentes orígenes o tipos y grados de material asfáltico.

Normalmente se especifican las temperaturas de aplicación para diversos empleos de los materiales asfálticos, pero como consecuencia de las variaciones de viscosidad, el especificar solamente la temperatura no es suficiente para hacer uso adecuado de los materiales. Por ello, el Instituto de Asfalto recomienda que se tenga en cuenta la relación viscosidad y temperatura de cada material asfáltico antes de fijar la temperatura adecuada para el tipo de procedimiento constructivo empleado.

La viscosidad más conveniente para la aplicación depende de varios factores, como:

- Tipo de aplicación (mezcla o riego)
- Características granulométricas de los áridos
- Condiciones atmosféricas (importante en la aplicación de riego)

Como consecuencia de estos factores variables, la viscosidad adecuada para una aplicación específica debe fijarse, por ensayo, dentro de márgenes ya normalizados.

La temperatura más adecuada para mezclado en instalación mezcladora es aquella a que la viscosidad del asfalto está comprendida entre 75 y 150 s Saybolt Furol.

2.2. CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO

La tecnología de los asfaltos y de las mezclas asfálticas modificadas ha sido ampliamente estudiada y utilizada en el mundo. Con la adición de polímeros u otros productos al asfalto se modifican las propiedades físico-mecánicas, química y reo lógicas de las mezclas asfálticas. Cuando se utiliza esta tecnología se pretende mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente. Por lo general las propiedades que se intentan mejorar son la rigidez y la resistencia bajo carga mono tónica, al ahuellamiento, a la fatiga y al envejecimiento, así como disminuir la susceptibilidad térmica y el daño por humedad. El uso de esta tecnología es también frecuente cuando es necesario que la superficie de la carretera posea una vida útil más larga de lo normal o en aplicaciones especializadas que

permitan espesores más delgados de capas asfálticas o disminuir dichos espesores (Casey et al., 2008).

La mayor parte de las investigaciones realizadas en el área de los asfaltos modificados utilizan como agentes modificadores polímeros del tipo elastómero. Este tipo de aditivo al ser agregado al asfalto mejoran principalmente el comportamiento resiliente (recuperación elástica) de las mezclas cuando son solicitadas a ciclos de carga y descarga. Estos materiales (elastómero) experimentan bajo carga una recuperación importante en la deformación.

2.2.1. Principales modificadores utilizados en el cemento asfáltico

Algunos tipos de elastómeros utilizados para la modificación del cemento asfáltico son el grano de caucho reciclado de llantas de neumático (GCR), látex natural, estireno-butadieno-estireno (SBS), y el estireno-butadieno-caucho (SBR).

Tabla 2.1: Clasificación de los polímeros

	Categoría 1	Categoría 2	Material
Materiales plásticos	Naturales	Termoestables	Rayón
		Termoplásticos	Arcilla
			Ceras
			Betunes
			(Otros)
	Sintéticos	Termoestables	Urea formol
			Melanina formol
			Poliésteres
			Silicona
			Resinas epóxido
		Termoplásticos	Polietileno (HDPE - LDPE)
			Poliestireno - PS
			Cloruro de polivinilo -PVC
			Acetato de celulosa CA-CAB
			Polipropileno
			Pmma (teflón)
Abs			
Nitrocelulosa			
Pc y Pom			

Fuente: Materiales plásticos manufactura

Existen otros tipos de polímeros como los plastos meros (P.E., polietileno de baja y alta densidad, poli cloruro de vinilo, polipropileno, poli estireno) que al ser adicionados al cemento asfáltico rigidizan la mezcla asfáltica y por lo general aumentan el grado de funcionamiento de esta a altas temperaturas de servicio. Tanto los elastómeros como los plastos meros están tipificados en una gama de polímeros denominados termoplásticos. Este tipo de polímero, a diferencia de los termoendurecibles, pueden ser reciclados y agregados a otros materiales a altas temperaturas sin perder significativamente sus propiedades. En los últimos años se ha incrementado el uso de materiales de desecho o reciclaje como aditivos modificadores de asfalto.

– **El cemento asfáltico modificado tipo I:**

Utiliza como modificadores polímeros del tipo etileno vinil acetato (EVA) o polietileno y se recomienda su utilización para fabricación de mezclas drenantes.

– **El cemento asfáltico modificado tipo II y III:**

Se recomienda para la fabricación de mezclas discontinuas y de concreto asfáltico en zonas de alta exigencia.

– **El cemento asfáltico modificado tipo IV:**

Se recomienda para fabricación de mezclas antirreflectoras como la del tipo arena-asfalto o riegos en caliente para membranas de absorción de esfuerzo.

– **El cemento asfáltico modificado tipo V:**

Se recomienda para la elaboración de mezclas de alto modulo.

Adicional a los ensayos ya descritos para caracterizar el cemento asfáltico, sobre asfaltos modificados se deben ejecutar los siguientes ensayos:

– Recuperación elástica por torsión a 25°C (INV. E-757-13/NTL 329/91). Ensayo utilizado para evaluar la respuesta elástica del asfalto modificado cuando es sometido a un esfuerzo de torsión y la temperatura de la muestra es de 25°C.

– Estabilidad al almacenamiento (INV. E-726-13/NLT -328/91). Cuando un cemento asfáltico modificado es almacenado a alta temperatura, el polímero modificador puede ubicarse en la zona superior o inferior del ligante dentro del tanque almacenador, generando un asfalto con propiedades no homogéneas.

2.2.2. Estructura de los asfaltos modificados

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímeros hinchados 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 continúa constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella. Esta micro morfología bifásica y las interacciones existentes entre las molecular 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 permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas temperaturas como a altas temperaturas.

2.3. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Es un polímero termoplástico formado por múltiples unidades de etileno.

El polietileno de alta densidad se obtiene por adición, es decir sumando distintas unidades de etileno. Sus moléculas apenas presentan ramificaciones, lo que le confiere una densidad molecular considerable que se traduce en una gran resistencia y dureza, así como una mayor tolerancia a las altas temperaturas.

Figura 2.6: Logotipo del polietileno de alta densidad



Fuente: Elaboración propia

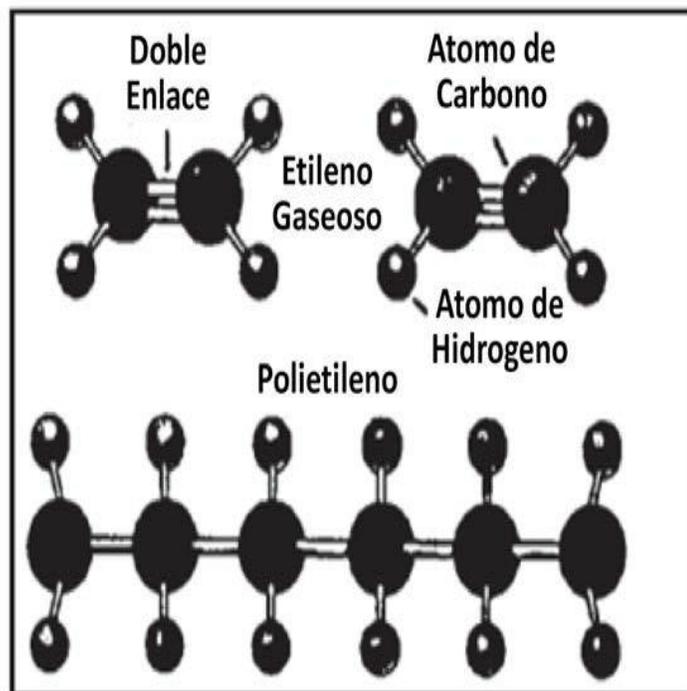
2.3.1. Composición química del polietileno

La estructura química del Polietileno es $-(CH_2-CH_2)-$. Esta molécula está compuesta en su unidad estructural por dos átomos de carbono y 4 átomos de hidrógeno unidos todos por enlaces de tipo covalente.

El polietileno de alta densidad, es un polímero con estructura lineal y muy pocas ramificaciones. Se obtiene por polimerización del etileno a presiones relativamente bajas utilizando catalizadores Ziegler-Natta o procesos phillis.

Es un polímero con densidad comprendida entre $0,941 - 0,954 \text{ gr/cm}^3$ es incoloro, inodoro, no tóxico y resistente tanto a esfuerzos como a agentes químicos.

Figura 2.7: Composición química del polietileno



Fuente: Ficha técnica Petroflex

2.3.2. Aplicaciones y usos

Las propiedades del polietileno de alta densidad (HDPE) lo hacen idóneo para fabricar objetos tan variados como tuberías, envases de productos de limpieza, tapones de envases de todo tipo.

Sus resistencias a las altas temperaturas y bajas temperaturas es lo que permite la fabricación de tuberías para fluidos y contenedores geotérmicos de (HDPE).

2.3.3. Características técnicas de una tubería de polietileno de alta densidad (HDPE)

Tabla 2.2: Ficha técnica de los tubos HDPE

Propiedad	Método de prueba	Valor típico	Unidad
Densidad (resina base)	ISO 1183	949	Kg/m ³
Densidad (compuesto)	ISO 1183	959	Kg/m ³
Índice de fluidez (190°C /5Kg)	ISO 1133	0,45	g/10min
Tensión máxima elástica	ISO 6259	25	Mpa
Alargamiento a la rotura	ISO 6259	>600	%
Módulo de elasticidad	ISO 527	1400	Mpa
T. de reblandamiento (1Kg)	ISO 306	127	°C
T. de reblandamiento (5Kg)	ISO 306	77	°C
Estabilidad térmica (OIT1), 210°C	ISO 10837	>20	min.
ESCR (10% Igepal), F50	ASTM D 1693-A	>10000	H
Contenido de negro de humo	ASTM D 1603	≥2	%

Fuente: Ficha técnica Petroflex

2.3.4. Normas de referencias

- NCh 398
- ASTM D 3350
- ISO 4427
- DIN 8074

Figura 2.8: Tubería de polietileno de alta densidad



Fuente: Ficha técnica Petroflex

2.4. DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer et al., 2004).

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

2.4.1. Mezcla asfáltica en caliente

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de

fabricación implica calentar el ligante y los agregados, y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior al ambiente.

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos, aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de betún asfáltico en volumen de agregados pétreos.

2.4.2. Diseño de una mezcla asfáltica

El diseño de mezclas asfálticas, así como el diseño de otros materiales de ingeniería, consiste principalmente en seleccionar y hacer proporciones de los componentes, para obtener las propiedades deseadas o especificadas en la construcción. El objetivo general para el diseño de mezclas asfálticas, es el determinar cada componente de la mezcla asfáltica, y el asfalto que resulte en una mezcla económica que tenga:

- Suficiente asfalto para asegurar durabilidad.
- Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.
- Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.
- Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.
- Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.

Estos requerimientos son materia de pruebas de rutina, especificaciones y técnicas de laboratorio que deben ser considerados, pero que no son técnicas para cualquier método de diseño en particular. Por lo que existen varios Métodos de Diseño de Mezclas, en nuestro caso solo hablaremos del método MARSHALL que por su accesibilidad a los equipos y por ser el más usado en el país.

2.4.3. Método Marshall

Los conceptos originales para el Diseño Marshall fueron desarrollados por Bruce Marshall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi, y rediseñado por El Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estado Unidos en los años 40. Después se hicieron avances

y el desarrollo de especificaciones de materiales por organizaciones como el Cuerpo de Ingenieros y el Instituto del Asfalto.

Como cualquier otro método de diseño de pavimentos, el punto de partida es obtener muestras de materiales representativos de aquellos que serán usados para el proyecto. Este método usa unas muestras estándar de 2 ½ pulgadas de alto y 4 pulgadas de diámetro. Estos se preparan usando un procedimiento específico para calentamiento, mezclado y compactado de las mezclas de agregado y asfalto.

Las dos características principales del método de Marshall, son las de análisis de densidad y vacíos en la mezcla y los resultados de estabilidad y flujo de las muestras compactadas.

2.4.4. Preparación de muestras de ensayo

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenido de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado por el método de área superficial donde se calcula un contenido de cemento asfáltico mínimo, que se usa como dato de partida junto con los agregados de la mezcla.

Este margen se usa en laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final.

Las mezclas se preparan de la siguiente manera:

- 1- El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- 2- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de mezcla al golpearla.
- 3- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50, ó 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada biqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente, un total de 70 golpes; una probeta de 50 golpes recibe

100 impactos y una probeta de 75 golpes recibe 150 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

2.4.5. Procedimiento del ensayo

Existen tres procedimientos en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad y la fluencia Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

2.4.6. Ensayos de estabilidad y fluencia

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de mezcla.

La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- Las probetas son calentadas en un baño de agua a 60 °C (140 °F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta, y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
- La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 in) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta pueda resistir.
- La carga falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

2.4.7. Criterios de diseño normalizado

Para el diseño de mezclas asfálticas, deben cumplir con la caracterización mediante ensayos establecidos por las normas AASHTO y ASTM, como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 2.3: Ensayos para los agregados gruesos y finos

Ensayos de laboratorio para AGREGADOS	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano que clase de textura tendrá la carpeta
Desgaste	AASHTO T 96 ASTM C 131	El objetivo 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 esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportaran los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando sulfato de sodio	AASHTO T 104 ASTM C 88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura en pavimentos, especialmente cuando estos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos, el valor del error permisible no debe ser mayor de 0,5%.
Equivalente de arena	AASHTO T 176 ASTM C 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las particular más finas (arcillosas) de los granos más grueso o de la arena.

Fuente: The Asphalt Institute.

Tabla 2.4: Ensayos para los agregados gruesos y finos

Ensayos de laboratorio para AGREGADOS	Norma	Propósito
Cubicidad de partículas	ASTM D 692	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados, deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que se debe evitarse partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica del agregado grueso y fino	AASHTO T 84 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 constituyentes, no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contienen las partículas los cuales 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 seca cuando se evaluó 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 mezcla de agregados para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del Proctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.

Fuente: The Asphalt Institute.

2.4.8. Requisitos del agregado pétreo

Tabla 2.5: Requisito de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

Característica	Valor
Densidad relativa mínimo	2,4
Desgaste de los ángeles %	35
Partículas alargadas y lajeadas % máximo	40
Equivalente de arena % mínimo	50
Perdida de estabilidad por inmersión en agua % máximo	25

Fuente: The Asphat Institute

Tabla 2.6: Requisito de granulometría del material pétreo para carpeta asfáltica de granulometría densa.

Malla		Tamaño				
Abertura mm	Designación	12,5 mm (1/2")	19 mm (3/4")	25 mm (1")	37,5 mm (1 1/2")	50 mm (2")
50	2"	-				
37,5	1 1/2"	-			100	90-100
25	1"	-		100	90-100	76-90
19	3/4"	-	100	90-100	79-92	66-83
12,5	1/2"	100	90-100	76-89	64-81	63-74
9,5	3/8"	90-100	79-92	67-82	56-75	47-68
6,3	1/4"	76-89	66-81	56-71	47-65	39-59
4,75	N°4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2	N°10	48-64	41-55	36-64	30-42	26-38
0,85	N°20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0,425	N°40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0,25	N°60	17-29	15-25	13-21	11-29	9-16
0,15	N°100	12-21	11-18	9-16	8-14	6-12
0,075	N°200	7-10	6-9	5-8	4-7	3-6

Fuente: The Asphat Institute

2.5. MARCO NORMATIVO

En Bolivia todo lo que concierne al mantenimiento, características, modificaciones y conservación de la infraestructura vial está normalizada por la ASTM.

El presente proyecto se realizó teniendo en cuenta diferentes aspectos de las especificaciones establecidas por la ASTM y AASHTO.

2.5.1. Normativa sobre cementos asfálticos vigente (ABC)

El año 2008 la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras), publica cinco manuales para diseño y construcción de pavimentos en Bolivia, en los cuales indica todos los ensayos para control de pavimentos y asfaltos, basados en dos Normas de aplicación a nivel mundial; AASHTO y ASTM.

2.5.2. Norma ASTM

Fue fundado el 16 de mayo de 1898, como American Section of the International Association for Testing Materials por iniciativa de Charles Benjamin Dudley, entonces responsable del Control Calidad de Pennsylvania Railroad, quien tuvo la iniciativa de hacer que los hasta entonces rivales ferrocarriles y las fundiciones de acero coordinaran sus controles de calidad.

En el 2001 la ASTM asume su nombre actual: ASTM International como testimonio del interés que actualmente han alcanzado las técnicas de normalización.

Tal es así que en los acápite correspondientes y durante el desarrollo del presente trabajo se enunciarán los ensayos de los cementos asfálticos, detallándolos por su nombre, seguido del código AASHTO, ASTM y ABC, por ejemplo:

- Ensayo de Ductilidad (ASTM D-113 / AASHTO T 51-00)
- Penetración a 25°C (ASTM D5 / AASHTO T 49-97)
- Viscosidad Saybolt Furol a 135°C (ASTM D 88 / AASHTO T 72)
- Punto de inflamación (ASTM D1310-01 / AASHTO T 79-96)
- Ductilidad a 25 °C (ASTM D113)
- Pérdida de masa (ASTM D 175 / AASHTO T 179-05)
- Punto de ablandamiento (ASTM D 36 / AASHTO T 53-96)
- Peso específico (ASTM D71 / AASHTO T 229-97)
- Índice de penetración (UNE 104-281)
- Recuperación elástica (ASTM D 6084-06 /AASHTO T 301-99)

Tabla 2.7: Ensayos de caracterización del cemento asfáltico

Ensayos de laboratorio para ASFALTOS	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 201 ASTM D 2170	En el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de una mezcla asfáltica, se ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los cementos asfálticos a viscosidad 60°, 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 milímetro, valores altos de penetración indicaran 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 se inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo de 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 estiramientos bajo condiciones de velocidad y temperatura especificada.
Punto de reblandamiento	AASHTO T 53 ASTM D 36	La temperatura determinada como reblandamiento representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzara un determinado estado de fluidez existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandamiento es una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico y además es también una prueba de la viscosidad.

Fuente: Norma AASHTO y ASTM

Tabla 2.8:Ensayos de caracterización del cemento asfáltico

Ensayos de laboratorio para ASFALTOS	Norma	Propósito
Ensayo de flotación	AASHTO T 50 ASTM D 139	Esta prueba caracteriza el comportamiento al flujo o consistencia de ciertos materiales bituminosos, que por su bajo grado de dureza no pueden ser ensayados utilizando el método de penetración. Este ensayo es utilizado para medir la consistencia del residuo de destilación de los asfaltos rebajados de fraguado lento.
Solubilidad en Tricloroetilico	AASHTO T 44 ASTM D 2042	Este ensayo indica la porción de constituyentes cementantes activos en el asfalto ensayado es decir utiliza para medir la pureza del asfalto. En esta prueba las sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos, se consideran impurezas.
Peso especifico	AASHTO T 228 AASHTO T 85 AASHTO T 84	El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra, pero existen dos razones por la cuales se debe conocer su valor y son: 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.
Endurecimiento y envejecimiento	AASHTO T51 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: Norma AASHTO y ASTM

2.6. MARCO REFERENCIAL

El cemento asfáltico es un material pegajoso de color negro a marrón oscuro, compuesto principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular. Se deriva de la destilación del petróleo crudo (Koole & Thagesen, 2004).

El reciclaje de polímeros es la solución al problema que se presenta en las combinaciones asfálticas, entre las cuales se tiene el material termoplástico con excelentes propiedades térmicas y mecánicas, buen desempeño, buena resistencia química y también tiene menor

resistencia al impacto, pero la del caucho es alta y sus propiedades mecánicas son bajas. (E. Ciro, J. Parra, M. Zapata y E. Murillo, 2015)

A lo largo del tiempo, la cifra de automóviles en las ciudades ha incrementado, de igual forma la rapidez en la cual circulan y las cargas admitidas, en las estructuras de pavimento su durabilidad se ha visto limitada y de igual manera su vida útil se ha visto reducida considerablemente debido a los diferentes climas y microclimas a las cuales están sometidas. (Y. Bustos, P. Sosa, N. Rodríguez y J. Calderón, “Fundamentos micro y macroscópicos de la modificación del asfalto convencional con polímeros: una revisión,” *Inventum*, vol. 13, n° 24, pp. 58 - 77, 2018)

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos: termoendurecibles y termoplásticos. Los primeros no se utilizan para modificar asfaltos, pues son materiales que a altas temperaturas se descomponen o degradan totalmente sus propiedades. Los termoplásticos, por el contrario, son los utilizados para modificar asfaltos, ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas sin que se degraden demasiado sus propiedades. Los termoplásticos a su vez se subdividen en dos clasificaciones: elastómeros y plastómeros (Castro, Rondón, & Barrero, 2016).

Según Rodríguez, Aguiar, Salazar, Zúñiga, & Loría, (2017), la incorporación de aditivos poliméricos que se utilizan para modificar al asfalto, agrega complejidad a la mezcla de compuestos que conforman el asfalto. Esta incorporación, implica definir nuevos valores para las variables que han sido constantes durante muchos años y que varían de acuerdo con el aditivo, además de incrementar la necesidad de estudios para entender los procesos químicos, físicos y mecánicos que se producen con la adición de los modificantes.

Cuando el cemento asfáltico es modificado por vía húmeda, éste es mezclado con el aditivo a elevadas temperaturas durante un tiempo predeterminado. La temperatura y tiempo de mezcla de ambos componentes depende principalmente del tipo de aditivo que se utilice. Durante este proceso de exposición del asfalto a altas temperaturas, sus propiedades físico-químicas cambian, debido principalmente a un proceso de oxidación y envejecimiento del ligante, el cual incide de manera directa en el incremento de la rigidez y la disminución de la ductilidad (Fernández, Rondón, & Reyes, 2011), (Rondón y Reyes, 2015).

El cemento asfáltico es responsable del comportamiento visco elástico de la mezcla asfáltica y juega un papel importante en la resistencia a la deformación permanente, al agrietamiento por fatiga y al daño por humedad, entre otros. El rendimiento satisfactorio del asfalto puede ser asegurado si se controlan cuatro propiedades: reología, cohesión, adhesión y durabilidad (Read & Whiteoak, 2003).

2.7. ANÁLISIS DEL APORTE TEÓRICO

La investigación se centra en los cementos asfálticos, el cual es parte fundamental y de vital importancia en una mezcla asfáltica que, al investigar sus propiedades, se concluye que la consistencia de la misma, es la que proporciona la viscosidad al cemento asfáltico a una temperatura normada, como también la dureza que tiene el cemento asfáltico cuando está a una temperatura ambiente.

Se busca investigar de cómo mejorar la viscosidad a la cual el cemento asfáltico alcanza a una cierta temperatura, lo cual es de gran importancia para diseñar un pavimento flexible donde las temperaturas alcancen niveles elevados, por causa de calentamiento global las temperaturas elevadas se dan en regiones con temperaturas promedios como el departamento de Tarija lo cual afecta y deteriora las mezclas asfálticas convencionales.

Como también se busca cómo mejorar la dureza del cemento asfáltico al modificarlo con el aditivo propuesto, lo cual sería de gran beneficio dado que hoy en día el flujo de tráfico que presentan las carreteras es anormal, y las durezas de las mezclas asfálticas convencionales no resisten; al mejorar su dureza se dará una mejor calidad y duraderas carreteras para el país.

CAPÍTULO III

CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. CRITERIOS DEL DISEÑO METODOLÓGICO

3.1.1. Unidad de muestra

Ensayos de laboratorio de asfaltos.

3.1.2. Población

Todos los ensayos de laboratorio de asfalto.

3.1.3. Muestra

Ensayos que ayuden a determinar la consistencia del cemento asfáltico modificado con residuos de polietileno de alta densidad.

3.1.4. Tamaño de la muestra

Se realiza de acuerdo a lo seleccionado en la unidad de muestra, asignada de manera directa el nivel de confianza de 95% considerando una población infinita, sin embargo, sin embargo, mediante la metodología estratificada se puede asignar números lógicos para hacer el correspondiente ajuste.

$$n = \frac{\sum Ni * \sigma^2}{N * \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum Ni * \sigma^2}{N}}$$

Se adoptará una varianza de ($\sigma^2 = 0,15$) debido a que el tiempo asignado para la realización de trabajo está entre 4 a 5 meses.

El error correspondiente está en:

($e=5\%$)

El nivel de confianza es:

NC=95%

Valor del nivel de confianza es:

Z=1,96

Realizando la planilla de ajuste de número de ensayos se tiene.

Tabla 3.1: Cálculo de muestra estratificada

Etapa	Ensayos	NI	σ^2	NI* σ^2	fa	ni	ni
Preparación de aditivos	Molienda (HDPE)	3	0,15	0,45	0,0074	1,084	2
	Granulometría (HDPE)	3	0,15	0,45	0,0074	1,084	2
Caracterización del cemento asfáltico 85-100	Peso específico	3	0,15	0,45	0,0074	1,084	2
	Punto de inflamación	3	0,15	0,45	0,0074	1,084	2
	Punto de ablandamiento	3	0,15	0,45	0,0074	1,084	2
	Ductilidad	3	0,15	0,45	0,0074	1,084	2
	Penetración	3	0,15	0,45	0,0074	1,084	2
	pérdida de masa	3	0,15	0,45	0,0074	1,084	2
	Viscosidad saybolt-furol	3	0,15	0,45	0,0074	1,084	2
	Prueba definitiva en varios porcentajes (0,5% ,1%, 2% y 4%)	Viscosidad saybolt-furol	30	0,15	4,5	0,0737	10,835
Punto de ablandamiento		30	0,15	4,5	0,0737	10,835	12
Penetración		30	0,15	4,5	0,0737	10,835	12
Punto de inflamación		30	0,15	4,5	0,0737	10,835	12
Pérdida de masa		30	0,15	4,5	0,0737	10,835	12
Ductilidad		30	0,15	4,5	0,0737	10,835	12
Recuperación elástica		30	0,15	4,5	0,0737	10,835	12
Índice de penetración		30	0,15	4,5	0,0737	10,835	12
Porcentaje óptimo para comprobación de hipótesis	Viscosidad saybolt-furol	70	0,15	10,5	0,1720	25,283	30
	Penetración	70	0,15	10,5	0,1720	25,283	30
		407		61,05			174

Fuente: Elaboración propia

$$n = \frac{61}{407 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{61}{407}}$$

n= 174 ensayos

El total de ensayos cubierto por la investigación en el periodo entre 4 a 5 meses corresponde a 174 ensayos bien definido en cada categoría.

3.1.5. Control y validación interna

Los elementos que se verifico para el control en la variable extraña fue de:

- Extraer el cemento asfáltico personalmente de la planta la pintada donde se encuentra las muestras.
- Extraer el cemento asfáltico en su estado rígido, para no tener que calentarlo y que pierda propiedades por la acción de manipular mucho el material.
- Se verificó que la muestra extraída de cemento asfáltico sean lo suficiente para realizar todo el procedimiento de los ensayos, y lograr usar de una sola fuente el material.

Las principales acciones para neutralizar las variables extrañas son:

- Aplicar las normas de los ensayos de para cementos asfáltico, el principal es el método de muestreo (ASTM D 140), que nos ayudó a realizar una extracción de manera que la muestra no sea alterada.
- Todos los ensayos que se realizaron para caracterizar el cemento asfáltico son en base al manual de la ABC que se rigen en las normas ASTM Y AASHTO.

Los equipos que se utilizaron para la caracterización del cemento asfáltico fueron:

- Penetrometro de asfalto:** Sirve para determinar la dureza mediante la penetración de materiales bituminosos sólidos y semisólidos. Tiene una capacidad de indicar la profundidad de penetración con una precisión de 0.1 mm, la aguja de penetración debe ser de acero inoxidable templado y duro grado 440-C y diámetro entre 1,00 y 1,02 mm. El ensayo de penetración se usa como medida de consistencia, valores altos de penetración indican consistencias más blandas.
- Viscosímetro Saybolt Furol:** Sirve para la medida empírica de la viscosidad saybolt furol de productos del petróleo a temperaturas específicas.
- Aparato para determinar el punto de inflamación Cleveland de copa abierta:** Se determina el punto de ignición para productos del petróleo y otros líquidos, excepto aceites, combustibles materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de 79°C.
- Ductilímetro:** Sirve para determinar la longitud que se puede elongar antes de romperse el cemento asfáltico, las condiciones para el ensayo que se efectúe a una temperatura de 25+0,5°C y una velocidad de 5 cm/min la tolerancia varía

según cada cemento asfáltico para la muestra la tolerancia que debe elongar es de 100 cm.

- e) **Peso específico:** Sirve para determinar la densidad del cemento asfáltico, mediante el uso de picnómetro a la temperatura requerida, el picnómetro debe ser de 24 a 30 ml de capacidad y el termómetro de -8 a 32°C.
- f) **Aparato para determinar el punto de ablandamiento:** Con el cual se determina la temperatura a la cual el cemento asfáltico se ablanda y pierde propiedades de plasticidad, cuyo valores se encuentre en el rango de 30 a 200°C por medio del aparato de anillo y bola, el vaso de vidrio de 800 ml debe ser capaz de resistir el calor y que tenga un diámetro menor que 85 mm, las bolas de acero son de un diámetro de 9,5 mm y pesen 3,5 g , la tolerancia del ensayo es 0,5°C de intervalo que deben caer las bolas de acero.
- g) **Aparato para película delgada:** Sirve para determinar el efecto del calor y aire sobre materiales asfáltico semisólido, los efectos de este tratamiento son determinados para la medida de las propiedades asfálticas antes y después. El horno debe ser eléctrico que cumpla la norma ASTM E 145 de hornos tipo IB para operar a temperaturas superiores a 180°C, los platillos cilíndricos son de 140 mm de diámetro que deben ser de aluminio o acero inoxidable, el ensayo debe efectuarse a la una temperatura de 163°C durante 5 horas.
- Las validaciones internas de los resultados de la caracterización están basadas en las normas de los cementos asfálticos del manual de la ABC tales como:
 - Ensayo para determinar la ductilidad (ASTM D 113 / AASHTO T 51-00)
 - Ensayo de penetración (ASTM D 5 / AASHTO T 49-97).
 - Ensayo para determinar el peso específico (ASTM D 71 / AASHTO T229-97).
 - Ensayo para determinar el punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01 / AASHTO T 79-96).
 - Ensayo para determinar la viscosidad (ASTM D 88 / AASHTO T 72).
 - Ensayo para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 / AASHTO T53-96).
 - Ensayo para determinar la pérdida de masa (ASTM D 175 / AASHTO T 179-05).

- Ensayo para determinar el índice de penetración (UNE 104-281).
- Ensayo para determinar la recuperación elástica (ASTM D 6084-06 /AASHTO T 301-99).

Los resultados de la caracterización del cemento asfáltico serán verificado y validado por el ingeniero encargado del laboratorio de asfalto.

3.1.6. Caracterización de materiales

3.1.6.1. Criterios de extracción

Para el presente trabajo de investigación se utilizó materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas. Se solicitó mediante una carta a la alcaldía del municipio de Tarija de la provincia de Cercado la donación del cemento asfáltico, se procedió a extraer la Planta de Almacenamiento de agregados y asfalto La Pintada que está ubicada en la comunidad La ‘‘Pintada’’ en las coordenadas:

Latitud: 21°36'16,86"S

Longitud: 64°38'28,77"O

Zona: 20 k

Coordenada este: 330099,57 m E

Coordenada norte: 7610035,55 m S

Figura 3.1: Ubicación de la planta de agregados y de asfalto La Pintada



Fuente: Elaboración propia

El método de muestreo se procedió según la norma ASTM D 140 se extrajo en un envase metálico la cantidad de 10 kg, el cemento asfáltico que se extrajo fue el C.A.85-100 con nombre MULTINSA que es de procedencia colombiano.

Figura 3.2: Cemento asfáltico almacenado en la planta la pintada



Fuente: Elaboración propia

Las técnicas de muestreo que se realizó en este trabajo de investigación se de carácter no probabilístico, ya que los cementos asfálticos son seleccionados intencionalmente, ya que el cemento asfáltico se obtiene de la planta de almacenamiento de agregado y asfalto de la alcaldía municipal de la ciudad de Tarija ubicada en la comunidad La Pintada.

El cemento asfáltico se procedió a llevarlo al laboratorio de asfalto de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, para su conservación y guardado para cuando se realice los ensayo de caracterización, se etiqueto y se dejó en el laboratorio que está en un ambiente controlado que solo pueden circular los estudiantes que soliciten el uso de la instalación del laboratorio, las muestras se guardan de manera segura donde no, varía la temperatura gradualmente y es expuesto a agentes químico que puedan dañar la muestra.

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Para los ensayos de caracterización del cemento asfáltico, se realizaron con el mismo procedimiento del cemento asfáltico original como para el cemento asfáltico con polietileno de alta densidad.

Figura 3.3: Ficha técnica del cemento asfáltico 85-100 Multinsa



MULTINSA

Carrera 19 A No. 73-65 La Libertad
 Tel: 6916081 - +57 318 7167942
 Barrancabermeja, Santander. Colombian Industry
 laboratorio@multinsa.com - www.multinsa.com

CERTIFICADO DE CALIDAD

Del producto con las siguientes propiedades:

ASFALTO 85-100

N° 7509 - 1

Facturas # 70618-70619
 Fecha de despacho: 07-11-2022
 Cliente: SEMAED CONSTRUCCIONES E
 INSTALACIONES SRL

Fecha de lote: 27-10-2022
 Lote No.: 035028
 Despacho: 50 tn.
 Placa: N/A

Propiedad	Normativa		Especificación		Resultado
	AASHTO	ASTM	MÍN	MÁX	
Gravedad Específica a 25°C	T-229	D-70	1.00	1.05	1.015
Penetración Muestra Original a 25°C, mm/10	T-49	D-5	85	100	89
Punto de Ablandamiento, Anillo-Bola, °C	T-53	D-36	43	53	47
Punto de Inflamación, vaso abierto Cleveland, °C	T-48	D-92	232	-	275
Solubilidad en Tricloroetileno, %	T-44	D-2042	99	-	99.98
Ductilidad a 25°C, cm	T-51	D-113	100	-	> 140
Viscosidad Absoluta a 60°C, P	T-316	D-4402	800	-	1210
Viscosidad Saybolt Furor a 135°C, seg.	T-72	D-88	85	-	121
Ensayo de la Mancha Heptano-Xilol (20% máximo de Xilol)	T-102	-	negativo	-	negativo
ENSAYO EN HORNO PELÍCULA DELGADA (AASHTO T-179/ ASTM D-1754)					
Cambio de masa, Pérdida por calentamiento, %	T-240	D-1754	-	< 1,0	-0,34
Penetración del residuo, porcentaje de la penetración original, %	T-49	D-5	50	-	51
Ductilidad del residuo a 25°C, cm	T-51	D-113	100	-	>140
Contenido de agua, %	T-55	D-95	-	< 0.2	0.0

Tec. Químico DIVA CRISTINA TORRES
 C.C. 30.389.779 TQ-1066
 FIRMA DE LABORATORIO



Fuente: Alcaldía Municipal de Tarija

Tabla 3.2: Caracterización del cemento asfáltico

Tipo: Cemento asfáltico 85-100
Origen: Colombiano

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	33,60	34,00	35,30			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	85,30	87,00	88,50			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	65,00	66,70	68,00			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	86,90	87,50	90,00			
Peso Específico	grs./cm ³	1,05	1,01	1,05	1,036	1	1,05
Punto de Inflamación	°C	253	251	252	252	232	-
Ductilidad a 25°C	cm.	101,5	101,5	101,5	101,5	100	-
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0,1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	90	89	90			
	Lectura N°2	88	86	91			
	Lectura N°3	87	85	88			
	Promedio	0,1mm.	88	87	90	88,2	85
Viscosidad saybolt furol 135 °C	seg	86	105	96	97	85	-
Punto de ablandamiento	°C	45,0	45,1	45,1	45,05	43	53
Índice de penetración		-1,17	-1,19	-1,11	-1,15	-1,50	1
Ensayo de la mancha					No se realizó	Negativo	
Solvente gasolina standart					No se realizó	Negativo	
Solvente gasolina-xilol, % xilol					No se realizó	Negativo	
Solvente heptano-xilol, % xilol					No se realizó	Negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 3,2 mm, 163°C, 5 hrs.							
* Pérdida en masa	%	0,200	0,600	0,200	0,33		1
* Penetración del residuo, penetración original					No se realizó		

Fuente: Elaboración propia

3.2.1. Ensayo de penetración (ASTM D5 / AASHTO T49-97)

Este método de ensayo cubre la determinación de la penetración de materiales bituminosos semi-sólido y sólidos.

La consistencia de un cemento asfáltico se mide mediante un ensayo de penetración. Durante este ensayo se introduce una aguja de dimensiones específicas en una muestra de betún bajo una carga conocida (100 gr) a una temperatura fija (25 °C), durante un plazo de tiempo predeterminado (5 seg). Se denomina penetración a la distancia hasta la cual

penetra la aguja, que se mide en décimas de milímetro/dmm (0,1 mm). Por lo tanto, cuanto mayor es la penetración de la aguja, más blando es el cemento asfáltico.

Figura 3.4: Medición de la penetración en el cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3: Resultado del ensayo de penetración del cemento asfáltico

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0,1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	90	89	90			
	Lectura N°2	88	86	91			
	Lectura N°3	87	85	88			
	Promedio	0,1mm.	88	87	90	88,2	85

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Ensayo de viscosidad Saybolt Furol (ASTM D 88 /AASHTO T 72)

Este método cubre los procedimientos empíricos para determinar la viscosidad cinemática de productos de petróleo a temperaturas especificadas.

El objetivo de este ensayo de viscosidad es de determinar el grado de fluidez de un asfalto líquido a una temperatura de 135°C.

Figura 3.5: Preparación del viscosímetro Saybolt Furol



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4: Resultados del ensayo de viscosidad Saybolt Furol

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt Furol a 135 °C	seg	86	105	96	97	85	-

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Ensayo de ductilidad (ASTM D 113 / AASHTO T 51-00)

La ductilidad de un material bituminoso es medida por la distancia en centímetros a la cual se alargará antes de romper cuando se tiran dos extremos de un espécimen de la briqueta del material, estos extremos son separados a una velocidad especificada y a una temperatura especificada.

Este ensayo consiste en armar el molde en el plato bajo, y para prevenir que el material de ensayo se pegue, cubrir la superficie del plato con glicerina. Verter el cemento asfáltico en un delgado chorro de un lado a otro, de principio a fin hasta que el material cubra el nivel lleno del molde dejar que se enfríen para un periodo de 30 a 40 minutos y entonces poner el plato base y el molde lleno en el baño de agua a 25°C, por 30 minutos.

Quitar el plato base y el molde lleno del baño de agua, y con un contemporizador caliente cortar el exceso el material bituminoso para que el molde simplemente esté lleno a nivel.

Posteriormente quitar la briqueta del plato, despegar los pedazos laterales, e inmediatamente realizar el ensayo.

Figura 3.6: Desarmado de las briquetas y colocado al ductilímetro



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5: Resultados del ensayo de ductilidad

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C	cm.	101,5	101,5	101,5	101,5	100	-

Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01 / AASHTO T 79-96)

El objetivo de esta práctica es determinar el punto de ignición mínimo del asfalto (el cual representa las temperaturas críticas), por medio de la copa abierta de Cleveland.

Cuando se calienta un asfalto, libera vapores que son combustibles. El punto de inflamación, es la temperatura a la cual puede ser calentado con seguridad un asfalto, sin que se produzca la inflamación instantánea de los vapores liberados, en presencia de una llama libre.

El ensayo más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el de "Vaso Abierto Cleveland" (COC), que consiste en llenar un vaso de bronce con un

determinado volumen de asfalto, y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados. El punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes volátiles como para provocar una inflamación instantánea.

Figura 3.7: Registro de la temperatura del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6: Resultados del ensayo de punto de inflamación

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación	°C	253	251	252	252,0	232	-

Fuente: Elaboración propia

3.2.5. Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 / AASHTO T 53-96)

Este método de ensayo cubre la determinación del punto de ablandamiento de betún en el rango de 30 a 157°C (86 a 315°F) usando el aparato de la anillo-y-esfera sumergido en agua destilada, glicerina USP o glicol del etileno.

Consiste en cubrir la superficie de la base y los anillos un agente (glicerina). Por otro lado, poner agua destilada en el vaso de precipitación lo suficiente como para que la muestra quede totalmente bañada en el agua destilada luego verter el cemento asfáltico a los anillos

y dejar reposar, enfriar durante 30 minutos. Una vez enfriado el asfalto poner los anillos junto al poseedor en el vaso con agua destilada, por fuera alrededor del vaso colocar hielo para bajar la temperatura hasta 5°C. Para acabar de armar todo el equipo, es decir colocar los anillos, con las guías de centradoras de las esferas en el poseedor y poner a calentar para hacer el ensayo.

Figura 3.8: Medición de la temperatura del ensayo de intervalos pequeños



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7: Resultados del ensayo de punto de ablandamiento

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	45,0	45,1	45,1	45,1	42	53

Fuente: Elaboración propia

3.2.6. Peso específico (ASTM D 71 / AASHTO T 229-97)

La densidad relativa de un material bituminoso se define como la relación entre el peso de un volumen dado de una sustancia a 25°C y el peso de un volumen de agua a la misma temperatura.

Determinar el peso de los picnómetros y registrar el peso y designar a este dato la letra “A”. después llenar los picnómetros con agua destilada para posteriormente sumergirla totalmente en un vaso precipitado con agua destilada y dejar en baño maría por 30 minutos

para calibrar, luego una vez transcurrido el tiempo extraer los picnómetros, secar superficialmente y pesar y designar con la letra “B”. Luego verter el cemento asfáltico aproximadamente $\frac{3}{4}$ del picnómetro y dejar hasta que alcance temperatura ambiente. Posteriormente pesar los picnómetros más las muestras, designar ese dato como la letra “C”. Después llenar los picnómetros con agua destilada y sumergir también en agua destilada y dejar por 30 minutos, para luego secar, pesar y obtener el último dato, que se designa con la letra “D”.

Figura 3.9: Control de temperatura del ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8: Resultados del ensayo de peso específico

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	33,60	34,00	35,30			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	85,30	87,00	88,50			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	65,00	66,70	68,00			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	86,90	87,50	90,00			
Peso Específico	grs./cm ³	1,05	1,01	1,05	1,036	1	1,05

Fuente: Elaboración propia

3.2.7. Ensayo de pérdida de masa (ASTM D 175 / AASHTO T 179-05)

Sirve para determinar el efecto del calor y aire sobre materiales asfáltico semisólido, los efectos de este tratamiento son determinados para la medida de las propiedades asfálticas antes y después. El horno debe ser eléctrico que cumpla la norma ASTM E 145 de hornos tipo IB para operar a temperaturas superiores a 180°C, los platillos cilíndricos son de 140 mm de diámetro que deben ser de aluminio o acero inoxidable, el ensayo debe efectuarse a la una temperatura de 163°C durante 5 horas.

Figura 3.10: Llenado de los platillos de película delgada con muestras de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9: Resultados del ensayo de pérdida de masa

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
* Pérdida en masa	%	0,20	0,60	0,20	0,33		1

Fuente: Elaboración propia

3.3. GRANULOMETRÍA DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

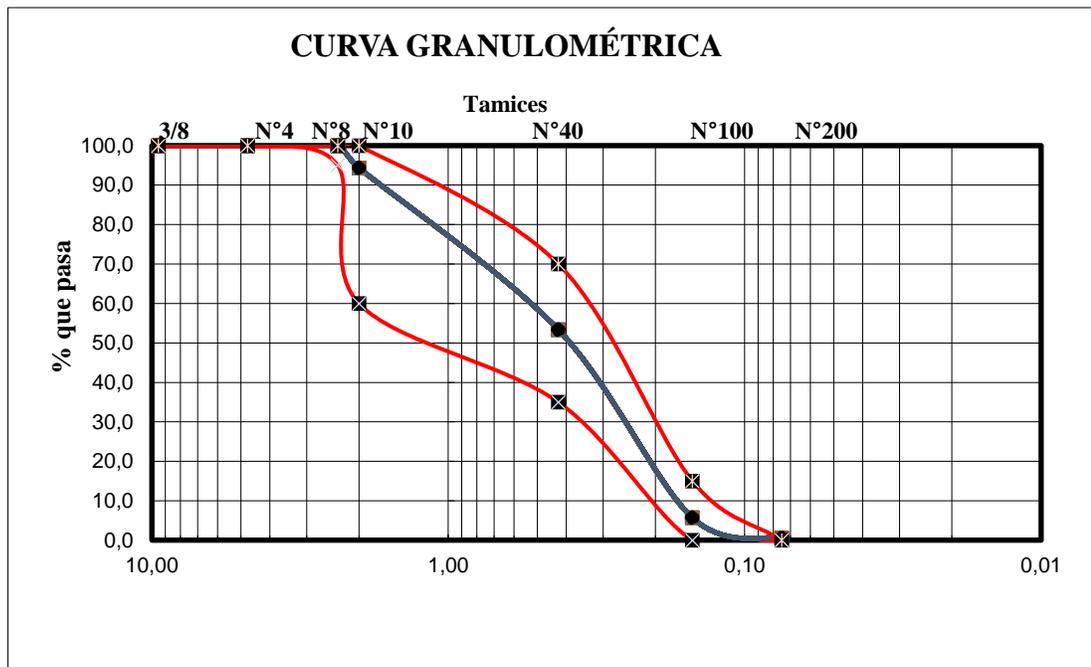
El termino granulometría corresponde a la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que pasan por los tamices.

Este método consiste en la determinación por tamices de la distribución del tamaño de las partículas de agregado fino y grueso, para la investigación presente se usó la granulometría en el polietileno de alta densidad para separar lo más fino de lo grueso se usó una serie de

tamices (N°10, N°40, N°100 y N°200), se basó el uso de la granulometría en investigaciones realizadas en polímeros ‘EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN CEMENTO ASFÁLTICO 60/70 MODIFICADO CON RESIDUOS DE LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD’’, que realizó según el orden de tamices nombrados y separando lo más fino que retiene el N°200.

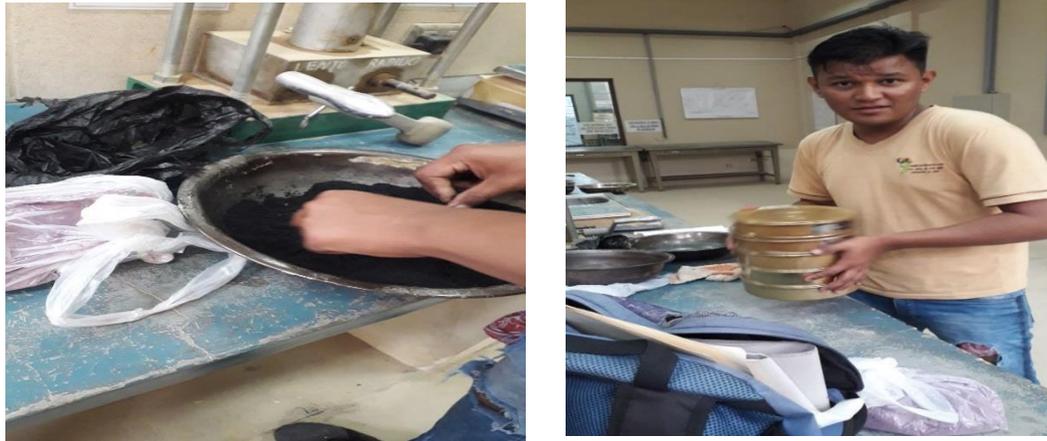
Tabla 3.10: Granulometría del residuo de polietileno de alta densidad

Peso Total (gr.)		273						
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Especificación		
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,0	100	100	
N°4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,0	100	100	
N°8	2,36	0,00	0,00	0,00	100,0	95	100	
N°10	2,00	15,40	15,40	5,64	94,4	60	100	
N°40	0,425	111,90	127,30	46,63	53,4	35	70	
N°100	0,150	130,20	257,50	94,32	5,7	0	15	
N°200	0,075	13,90	271,40	99,41	0,6	0	0	
Base		1,30	272,70	99,89	0,1			
Suma		272,7						
Perdidas		0,3						



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11: Tamizado del residuo de polietileno de alta densidad



Fuente: Elaboración propia

3.3.1. Cálculos operacionales con el residuo de polietileno de alta densidad

Para poder modificar el cemento asfáltico y poder encontrar el porcentaje óptimo se trabajaron con diferentes porcentajes que son:

Tabla 3.11: Ensayos de caracterización en varios porcentajes para encontrar el óptimo

% de residuo de polietileno de alta densidad (HDPE)	Penetración	Viscosidad	Ductilidad	Punto de inflamación	Punto de ablandamiento	Peso específico	Pérdida de masa	Recuperación elástica
0,5	X	X	X	X	X	X	X	X
1	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X	X	X	X

Fuente: Elaboración propia

Para cada porcentaje se pesó 2200 g y se calculó el porcentaje por cada peso que se añadirá al cemento asfáltico para modificarlo.

% peso de (HDPE)= Peso de la muestra (2,2kg) *0,5%

% peso de (HDPE)= Peso de la muestra (2,2kg) *1%

% peso de (HDPE)= Peso de la muestra (2,2kg) *2%

% peso de (HDPE)= Peso de la muestra (2,2kg) *4%

Pesos en % que se añadirán al cemento asfáltico

- Peso 0,5% de (HDPE) = 11 g
- Peso 1% de (HDPE) = 22g
- Peso 2% de (HDPE) = 44 g
- Peso 4% de (HDPE) = 88 g

Figura 3.12: Pesado de muestras del residuo de polietileno en diferentes porcentajes



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Cemento asfáltico con adición de residuos de (HDPE)

Tabla 3.12: Resultados del cemento asfáltico con la adición de varios porcentajes de (HDPE)

Cemento asfáltico 85-100 modificado con residuo de polietileno de alta densidad en los siguientes porcentajes					
Ensayo	Unidad	0,50%	1%	2%	4%
Penetración a 25°C	0,1mm	82,2	65,2	56,2	24,8
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	seg	155	242	302	611
Ductilidad a 25°C	cm	76	70,4	58,3	21,7
Punto de inflamación	°C	255,3	263	270,7	271
Punto de ablandamiento	°C	45,3	48,2	54,1	56,2
Recuperación elástica	%	17,5	20	26,8	38,3
Índice de penetración		-1,28	-1,03	0,06	-1,2
Pérdida de masa	%	0,33	0,202	0,403	0,0

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de penetración (AASHTO T-49-97)**TIPO I: C.A. +0,5% de residuo de (HDPE)****Tabla 3.13:** Resultados del ensayo de penetración al 0,5% de (HDPE)

Ensayo		Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0,1mm) AASHTO T-49-97	Lectura N°1		80	93	81	
	Lectura N°2		80	82	82	
	Lectura N°3		81	81	80	
	Promedio	0,1mm.	80	85	81	82,2

Fuente: Elaboración propia

TIPO II: C.A. +1% de residuo de (HDPE)**Tabla 3.14:** Resultados del ensayo de penetración al 1% de (HDPE)

Ensayo		Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0,1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1		68	65	67	
	Lectura N°2		66	63	65	
	Lectura N°3		65	64	64	
	Promedio	0,1mm.	66	64	65	65,2

Fuente: Elaboración propia

TIPO III: C.A. +2% de residuo de (HDPE)**Tabla 3.15:** Resultados del ensayo de penetración al 2% de (HDPE)

Ensayo		Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0,1mm) AASHTO T-49-97	Lectura N°1		55	56	62	
	Lectura N°2		56	53	57	
	Lectura N°3		54	60	53	
	Promedio	0,1mm.	55	56	57	56,2

Fuente: Elaboración propia

TIPO IV: C.A. +4% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.16: Resultados del ensayo de penetración al 4% de (HDPE)

Ensayo		Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0,1mm) AASHTO T-49- 97	Lectura N°1		26	24	20	
	Lectura N°2		29	26	22	
	Lectura N°3		30	22	24	
	Promedio	0,1mm.	28	24	22	24,8

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de viscosidad Saybolt Furol (AASHTO T 72)

TIPO I: C.A. +0,5% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.17: Resultados del ensayo de viscosidad Saybolt Furol al 0,5% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Viscosidad Saybolt Furol 135 °C	seg	150	160	155	155

Fuente: Elaboración propia

TIPO II: C.A. +1% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.18: Resultados del ensayo de viscosidad Saybolt Furol al 1% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Viscosidad Saybolt Furol 135 °C	seg	236	250	240	242

Fuente: Elaboración propia

TIPO III: C.A. +2% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.19: Resultados del ensayo de viscosidad Saybolt Furol al 2% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Viscosidad Saybolt Furol 135 °C	seg	290	310	305	302

Fuente: Elaboración propia

TIPO IV: C.A. +4% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.20: Resultados del ensayo de viscosidad Saybolt Furol al 4% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Viscosidad Saybolt Furol 135 °C	seg	603	660	570	611

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de ductilidad a 25°C (AASHTO T-51-00)

TIPO I: C.A. +0,5% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.21: Resultados del ensayo de ductilidad al 0,5% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Ductilidad a 25°C	cm.	75	83	70	76,0

Fuente: Elaboración propia

TIPO II: C.A. +1% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.22: Resultados del ensayo de ductilidad al 1% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Ductilidad a 25°C	cm.	70	70	71	70,4

Fuente: Elaboración propia

TIPO III: C.A. +2% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.23: Resultados del ensayo de ductilidad al 2% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Ductilidad a 25°C	cm.	60	55	60	58,3

Fuente: Elaboración propia

TIPO IV: C.A. +4% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.24: Resultados del ensayo de ductilidad al 4% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Ductilidad a 25°C	cm.	20	20	25	21,7

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de punto de inflamación (AASHTO T-79-96)

TIPO I: C.A. +0,5% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.25: Resultados del ensayo de punto de inflamación al 0,5% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Punto de Inflamación	°C	255	255	256	255,3

Fuente: Elaboración propia

TIPO II: C.A. +1% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.26: Resultados del ensayo de punto de inflamación al 1% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Punto de Inflamación	°C	260	266	263	263,0

Fuente: Elaboración propia

TIPO III: C.A. +2% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.27: Resultados del ensayo de punto de inflamación al 2% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Punto de Inflamación	°C	270	270	272	270,7

Fuente: Elaboración propia

TIPO IV: C.A. +4% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.28: Resultados del ensayo de punto de inflamación al 4% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Punto de Inflamación	°C	270	273	270	271,0

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de punto de ablandamiento (AASHTO T 53-96)

TIPO I: C.A. +0,5% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.29: Resultados del ensayo de punto de ablandamiento al 0,5% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Punto de ablandamiento	°C	45,5	45,3	45,0	45,3

Fuente: Elaboración propia

TIPO II: C.A. +1% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.30: Resultados del ensayo de punto de ablandamiento al 1% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Punto de ablandamiento	°C	48,0	48,5	48,2	48,2

Fuente: Elaboración propia

TIPO III: C.A. +2% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.31: Resultados del ensayo de punto de ablandamiento al 2% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Punto de ablandamiento	°C	54,0	54,3	54,1	54,1

Fuente: Elaboración propia

TIPO IV: C.A. +4% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.32: Resultados del ensayo de punto de ablandamiento al 4% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Punto de ablandamiento	°C	56,0	56,5	56,2	56,2

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de pérdida de masa (AASHTO T 179-05)

TIPO I: C.A. +0,5% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.33: Resultados del ensayo de pérdida de masa al 0,5% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
* Pérdida en masa	%	0,60	0,20	0,20	0,33

Fuente: Elaboración propia

TIPO II: C.A. +1% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.34: Resultados del ensayo de pérdida de masa al 1% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
* Pérdida en masa	%	0,203	0,201	0,201	0,202

Fuente: Elaboración propia

TIPO III: C.A. +2% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.35: Resultados del ensayo de pérdida de masa al 2% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
* Pérdida en masa	%	0,202	0,404	0,604	0,40

Fuente: Elaboración propia

TIPO IV: C.A. +4% de residuo de (HDPE)**Tabla 3.36:** Resultados del ensayo de pérdida de masa al 4% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
* Pérdida en masa	%	0,402	-0,402	0,000	0,00

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de recuperación elástica (AASHTO T 301-99)**TIPO I: C.A. +0,5% de residuo de (HDPE)****Tabla 3.37:** Resultados del ensayo de recuperación elástica al 0,5% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Recuperación elástica	%	15	20	17,5	17,5	60	

Fuente: Elaboración propia

TIPO II: C.A. +1% de residuo de (HDPE)**Tabla 3.38:** Resultados del ensayo de recuperación elástica al 1% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Recuperación elástica	%	20	22,5	17,5	20,0	60	

Fuente: Elaboración propia

TIPO III: C.A. +2% de residuo de (HDPE)**Tabla 3.39:** Resultados del ensayo de recuperación elástica al 2% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Recuperación elástica	%	25	27,5	28	26,8	60	

Fuente: Elaboración propia

TIPO IV: C.A. +4% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.40: Resultados del ensayo de recuperación elástica al 4% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Recuperación elástica	%	35	45	35	38,3	60	

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de índice de penetración (UNE 104-281)

TIPO I: C.A. +0,5% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.41: Resultados del ensayo de índice de penetración al 0,5% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Índice de penetración		-1,3	-1,2	-1,4	-1,28	-1,5	1

Fuente: Elaboración propia

TIPO II: C.A. +1% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.42: Resultados del ensayo de índice de penetración al 1% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Índice de penetración		-0,8	-0,8	-0,9	-0,84	-1,5	1

Fuente: Elaboración propia

TIPO III: C.A. +2% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.43: Resultados del ensayo de índice de penetración al 2% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Índice de penetración		0,0	0,1	0,1	0,06	-1,5	1

Fuente: Elaboración propia

TIPO IV: C.A. +4% de residuo de (HDPE)

Tabla 3.44: Resultados del ensayo de índice de penetración al 4% de (HDPE)

Ensayo	Unidad	Ensayo1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Índice de penetración		-1,0	-1,2	-1,4	-1,2	-1,5	1

Fuente: Elaboración propia

3.4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Para realizar la caracterización de los agregados utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas, se asistió al Laboratorio de Suelos y Hormigones de la universidad (UAJMS) donde se realizaron los ensayos de **Granulometría, Peso Específico, Peso Unitario, Desgaste de los Ángeles y Equivalente de Arena.**

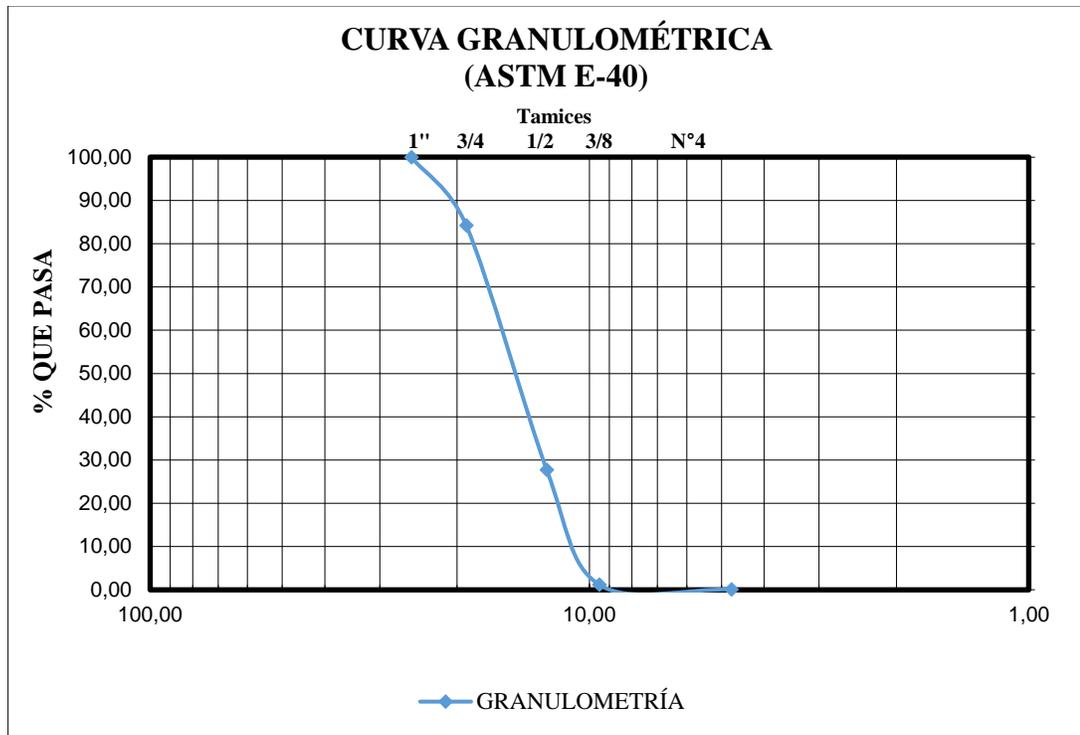
3.4.1. Granulometría (ASTM E-40)

Primeramente, se efectúa un muestreo para el agregado grueso mediante el cuarteo que consiste en colocar a la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas.

Tomamos la muestra, se coloca sobre los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200, inmediatamente con movimientos circulares facilitamos que el agregado pueda retenerse o pasar en cada uno de los tamices.

Tabla 3.45: Granulometría del agregado grueso (grava)

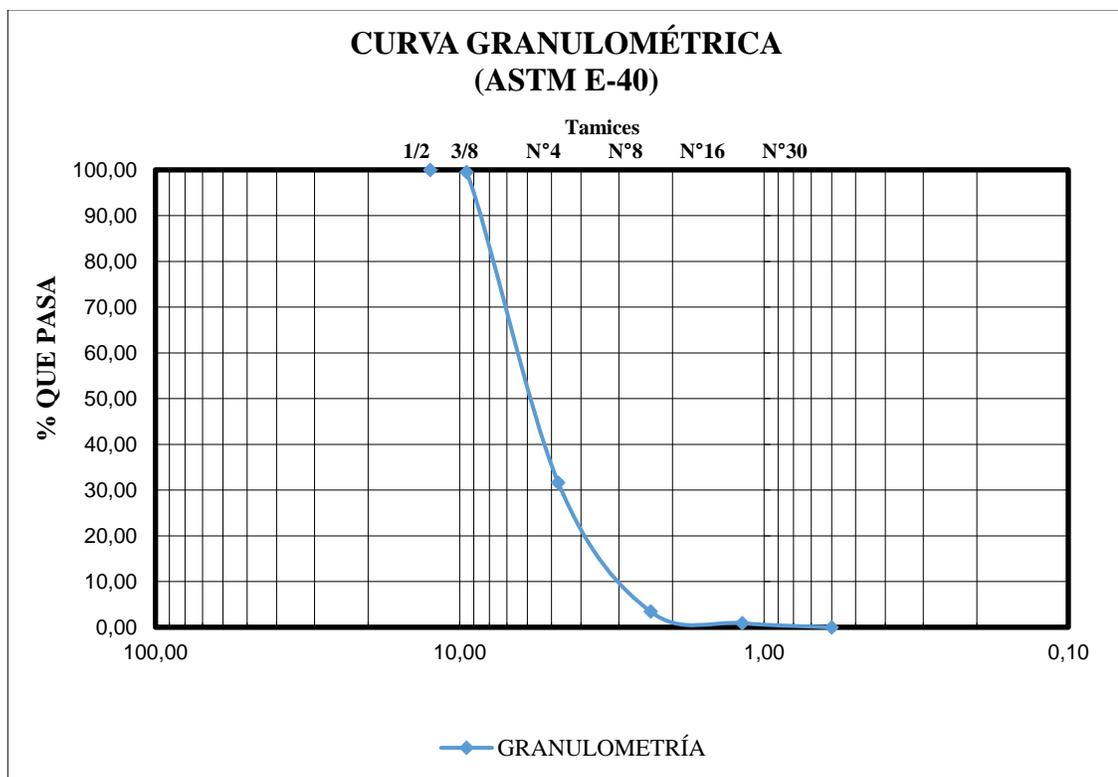
Peso Total (gr.)			7800		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Retenido	% que pasa del total
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,05	1231,00	1231,00	15,78	84,22
1/2	12,50	4405,00	5636,00	72,26	27,74
3/8	9,50	2070,50	7706,50	98,80	1,20
N°4	4,75	88,49	7794,99	99,94	0,06
Base		5,00	7799,99	100,00	0,00
Suma		7800,0			



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.46: Granulometría agregado grueso (gravilla)

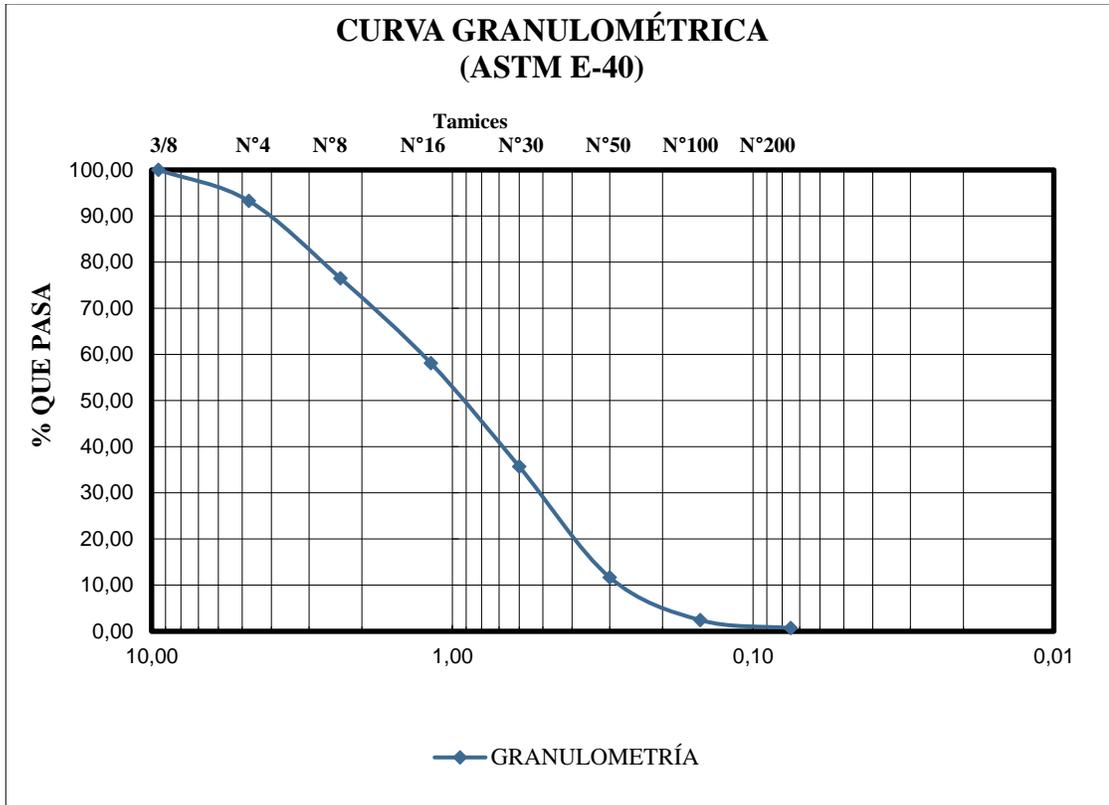
Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Retenido	% que pasa del total
1/2	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	23,70	23,70	0,47	99,53
N°4	4,75	3392,80	3416,50	68,33	31,67
N°8	2,36	1410,80	4827,30	96,55	3,45
N°16	1,18	125,90	4953,20	99,06	0,94
N°30	0,60	46,80	5000,00	100,00	0,00
Base			5000,00	100,00	0,00
Suma		5000,0			



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.47: Granulometría agregado fino

Peso Total (gr.)		1000			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Retenido	% que pasa
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
N°4	4,75	67,40	67,40	6,74	93,26
N°8	2,36	167,30	234,70	23,47	76,53
N°16	1,18	184,10	418,80	41,88	58,12
N°30	0,60	224,10	642,90	64,29	35,71
N°50	0,30	240,10	883,00	88,30	11,70
N°100	0,15	92,70	975,70	97,57	2,43
N°200	0,075	17,60	993,30	99,33	0,67
Base		6,70	1000,00	100,00	0,00
Suma		1000,0			



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.48: Granulometría del Filler

Peso Total (gr.)		500			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Retenido	% que pasa
N°30	0,60	0,00	0,00	0,00	100,00
N°50	0,30	19,10	19,10	3,82	96,18
N°100	0,15	63,10	82,20	16,44	83,56
N°200	0,075	44,00	126,20	25,24	74,76
Base		373,80	500,00	100,00	

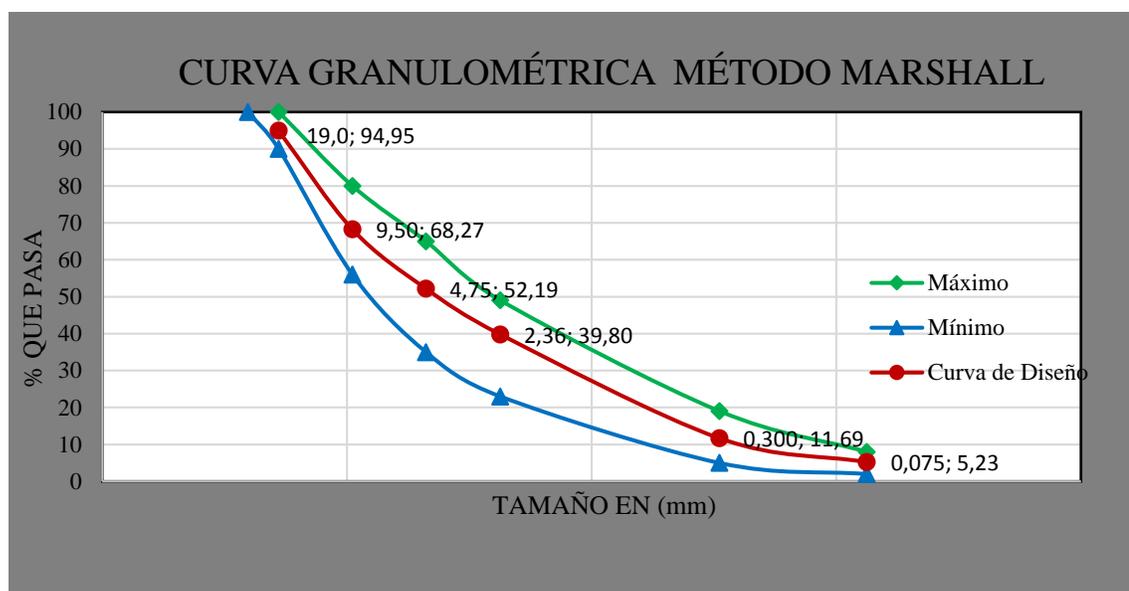
Combinación para mezcla asfáltica

Grava (A)	51%
Arena (B)	42%
Filler (C)	7%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.50: Diseño para la dosificación de la probeta

Tamices	Tamaño (mm)	Curva de dosificación para 1200 grs.				Especificaciones ASTM D3515	
		Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	60,60	60,60	5,05	94,95	90	100
1/2"	12,5	217,08	277,69	23,14	76,86	-	-
3/8"	9,50	103,02	380,71	31,73	68,27	56	80
N°4	4,75	193,03	573,74	47,81	52,19	35	65
N°8	2,36	148,65	722,40	60,20	39,80	23	49
N°16	1,18	98,53	820,92	68,41	31,59	-	-
N°40	0,43	115,08	936,00	78,00	22,00	-	-
N°50	0,30	123,72	1059,72	88,31	11,69	5	19
N°100	0,15	57,32	1117,04	93,09	6,91	-	-
N°200	0,075	20,16	1137,20	94,77	5,23	2	8
Base	-	62,80	1200,00	100,00	0,00	-	-
Peso Total		1200,0					



Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Peso específico (ASTM E-127)

El peso específico del agregado es necesario para determinar el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas compactadas. Por definición, el peso específico de un agregado es la relación del peso por unidad de volumen de un material respecto del mismo volumen de agua a aproximadamente 23°C (73,4°F). La ecuación usada es:

$$\text{Peso específico} = \text{peso} / (\text{peso volumen} * \text{peso específico})$$

Además, existen tres diferentes gravedades específicas relacionadas al diseño de mezclas asfálticas en caliente que definen el volumen de las partículas de agregados:

Gravedad Específica Seca Aparente

Gravedad Específica Seca Bulk (Base Seca) y Saturada Superficialmente Seca Bulk2

Gravedad Específica Efectiva

Figura 3.13: Ensayo de peso específico del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14: Agregado grueso reposando 24 hrs para el ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15: Ensayo de peso específico del Filler



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.51: Resumen del resultado de peso específico Grava, Gravilla, Arena y Filler

Material	Peso específico a granel (gr/cm³)	Peso específico S.S.S. (gr/cm³)	Peso específico aparente (gr/cm³)	% de Abs.
Grava	2,59	2,62	2,68	1,19
Gravilla	2,52	2,59	2,72	2,87
Arena	2,40	2,45	2,52	1,97
Filler			2,64	

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los Ángeles (ASTM C-131)

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.

Debido a las condiciones de esfuerzo deformación, la carga de la rueda es transmitida del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la sub rasante.

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los ángeles, ASTM C-131 (para

agregados menores de 1 ½”), mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

Figura 3.16: Ensayo del desgaste de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.52: Resultado del ensayo del desgaste de los Ángeles de la grava

Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
B	5000	4069,1	18,62	35% Max.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.53: Resultado del ensayo del desgaste de los Ángeles de la gravilla

Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
C	5000	3731,5	25,37	35% Max.

Fuente: Elaboración propia

3.4.4. 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 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.

Figura 3.17: Ensayo de equivalente de la arena



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.54: Resultado del equivalente de arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	10,70	11,20	95,54
2	10,60	11,50	92,17
3	10,50	11,40	92,11
	Promedio		93,27

Equivalente de Arena (%)	Norma
93,27	> 90%

Fuente: Elaboración propia

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla asfáltica según las especificaciones.

3.5. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MÉTODO MARSHALL

3.5.1. Descripción de la investigación

Para conocer y analizar la incidencia que tiene el cemento asfáltico modificado con residuos de polietileno se realizan 9 probetas con el cemento modificado y 9 probetas con cemento asfáltico normal (C.A. 85-100).

3.5.2. Contenido mínimo de cemento asfáltico

Se calculó el contenido mínimo del cemento asfáltico por el método de área superficial, el valor dio un indicador, del contenido de cemento asfáltico se debe empezar para encontrar el contenido óptimo.

Tabla 3.55: Contenido mínimo del cemento asfáltico

Material				Área superficial de partícula k en m ² /kg
% Pasa		% Retenido		
37,5	1 1/2"	19	3/4	0,27
19	3/4"	4,75	N°4	0,41
4,75	N°4	0,425	N°40	2,05
0,425	N°40	0,075	N°200	15,38
0,075	N°200		Pasa-200	53,3

Fuente: Elaboración propia

Contenido mínimo de cemento asfáltico 4.32%

3.5.3. Dosificación de la mezcla asfáltica

Tabla 3.56: Dosificación de la mezcla asfáltica

Peso Total de Briqueta (gr)	1200
Ponderación de Grava (%)	32
Ponderación de Gravilla (%)	19
Ponderación de Arena (%)	42
Ponderación de Filler (%)	7

Porcentaje de Briqueta	100%
Porcentaje de Cemento Asfáltico	X%
Porcentaje de Agregado	Y=100 - X

Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	3,82%	4,32%	4,82%	5,32%	5,82%	6,32%
Porcentaje de Agregado (%)	96,18%	95,68%	95,18%	94,68%	94,18%	93,68%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	45,84	51,84	57,84	63,84	69,84	75,84
Peso de Grava (gr) *	369,33	367,41	365,49	363,57	361,65	359,73
Peso de Gravilla (gr) *	219,29	218,15	217,01	215,87	214,73	213,59
Peso de Arena (gr) *	484,75	482,23	479,71	477,19	474,67	472,15
Peso de Filler (gr) *	80,79	80,37	79,95	79,53	79,11	78,69
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,0	1200,00	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0

Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Contenido óptimo de cemento asfáltico

El contenido óptimo de cemento asfáltico 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 del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área específica total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área específica total.

3.5.5. Preparación de las muestras de ensayo

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan y se mezclan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- “Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de

golpes. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.”

- Una vez compactada la muestra retirarla del equipo de compactación y dejarla enfriar a temperatura ambiente por un máximo de 24h para continuar con el ensayo Marshall.

Figura 3.18: Mezclado del agregado con el cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.19: Compactado de 25 golpes por cada capa



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20: Extracción de la briqueta del molde



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21: Reposo de las briquetas según su dosificación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.57: Contenido óptimo de cemento asfáltico

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	4340,18	4,94
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,35	5,17
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	4,47
	Relación betumen vacío (%)	75,00	4,67
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	4,81

Fuente: Elaboración propia

Contenido óptimo de cemento asfáltico = 4.81%

3.5.6. Mezcla asfáltica convencional con el contenido óptimo

Tabla 3.58: Dosificación de la mezcla asfáltica con el contenido óptimo de C.A.

Peso Total de Briqueta (gr)	1200	Porcentaje de Briqueta	100%
Ponderación de Grava (%)	32	Porcentaje de Cemento Asfáltico	X%
Ponderación de Gravilla (%)	19	Porcentaje de Agregado	Y=100 - X
Ponderación de Arena (%)	42		
Ponderación de Filler (%)	7		

Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	4,81%	4,81%	4,81%
Porcentaje de Agregado (%)	95,19%	95,19%	95,19%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	57,72	57,72	57,72
Peso de Grava (gr) *	365,53	365,53	365,53
Peso de Gravilla (gr) *	217,03	217,03	217,03
Peso de Arena (gr) *	479,76	479,76	479,76
Peso de Filler (gr) *	79,96	79,96	79,96
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.59: Resultado de las 9 probetas de la mezcla asfáltica convencional

Ensayo	Valor con él % óptimo de C.A.	Especificaciones
Estabilidad Marshall (Lb)	4192,03	Min. 1800 (lb)
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,34	-
Vacíos de la mezcla (%)	3,55	3- 5 (%)
Relación betumen vacío (%)	75,40	70 - 80 (%)
Fluencia (0,01 pulg.)	12,22	8- 16 (0,01 pulg)
Vacíos del agregado mineral (%)	14,42	Min. 13 (%)

Fuente: Elaboración propia

3.5.7. Mezcla asfáltica modificada con el contenido óptimo

Tabla 3.60: Dosificación de la mezcla asfáltica con el contenido óptimo de C.A.

Peso Total de Briqueta (gr)	1200	Porcentaje de Briqueta	100%
Ponderación de Grava (%)	32	Porcentaje de Cemento Asfáltico	X%
Ponderación de Gravilla (%)	19	Porcentaje de Agregado	Y=100 - X
Ponderación de Arena (%)	42		
Ponderación de Filler (%)	7		

Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	4,81%	4,81%	4,81%
Porcentaje de Agregado (%)	95,19%	95,19%	95,19%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	57,72	57,72	57,72
Peso de Grava (gr) *	365,53	365,53	365,53
Peso de Gravilla (gr) *	217,03	217,03	217,03
Peso de Arena (gr) *	479,76	479,76	479,76
Peso de Filler (gr) *	79,96	79,96	79,96
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.61: Resultado de las 9 probetas de la mezcla asfáltica modificada

Ensayo	Valor con él % óptimo de C.A.	Especificaciones
Estabilidad Marshall (Lb)	4845,47	Min. 1800 (lb)
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,35	-
Vacíos de la mezcla (%)	3,29	3 - 5 (%)
Relación betumen vacío (%)	76,55	70 - 80 (%)
Fluencia (0,01 pulg.)	12,00	8- 16 (0,01 pulg)
Vacíos del agregado mineral (%)	14,04	Min. 13 (%)

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1. ORGANIZACIÓN DE RESULTADOS

Tabla 4.1: Resultados de la caracterización del cemento asfáltico 85-100

Cemento asfáltico 85-100 industria colombiano marca Multinsa		
Ensayo	Unidad	C.A. normal (85-100)
Penetración a 25°C	0,1mm	88,2
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	seg	97
Ductilidad a 25°C	cm	101,5
Punto de inflamación	°C	252
Punto de ablandamiento	°C	45,05
Índice de penetración		-1,15
Peso específico	grs./cm ³	1,036
Pérdida de masa	%	0,33

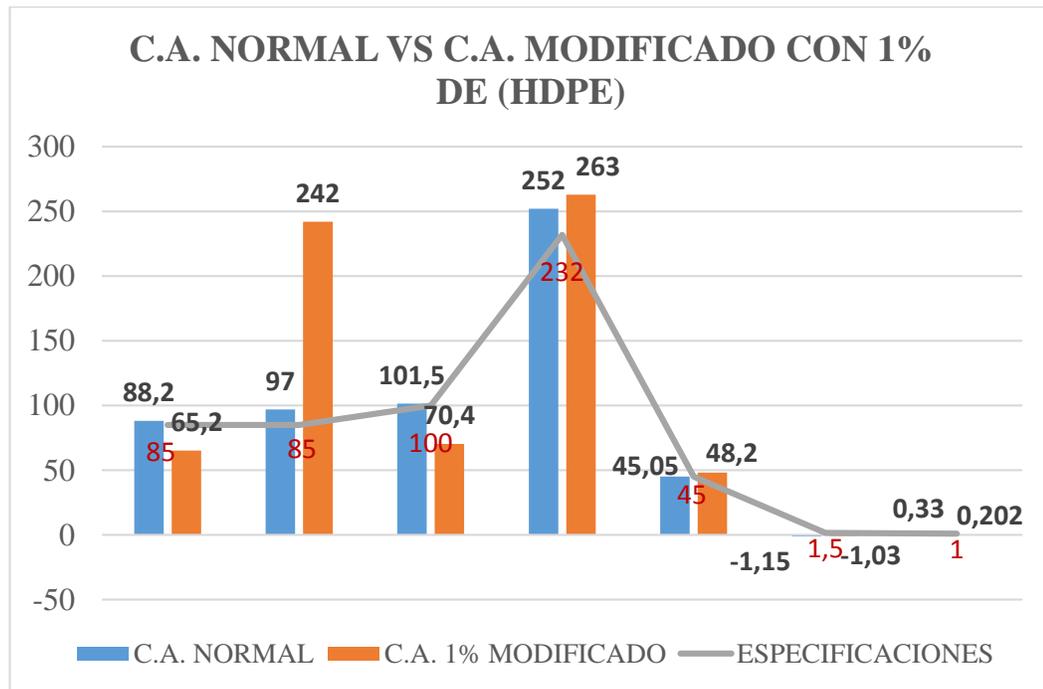
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2: Resultados de la caracterización del cemento asfáltico modificado

Cemento asfáltico 85-100 modificado con residuo de polietileno de alta densidad en los siguientes porcentajes					
Ensayo	Unidad	0,50%	1%	2%	4%
Penetración a 25°C	0,1mm	82,2	65,2	56,2	24,8
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	seg	155	242	302	611
Ductilidad a 25°C	cm	76	70,4	58,3	21,7
Punto de inflamación	°C	255,3	263	270,7	271
Punto de ablandamiento	°C	45,3	48,2	54,1	56,2
Recuperación elástica	%	17,5	20	26,8	38,3
Índice de penetración		-1,28	-1,03	0,06	-1,2
Pérdida de masa	%	0,33	0,202	0,403	0,0

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1: Justificación de la elección del porcentaje de 1% de (HDPE)



Fuente: Elaboración propia

Se eligió el porcentaje del 1% del residuo de polietileno de alta densidad (HDPE), por la mejora que presenta en la propiedad de la consistencia (penetración y viscosidad saybolt furol), y en las diferentes propiedades (durabilidad, susceptibilidad térmica, envejecimiento), lo que se debe resaltar es la propiedad de la adhesión y cohesión que es la que se ve afectada negativamente, al adicionar el residuo de polietileno disminuye la ductilidad, a mayor cantidad que se adiciona menor es la ductilidad, por tal motivo se eligió el porcentaje de 1% , es el que afecta con menor impacto a la propiedad de la adhesión y cohesión, y presenta más mejoras a las propiedades del cemento asfáltico.

Se procedió a realizar los ensayos de penetración y viscosidad saybolt furol para poder comprobar que, si mejora la propiedad de la consistencia, para poder verificar se realizaron 30 ensayos de penetración y 30 ensayos de viscosidad saybolt furol, para poder realizar un análisis de estadística inferencial, donde se analizara la hipótesis planteada en la investigación si es falsa o verdadera.

Tabla 4.3: Resultados de los ensayos de penetración del cemento modificado del valor óptimo 1% seleccionado

Nº muestra	Penetración al 1% (0,1mm)
1	59,70
2	60,90
3	61,30
4	61,40
5	61,60
6	61,80
7	61,80
8	61,90
9	62,00
10	62,00
11	62,10
12	62,70
13	62,70
14	62,80
15	62,80
16	63,10
17	63,10
18	63,20
19	63,40
20	63,70
21	63,80
22	63,80
23	63,90
24	64,20
25	64,60
26	64,70
27	65,20
28	67,20
29	67,60
30	70,40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4: Resultado del ensayo de viscosidad Saybolt Furol del cemento modificado del valor óptimo 1% seleccionado

Nº muestra	Viscosidad Saybolt Furol al 1% (seg)
1	234,00
2	234,00
3	235,00
4	238,00
5	238,00
6	238,00
7	238,00
8	238,00
9	239,00
10	240,00
11	241,00
12	241,00
13	242,00
14	242,00
15	242,00
16	242,00
17	244,00
18	245,00
19	245,00
20	247,00
21	248,00
22	248,00
23	248,00
24	248,00
25	249,00
26	251,00
27	252,00
28	254,00
29	255,00
30	256,00

Fuente: Elaboración propia

4.2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

4.2.1. Datos de los ensayos de penetración al 1% de polietileno de alta densidad

1. Ordenar de menor a mayor.

Tabla 4.5: Datos del ensayo de penetración al 1% de (HDPE)

59,7	60,9	61,3	61,4	61,6
61,8	61,9	62	62	62
62,1	62,7	62,7	62,8	62,8
63,1	63,1	63,2	63,4	63,7
63,8	63,8	63,9	64,2	64,6
64,7	65,2	67,2	67,6	70,4

Fuente: Elaboración propia

2. Obtención del rango.

$N = 30$

$X_{\text{Max}} = 70,4 \text{ 0,1mm}$

$X_{\text{Min}} = 59,7 \text{ 0,1mm}$

Rango = 10,7

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

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

4. Amplitud de cada intervalo.

Amplitud = 1,8

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

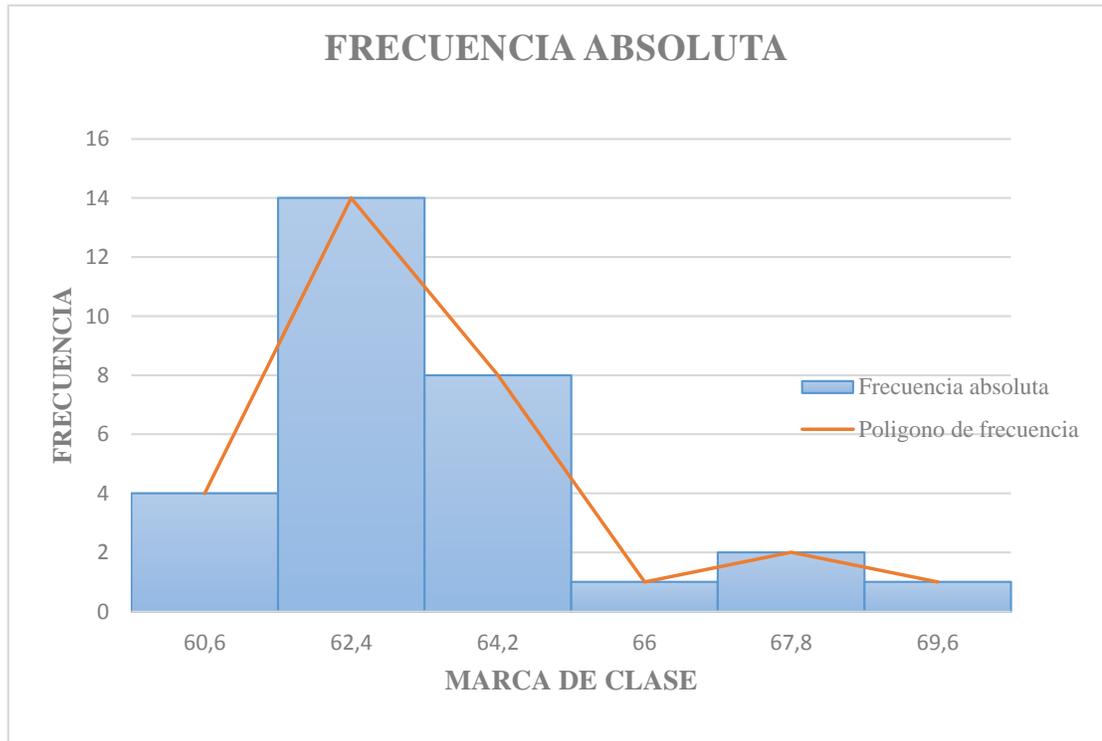
Tabla 4.6: Cálculo de la frecuencia absoluta y relativa

L. Inf.	L. Sup.	Marca de clase C_i	Frec. Absoluta		Frec. Acumulada	
			f_i	$f_i (\%)$	F_i	$F_i (\%)$
59,7	61,5	60,6	4	13,3	4,0	13,30
61,5	63,3	62,4	14	46,7	18,0	60,00
63,3	65,1	64,2	8	26,7	26,0	86,70
65,1	66,9	66	1	3,3	27,0	90,00
66,9	68,7	67,8	2	6,7	29,0	96,70
68,7	70,5	69,6	1	3,3	30,0	100

Suma: 30 100

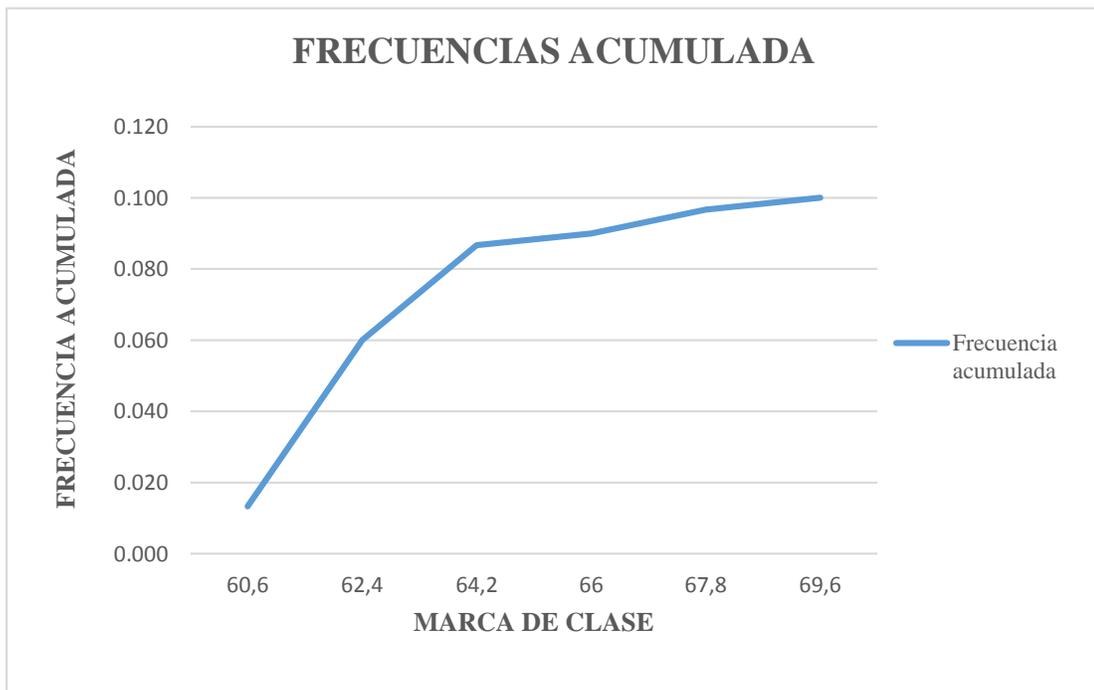
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2: Determinación del histograma y polígono de frecuencia



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3: Determinación de la curva de frecuencia acumulada



Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Cálculos de medidas de tendencia central

Tabla 4.7: Resultados de los cálculos de medidas de tendencia central de los ensayos de penetración óptimo 1%

Medida de tendencia	Resultado	Unidad
Media	63,31	0,1mm
Error típico	0,39	
Mediana	62,95	0,1mm
Moda	61,80	0,1mm
Desviación estándar	2,16	
Varianza de la muestra	4,66	
Curtosis	3,27	
Coefficiente de asimetría	1,50	
Rango	10,70	0,1mm
Mínimo	59,70	0,1mm
Máximo	70,40	0,1mm
Suma	1899,40	0,1mm
Cuenta	30,00	

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Prueba de ajuste de bondad Smirnov Kolmogorov

Cálculo de la probabilidad empírica o experimental $P(x)$ de los datos

Donde: $P(x)$ = Probabilidad experimental o empírica de los datos
 m = Número de orden
 n = Número de datos

Tabla 4.8: Métodos para el cálculo de la probabilidad empírica

Método	Probabilidad experimental $P(x)$
California	$P(x) = \frac{m}{n}$
Hazen	$P(x) = \frac{m - 0,5}{n}$
Weibull	$P(x) = \frac{m}{n + 1}$
Chegadayev	$P(x) = \frac{m - 0,3}{n + 0,4}$
Blom	$P(x) = \frac{m - 0,375}{n + 0,25}$
Tukey	$P(x) = \frac{3m - 1}{3n + 1}$

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la probabilidad teórica P(x).

Tabla 4.9: Función de distribución acumulada normal

Orden m	Penetración 0,1 mm	$P(x) = \frac{m}{n + 1}$	$Z(x) = \frac{x-x}{s}$	F(z)	$\Delta =$ P(x) – F(z)
1	59,70	0,032	-1,675	0,047	0,015
2	60,90	0,065	-1,118	0,132	0,067
3	61,30	0,097	-0,933	0,175	0,079
4	61,40	0,129	-0,887	0,188	0,059
5	61,60	0,161	-0,794	0,214	0,052
6	61,80	0,194	-0,701	0,242	0,048
7	61,80	0,226	-0,701	0,242	0,016
8	61,90	0,258	-0,655	0,256	0,002
9	62,00	0,290	-0,609	0,271	0,019
10	62,00	0,323	-0,609	0,271	0,051
11	62,10	0,355	-0,562	0,287	0,068
12	62,70	0,387	-0,284	0,388	0,001
13	62,70	0,419	-0,284	0,388	0,031
14	62,80	0,452	-0,238	0,406	0,046
15	62,80	0,484	-0,238	0,406	0,078
16	63,10	0,516	-0,099	0,461	0,056
17	63,10	0,548	-0,099	0,461	0,088
18	63,20	0,581	-0,053	0,479	0,102
19	63,40	0,613	0,040	0,516	0,097
20	63,70	0,645	0,179	0,571	0,074
21	63,80	0,677	0,226	0,589	0,088
22	63,80	0,710	0,226	0,589	0,120
23	63,90	0,742	0,272	0,607	0,135
24	64,20	0,774	0,411	0,659	0,115
25	64,60	0,806	0,596	0,725	0,082
26	64,70	0,839	0,643	0,740	0,099
27	65,20	0,871	0,874	0,809	0,062
28	67,20	0,903	1,801	0,964	0,061
29	67,60	0,935	1,987	0,977	0,041
30	70,40	0,968	3,284	0,999	0,032

Fuente: Elaboración propia

Selecciona la máxima diferencia Δ

$$\Delta_{\text{Max}} = \text{Max. } (P(x) - F(x))$$

$$\Delta_{\text{Max}} = 0,135$$

Calcular el valor crítico del estadístico Δ , es decir Δ_0 , para un α del 5% y N igual al número de datos

Tabla 4.10: Tabla de valor crítico del estadístico

Tamaño muestral N	Nivel de significancia α			
	0,2	0,1	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,3	0,34	0,4
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,2	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,2	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23

Fuente: Elaboración propia

Comparando los valores de Δ , con el valor crítico Δ_0 de la tabla con los siguientes criterios de decisión.

$\Delta_{Max} < \Delta_0$ = El ajuste es bueno

$\Delta_{Max} \geq \Delta_0$ = El ajuste no es bueno

$\alpha = 0,05$

N= 30

$\Delta_{Max.} = 0,135$

Dato de la tabla 4.10

$\Delta_0 = 0,24$

$\Delta_{Max.} = 0,135 < \Delta_0 = 0,24$

Se concluye que los datos de penetración al 1% se ajustan a la distribución normal, con un nivel de significancia del 5% o una probabilidad del 95%

4.3. ESTADÍSTICA INFERENCIAL

Tabla 4.11: 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 =	0,39
Error probable	Ep =	0,77
Error probable %	Ep% =	7,22

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.12: Cálculo del rango de confianza

Rango de confianza:	$Va = X \pm Ep$	
$Va = 63,31 + 0,77 =$	64,09	0,1 mm
$Va = 63,31 - 0,77 =$	62,54	0,1 mm

Fuente: Elaboración propia

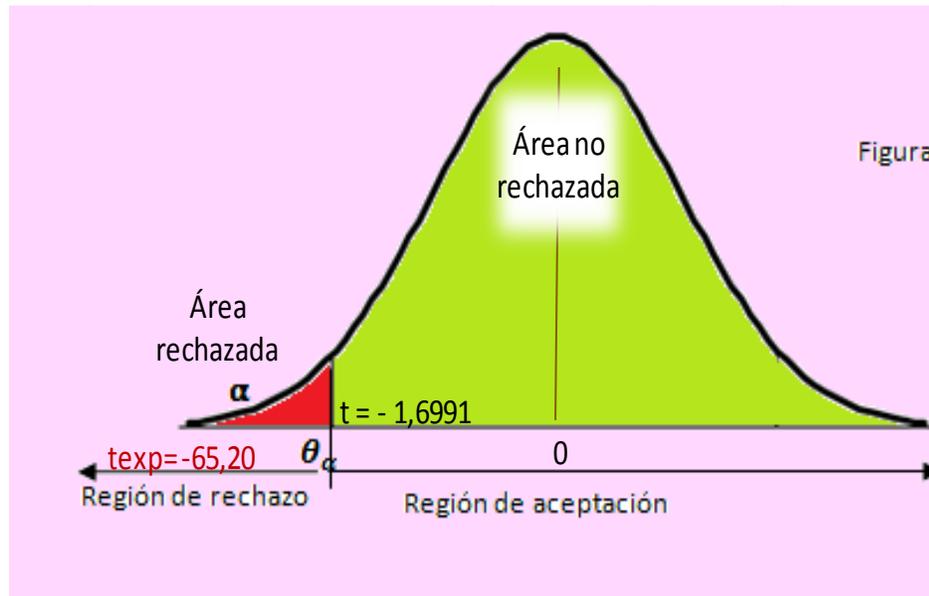
Intervalo de confianza = 64,09 0,1mm - 62,54 0,1 mm

Tabla 4.13: Prueba de hipótesis por el método T de Student

Prueba de hipótesis			
1era, Hipótesis= $H_0 \mu \leq 89$ 0,1mm			
2da, Hipótesis= $H_1 \mu > 89$ 0,1 mm			
Significancia	$\alpha =$	0,05	
Media muestral	$X =$	63,31	0,1mm
Número de datos	$n =$	30	
Desviación estándar	$S =$	2,16	
Media muestral	$\mu =$	89	0,1mm
Grados de libertad	$GL =$	29	
t teórico	$t\alpha =$	1,6991	
t experimental	$t_{exp} =$	-65,20	
	P-valor=	2,6018E-33	
P-valor<0,05 Se rechaza la hipótesis nula			

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4: Área de rechazo de la hipótesis



Fuente: Elaboración propia

Debido a que el valor (p-valor) para esta prueba es menor a la significancia (0,05), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna que la cantidad óptima de residuos de polietileno de alta densidad mejora la consistencia (penetración) del cemento asfáltico.

H₀ = La hipótesis nula se rechaza

H₁ = La hipótesis alterna se acepta

4.4. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL AL 1% DE (HDPE)

1. Ordenar datos de la viscosidad de menor a mayor.

Tabla 4.14: Datos del ensayo de Viscosidad Saybolt Furol al 1% de (HDPE)

234	234	235	238	238
238	238	238	239	240
241	241	242	242	242
242	244	245	245	247
248	248	248	248	249
251	252	254	255	256

Fuente: Elaboración propia

2. Obtención del rango.

$N = 30$

$X_{\text{Max}} = 256 \text{ seg.}$

$X_{\text{Min}} = 234 \text{ seg.}$

Rango = 22

3. Intervalos, cálculo del número de intervalos de clase según Sturges.

Nº clase = 6

4. Amplitud de cada intervalo.

Amplitud = 3,7

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

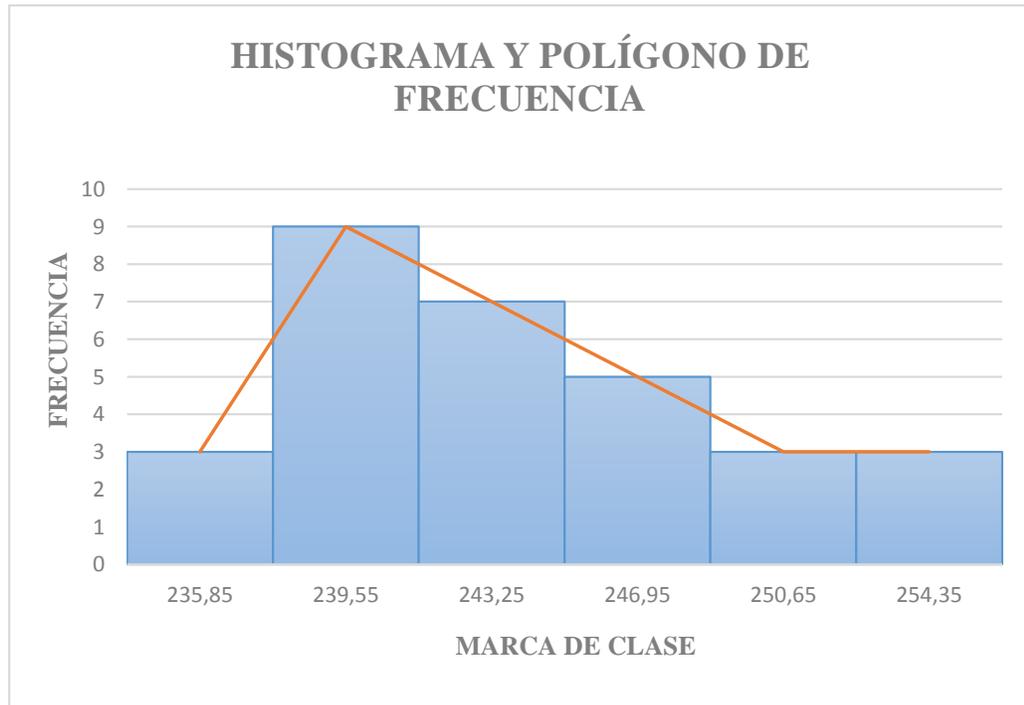
Tabla 4.15: Cálculo de la frecuencia absoluta y frecuencia relativa

L. Inf.	L. Sup.	Marca de clase C_i	Frec. Absoluta		Frec. Acumulada	
			fi	fi (%)	Fi	Fi (%)
234,0	237,7	235,9	3	10,0	3,0	10,0
237,7	241,4	239,6	9	30,0	12,0	40,0
241,4	245,1	243,3	7	23,3	19,0	63,3
245,1	248,8	247	5	16,7	24,0	80,0
248,8	252,5	250,7	3	10,0	27,0	90,0
252,5	256,2	254,4	3	10,0	30,0	100

Suma: 30 100

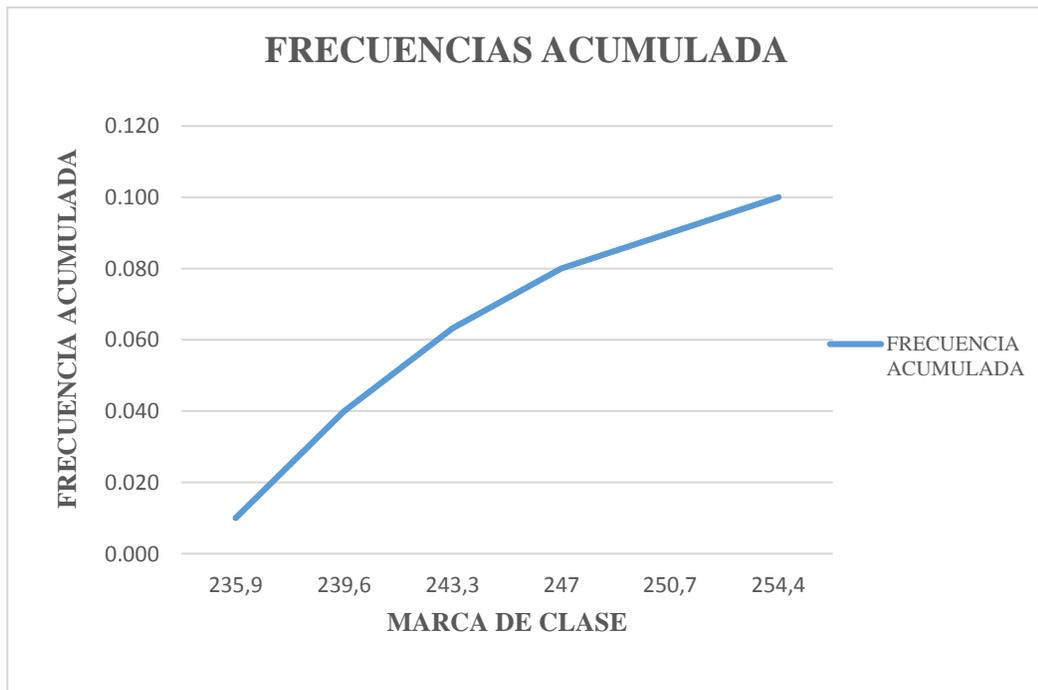
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5: Determinación del histograma y polígono de frecuencia



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6: Determinación de la curva de frecuencia acumulada



Fuente: Elaboración propia

4.4.1. Cálculos de medidas de tendencia central

Tabla 4.16: Resultados de los cálculos de las medidas de tendencia central de los ensayos de viscosidad Saybolt Furol al 1%

Medida de tendencia	Resultado	Unidad
Media	243,7	seg
Error típico	1,1	
Mediana	242,0	seg
Moda	238,0	seg
Desviación estándar	6,2	
Varianza de la muestra	38,3	
Curtosis	-0,8	
Coficiente de asimetría	0,3	
Rango	22,0	
Mínimo	234,0	seg
Máximo	256,0	seg
Suma	7312,0	seg
Cuenta	30,0	

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Prueba de ajustes de bondad Smirnov Kolmogorov

Cálculo de la probabilidad empírica o experimental P(x) de los datos.

Donde: **P(x)**= Probabilidad experimental o empírica de los datos

m= Número de orden

n= Número de datos

Tabla 4.17: Métodos para calcular la probabilidad empírica

Método	Probabilidad experimental P(x)
California	$P(x) = \frac{m}{n}$
Hazen	$P(x) = \frac{m - 0,5}{n}$
Weibull	$P(x) = \frac{m}{n + 1}$
Chegadayeve	$P(x) = \frac{m - 0,3}{n + 0,4}$
Blom	$P(x) = \frac{m - 0,375}{n + 0,25}$
Tukey	$P(x) = \frac{3m - 1}{3n + 1}$

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la diferencia P(x) - F(x) para todos los valores de x.

Tabla 4.18: Función de distribución acumulada Normal

Orden m	Viscosidad Saybolt Furol (seg)	$P(x) = \frac{m}{n + 1}$	$Z(x) = \frac{x - \bar{x}}{s}$	F(z)	$\Delta =$ $P(x) - F(z)$
1	234,00	0,032	-1,572	0,058	0,026
2	234,00	0,065	-1,572	0,058	0,007
3	235,00	0,097	-1,410	0,079	0,018
4	238,00	0,129	-0,926	0,177	0,048
5	238,00	0,161	-0,926	0,177	0,016
6	238,00	0,194	-0,926	0,177	0,016
7	238,00	0,226	-0,926	0,177	0,049
8	238,00	0,258	-0,926	0,177	0,081
9	239,00	0,290	-0,764	0,222	0,068
10	240,00	0,323	-0,603	0,273	0,049
11	241,00	0,355	-0,441	0,329	0,025
12	241,00	0,387	-0,441	0,329	0,058
13	242,00	0,419	-0,280	0,390	0,030
14	242,00	0,452	-0,280	0,390	0,062
15	242,00	0,484	-0,280	0,390	0,094
16	242,00	0,516	-0,280	0,390	0,126
17	244,00	0,548	0,043	0,517	0,031
18	245,00	0,581	0,205	0,581	0,000
19	245,00	0,613	0,205	0,581	0,032
20	247,00	0,645	0,528	0,701	0,056
21	248,00	0,677	0,689	0,755	0,077
22	248,00	0,710	0,689	0,755	0,045
23	248,00	0,742	0,689	0,755	0,013
24	248,00	0,774	0,689	0,755	0,020
25	249,00	0,806	0,851	0,802	0,004
26	251,00	0,839	1,174	0,880	0,041
27	252,00	0,871	1,335	0,909	0,038
28	254,00	0,903	1,658	0,951	0,048
29	255,00	0,935	1,820	0,966	0,030
30	256,00	0,968	1,981	0,976	0,008

Fuente: Elaboración propia

Selecciona la máxima diferencia Δ .

$$\Delta_{\text{Max}} = \text{Max. } (P(x) - F(x))$$

$$\Delta_{\text{Max}} = 0,126$$

Calcular el valor crítico del estadístico Δ , es decir Δ_0 , para un α del 5% y N igual al número de datos.

Tabla 4.19: Tabla del valor critico estadístico

Tamaño muestral N	Nivel de significancia α			
	0,2	0,1	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,3	0,34	0,4
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,2	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,20	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23
$N > 50$	$\frac{1.07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{N}}$

Fuente: Elaboración propia

Comparando los valores de Δ , con el valor crítico Δ_0 de la tabla con los siguientes criterios de decisión.

$\Delta_{Max} < \Delta_0$ = El ajuste es bueno

$\Delta_{Max} \geq \Delta_0$ = El ajuste no es bueno

$\alpha = 0,05$

$N = 30$

Dato de la tabla 4.19

$\Delta_0 = 0,24$

$\Delta_{Max} = 0,126 < \Delta_0 = 0,24$

Se concluye que los datos de Viscosidad Saybolt Furol se ajustan a la distribución normal, con el nivel de significancia del 5% o una probabilidad del 95%.

4.5. ESTADÍSTICA INFERENCIAL

Tabla 4.20: 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 =	1,13
Error probable	Ep =	2,22
Error probable %	Ep =	10,07

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.21: Cálculo del rango de confianza

Rango de confianza	$Va = X \pm Ep$	
$Va = 243,7 + 2,22 =$	245,95	seg
$Va = 243,7 - 2,22 =$	241,52	seg

Fuente: Elaboración propia

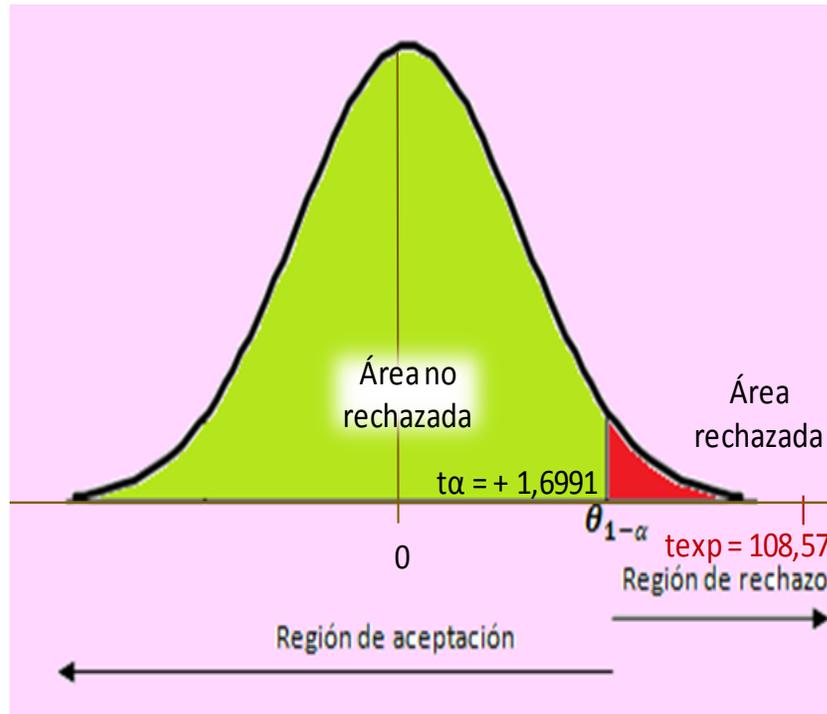
Intervalo de confianza = 245,95 - 241,52

Tabla 4.22: Prueba de hipótesis por el método de T Student

Prueba de hipótesis			
1era, Hipótesis= $H_0 \mu \leq 121 \text{ seg}$			
2da, Hipótesis= $H_1 \mu > 121 \text{ seg}$			
Significancia	$\alpha =$	0,05	
Media muestral	X =	243,73	seg
Número de datos	n =	30	
Desviación estándar	S =	6,19	
Media muestral	u =	121	seg
Grados de libertad	GL =	29	
t teórico	$t_{\alpha} =$	1,6991	
t experimental	$t_{exp} =$	108,57	
	P-valor =	1,0485E-39	
P-valor < 0,05 Se rechaza la hipótesis nula			

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7: Área de rechazo de la hipótesis



Fuente: Elaboración propia

Debido a que el valor (p-valor) para esta prueba es menor a la significancia (0,05), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna que la cantidad óptima de residuos de polietileno de alta densidad mejora la consistencia (viscosidad saybolt furol) de los cementos asfálticos.

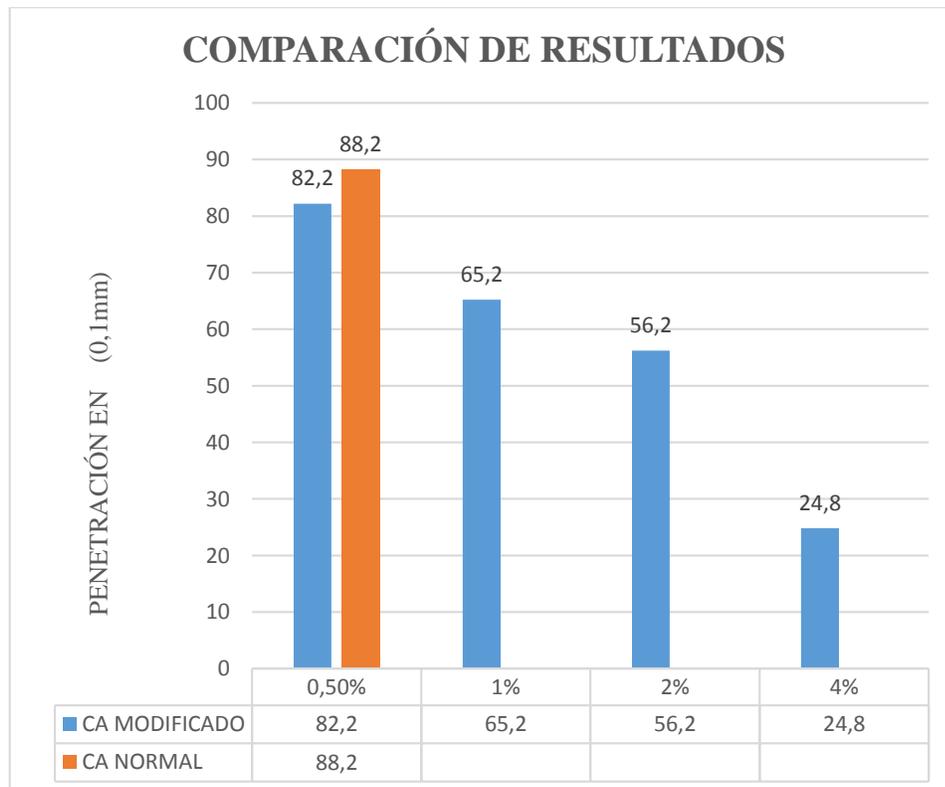
H_0 = La hipótesis nula se rechaza

H_1 = La hipótesis alterna se acepta

4.6. ANÁLISIS DE COMPARACIÓN DE CEMENTO ASFÁLTICO NORMAL Y EL MODIFICADO

4.6.1. Penetración

Figura 4.8: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de penetración

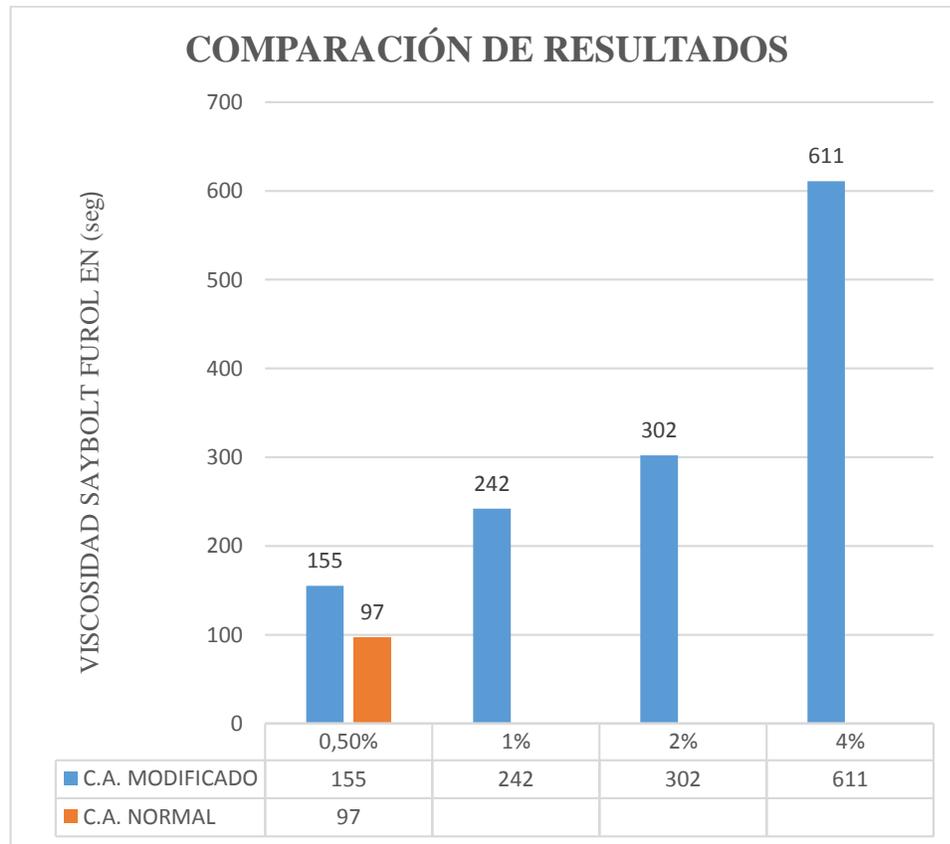


Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ensayo de penetración a 25°C muestran, que la adición de los residuos del polietileno de alta densidad, al cemento asfáltico normal refuerza la propiedad de la consistencia dándole más rigidez para que pueda soportar mayores cargas que un cemento asfáltico normal, se debe resaltar que el polietileno es material que tiene gran resistencia, lo que por defecto al añadir mayor porcentaje a la mezcla obtenga más rigidez.

4.6.2. Viscosidad Saybolt Furol

Figura 4.9: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de viscosidad Saybolt Furol



Fuente: Elaboración propia

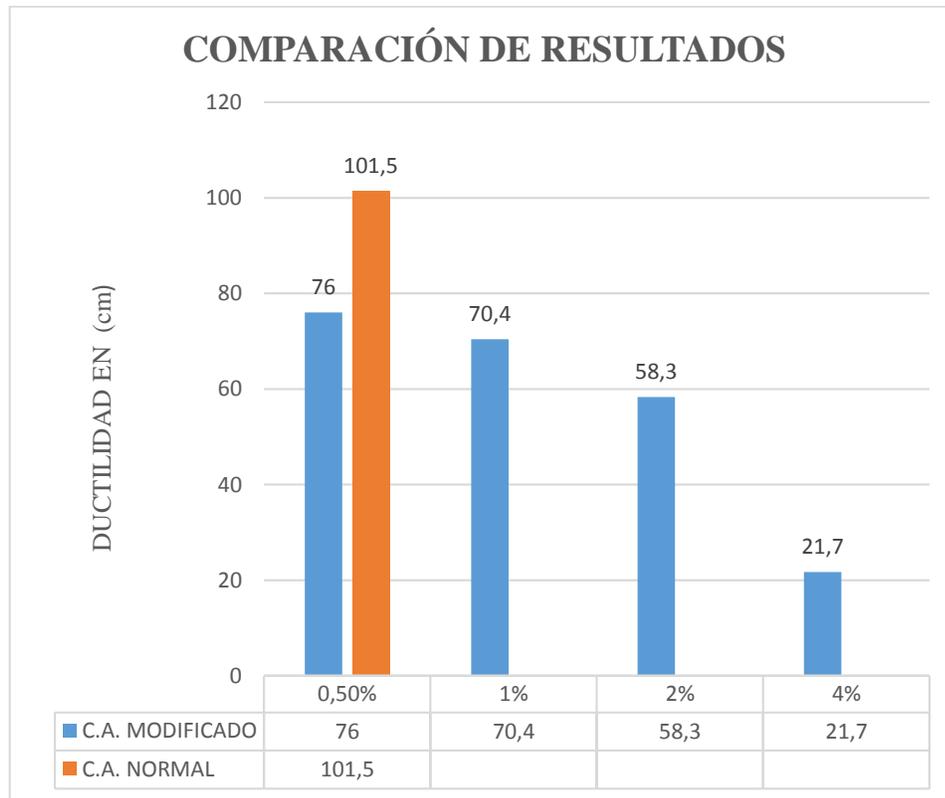
Los resultados de la viscosidad del cemento asfáltico se observan que esta va aumentando a medida que se adiciona los porcentajes de (HDPE).

Al determinar la viscosidad en los diferentes porcentajes se evidencio que, al adicionar el residuo de polietileno de alta densidad adquiere una consistencia mayor donde su grado de fluidez se eleva, se afirma que se obtuvo una mejora en la propiedad de la consistencia, dicha mejora nos dará mayor resistencia a la temperatura estándar que el cemento asfáltico tiende al fluir.

Se debe tomar en cuenta que ir adicionando mayores porcentajes incrementa la viscosidad, pero afectara a las otras propiedades del cemento asfáltico.

4.6.3. Ductilidad

Figura 4.10: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de ductilidad



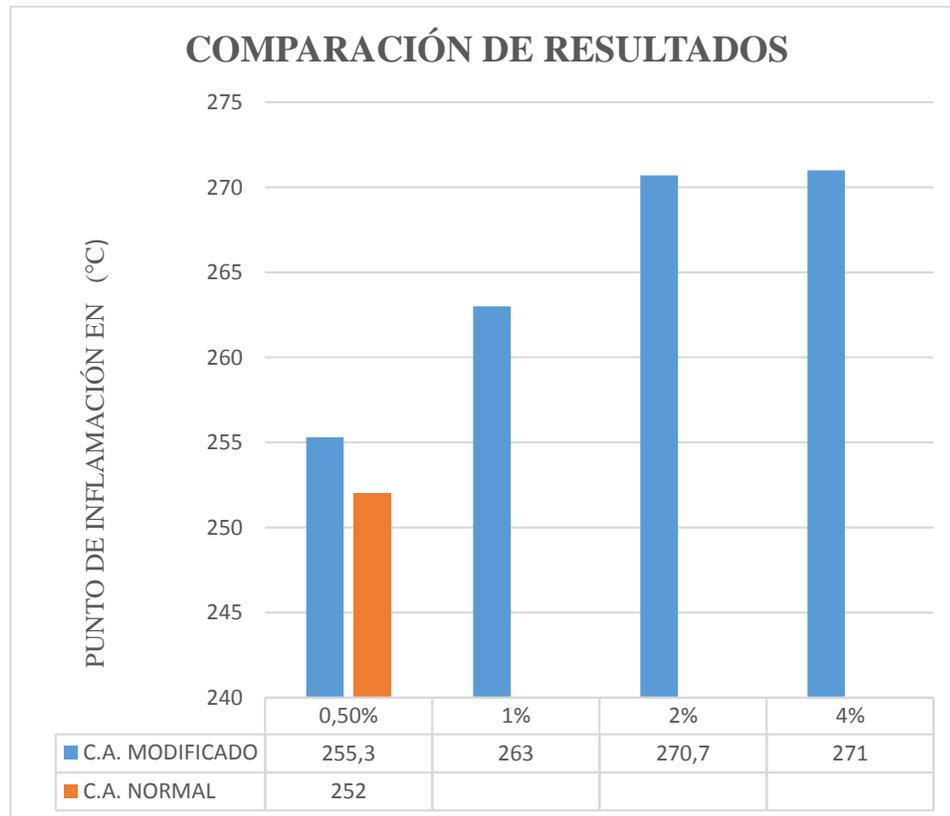
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la ductilidad del cemento asfáltico de los diferentes porcentajes de adición del residuo de polietileno de alta densidad, en comparación al cemento asfáltico de referencia va disminuyendo a medida que va adicionando los porcentajes, el cemento asfáltico va perdiendo plasticidad y elasticidad. La disminución de la ductilidad es mayor al añadir el ultimo porcentaje (4%), esto se debe porque el polietileno de alta densidad es un plasto mero (polímero que tiene alta resistencia y dureza) que no tiene esa propiedad elástica como los elastómeros.

Con los resultados se puede concluir que el residuo de polietileno mejora la consistencia, pero disminuye la propiedad de adhesión y cohesión, se analizará un porcentaje que no afecte de gran manera en dicha propiedad y se pueda equilibrar para que la modificación del cemento asfáltico cumpla con todas las propiedades.

4.6.4. Punto de inflamación

Figura 4.11: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de punto de inflamación



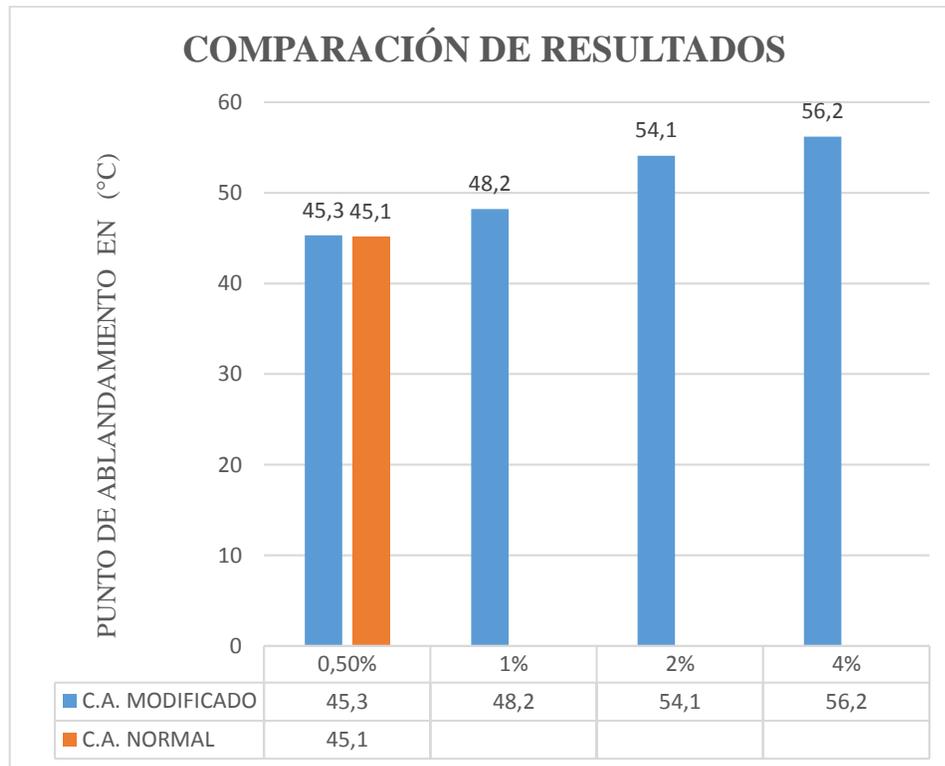
Fuente: Elaboración propia

Los resultados del punto de inflamación nos indica que, al adicionar los residuos de polietileno de alta densidad, se evidencia una mejora en la seguridad que nos brinda el cemento asfáltico es debido al residuo de (HDPE) que refuerza con gran resistencia a altas temperaturas, dando como resultado un cemento modificado que dé más confianza y seguridad cuando se esté manipulando en las diferentes obras civiles.

Se aprecia una mejora, pero el cemento asfáltico ya por norma tiene un punto de inflamación seguro, solo en cierta circunstancia se llega a elevar a las temperaturas normadas.

4.6.5. Punto de ablandamiento

Figura 4.12: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

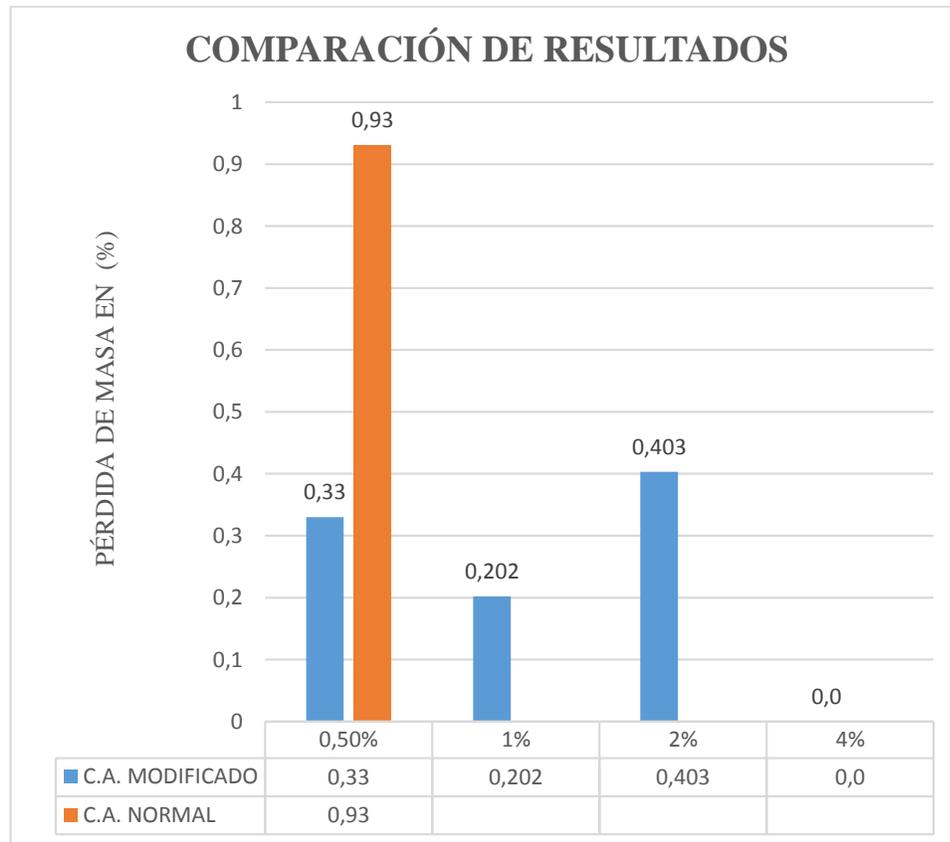
Los resultados del punto de ablandamiento a medida que se va adicionando los diferentes porcentajes se denota un incremento en el punto de ablandamiento que en el cemento asfáltico de referencia.

El incremento se debe al polietileno es un plasto mero que tienen gran resistencia a la elevada temperatura al adicionar paso a reforzar el punto donde el cemento asfáltico se ablanda, dando una conclusión que hay una mejora que nos servirá de parámetro de la temperatura ideal a la cual se puede mezclar con los agregados.

Se aprecia que al adicionar mayores porcentajes de residuos de (HDPE), incrementa la temperatura a la cual el cemento asfáltico tiende a fluir, se eligió el porcentaje de 1% porque se presenta mejoras en la propiedad de la consistencia y que no afecte de manera negativa en otras propiedades.

4.6.6. Pérdida de masa

Figura 4.13: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de pérdida de masa



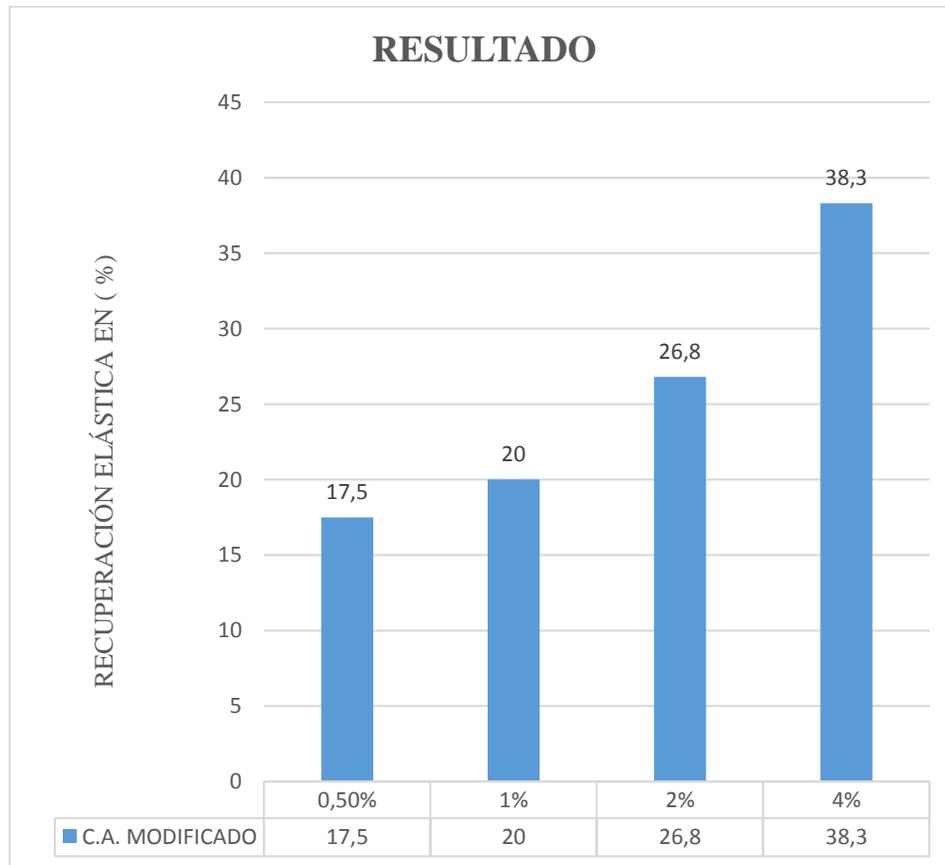
Fuente: Elaboración propia

Con los resultados del ensayo de pérdida de masa se verifica que adicionar el residuo de polietileno de alta densidad mejora al cemento asfáltico. Debido al polietileno adicionado el cemento asfáltico no pierde su masa, dando una mejora en la propiedad de la durabilidad y envejecimiento haciendo de un cemento asfáltico que brinde más años de vida de un pavimento flexible debido al polietileno es un material que tarda en degradarse en el medio ambiente.

Para mejorar la eficacia se debe industrializar el mezclado del cemento asfáltico y el residuo de (HDPE), para que no se denote las diferencias entre los porcentajes como en el 1% y 2%, se justifica al ser un mezclado manual, y las partículas del residuo se puede concentrar en una sola muestra por tal motivo se dan los resultados variados.

4.6.7. Recuperación elástica

Figura 4.14: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de recuperación elástica



Fuente: Elaboración propia

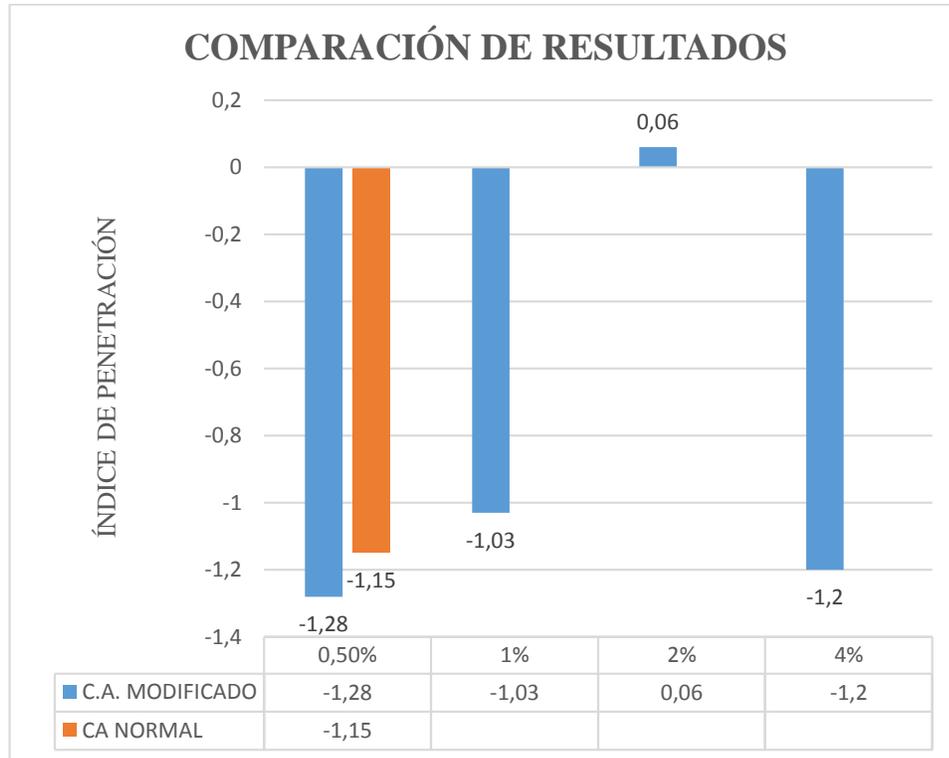
Los resultados de la recuperación elástica para el cemento asfáltico al adicionar los diferentes porcentajes no cumplen la norma del mínimo del 60%, debido a que el polietileno de alta densidad disminuye la elasticidad y plasticidad.

Este resultado es debido a que el residuo de (HDPE) brinda más rigidez al cemento asfáltico haciendo que disminuya la propiedad de la adhesión y cohesión, por tal motivo la recuperación elástica que le aportará será mínima al cemento asfáltico.

El cemento asfáltico que planteamos será uno que resista grandes cargas y temperaturas más elevadas su recuperación elástica no será muy visible, pero sí estará presente en el cemento asfáltico planteado.

4.6.8. Índice de penetración

Figura 4.15: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de índice penetración



Fuente: Elaboración propia

El resultado del cálculo del índice de penetración nos da que nuestro cemento asfáltico modificado presenta una susceptibilidad a la temperatura alta y poca elasticidad.

La susceptibilidad a la temperatura es una propiedad muy importante debido a que nos da un indicador de la temperatura a la que se deben mezclar los agregados con el cemento asfáltico en una mezcla asfáltica, los resultados obtenidos nos dan que nuestro asfalto cumple con las normativas para los cementos asfálticos modificados del manual de la ABC.

4.7. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

4.7.1. Concepto de objeto de investigación

Cantidad óptima de residuos de polietileno de alta densidad mejoran la consistencia de los cementos asfálticos.

Es la hipótesis planteada en el trabajo de investigación, se realizaron los debidos ensayos y parámetros estadísticos para poder demostrar que nuestra hipótesis es verdadera.

4.7.2. Materiales y equipo

4.7.2.1. Materiales utilizados en la investigación

- **Cemento asfáltico 85-100:**

El cemento asfáltico es de procedencia colombiano de la marca MULTINSA que se solicitó la cantidad de 20 kilogramos a la alcaldía municipal de Tarija.

- **Residuo de polietileno de alta densidad (HDPE):**

Se recolecto residuos de polietileno de alta densidad, se enfatizó la recolección de tubería de polietileno de alta densidad (Poli tubos), que su uso es mayormente en obras civiles del área hidráulica.

- **Agua destilada:**

El uso que se dio al agua destilada para realizar el ensayo de peso específico del cemento asfáltico.

- **Hielo:**

El uso que se dio al hielo para realizar el ensayo de punto de ablandamiento.

- **Vaselina:**

El uso que se dio a la vaselina para empapar los moldes ensayos para que no se adhiera de los ensayos de ductilidad, punto de ablandamiento y recuperación elástica.

- **Talco de pies:**

El uso que se dio al talco de pies es para mezclar con la vaselina para formar una mezcla homogénea que evitará que se adhiera el cemento asfáltico en los moldes de los ensayos de ductilidad, punto de ablandamiento y recuperación elástica.

4.7.2.2. Equipo utilizado para la investigación

- **Molino mecánico:**

El uso que se dio al molino mecánico, fue para moler los residuos de polietileno de alta densidad (HDPE), priorizando que el molino reduzca en partículas muy pequeñas que puedan retener el tamiz N°100.

- **Juego de tamices:**

El uso que se dio a los tamices fue para realizar una granulometría del residuo de polietileno de alta densidad, y poder separar lo más fino que retiene el tamiz N° 100 que se utilizó para modificar el cemento asfáltico.

- **Penetrometro de asfalto:**
Sirve para determinar la dureza mediante la penetración de materiales bituminosos sólidos y semisólidos. El ensayo de penetración se usa como medida de consistencia, valores altos de penetración indican consistencias más blandas.
- **Viscosímetro saybolt furol:**
Sirve para la medida empírica de la viscosidad saybolt furol de productos del petróleo a temperaturas específicas.
- **Aparato para determinar el punto de inflamación Cleveland de copa abierta:**
Se determina el punto de ignición para productos del petróleo y otros líquidos, excepto aceites, combustibles materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de 79°C.
- **Ductilímetro:**
Sirve para determinar la longitud que se puede elongar antes de romperse el cemento asfáltico.
- **Peso específico:**
Sirve para determinar la densidad del cemento asfáltico, mediante el uso de picnómetro a la temperatura requerida, el picnómetro debe ser de 24 a 30 ml de capacidad y el termómetro de -8 a 32°C.
- **Aparato para determinar el punto de ablandamiento:**
Con el cual se determina la temperatura a la cual el cemento asfáltico se ablanda y pierde propiedades de plasticidad, cuyo valor se encuentre en el rango de 30 a 200°C por medio del aparato de anillo y bola, el vaso de vidrio de 800 ml.
- **Aparato para película delgada:**
Sirve para determinar el efecto del calor y aire sobre materiales asfáltico semisólido, los efectos de este tratamiento son determinados para la medida de las propiedades asfálticas antes y después. El horno debe ser eléctrico que cumpla la norma ASTM E 145 de hornos tipo IB para operar a temperaturas superiores a 180°C, los platillos cilíndricos son de 140 mm de diámetro que deben ser de aluminio o acero inoxidable, el ensayo debe efectuarse a la una temperatura de 163°C durante 5 horas.

4.7.3. Procedimiento y rango de medición

4.7.3.1. Modificación del cemento asfáltico

Se realizó la modificación al cemento asfáltico adicionando el porcentaje de residuos de polietileno de alta densidad que previamente se tamizaron y se trabajó con el residuo que retiene el tamiz N° 100.

Para poder mezclar homogéneamente el cemento asfáltico con el residuo de polietileno de alta densidad, se calentó el cemento asfáltico hasta una temperatura de 150 °C, que es donde el cemento asfáltico pasa de su forma sólida a líquida, permitiendo adicionar el residuo de polietileno.

Lo que se debe tomar en cuenta a la hora de agregar el residuo de polietileno al cemento asfáltico, es que se debe agregar en proporciones pequeñas y mezclar con una varilla metálica hasta que se homogenice con el cemento asfáltico, caso contrario si no se sigue la recomendación dada el residuo de polietileno no se mezcla correctamente con el cemento asfáltico y tiende a no ser confiable dado que solo una parte del cemento asfáltico se modificó y en ocasiones el residuo de polietileno no se mezcla con el cemento asfáltico. La proporción óptima que mejora la consistencia del cemento asfáltico es de 1% de residuo de polietileno, se plantearon cuatro porcentajes (0,5%, 1%, 2% y 4%), se optó por el 1% porque mejora la propiedad de la consistencia y no afecta de gran manera en las otras propiedades del cemento asfáltico, se optó por un equilibrio donde se evidencie mejoras en una propiedad, pero tratando de que no influya negativamente en las demás propiedades.

El cemento planteado está pensado en zonas que tengan gran volumen de tráfico y climas cálidos.

4.7.3.2. Medición de la variable

La variable de la investigación son los porcentajes óptimos de residuos polietileno de alta densidad mejoran la consistencia del cemento asfáltico, se realizó mediante los ensayos de penetración y viscosidad saybolt furol que son los que miden la consistencia, la hipótesis planteada se confirmó con un cálculo estadístico que es verdadera, que el adicionar el residuo de polietileno de alta densidad al cemento asfáltico mejora la consistencia.

En la investigación se determinó que el 1% de residuo de polietileno es la cantidad óptima que mejora la consistencia del cemento asfáltico, para tener intervalos de medición confiable se realizaron 30 ensayos de penetración y 30 ensayos de viscosidad saybolt furol, con los dichos datos se procedió al cálculo de la estadística inferencial para determinar los rangos de confianza de nuestro cemento asfáltico modificado.

Se procedió a realizar una guía técnica del cemento asfáltico modificado con los residuos de polietileno de alta densidad con los parámetros más importantes.

Tabla 4.23: Guía técnica del cemento asfáltico modificado investigado

Cemento asfáltico con adición de 1% (HDPE)
Característica del producto

Ensayo	Unidad	Normativa		Resultado	Especificaciones	
		AASHTO	ASTM		Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C	0,1mm	T-49-97	D-5	65,20	62	66
Punto de Inflamación	°C	T-79-96	D-1310-01	263,00	260	-
Ductilidad a 25°C	cm.	T-51	D-113	70,40	68	-
Viscosidad Saybolt Furol 135 °C	seg	T-72	D-88	242,00	240	-
Punto de ablandamiento	°C	T-53-96	D-36	48,20	48	52
Índice de penetración		UNE 104-281		-1,03	-1,1	1
Recuperación elástica	%	T-301-99	D-6084-06	20,00	16	24
Ensayo de la mancha				No se realizó	Negativo	
Solvente gasolina standart				No se realizó	Negativo	
Solvente gasolina-xilol, % xilol				No se realizó	Negativo	
Solvente heptano-xilol, % xilol				No se realizó	Negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 3,2 mm, 163°C, 5 hrs.						
* Pérdida en masa	%	T 179-05	D-175	0,202	-	1
* Penetración del residuo, penetración original				No se realizó		

Fuente: Elaboración propia

4.7.4. Forma de cubicación

Lo que se propone para medir es en toneladas, por el motivo que el cemento asfáltico se lo vende en tambores reacondicionados de 190 kilos de capacidad.

Para la venta del cemento modificado se realizará en tambores reacondicionados de 190 kilos de capacidad por los cuidados que se debe dar al cemento asfáltico.

4.7.5. Costo por unidad de cubicación

Tabla 4.24: Análisis de precios unitarios del cemento asfáltico modificado

Análisis de precios unitarios	
Datos generales	
Proyecto:	Análisis de un cemento asfáltico modificado
Actividad:	Adición del residuo de (HDPE)
Cantidad:	190
Unidad:	kilogramos
Moneda:	Bolivianos

Descripción		Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1. Materiales					
1	Cemento asfáltico 85-100	Kg	188	9,39	1765,32
2	Polvo del residuo de (HDPE)	Kg	1,9	6,27	11,913
Total materiales					1777,23
2. Mano de obra					
1	Técnico	Hrs	0,09	20,5	1,85
2	Ayudante	Hrs	0,09	15	1,35
Subtotal mano de obra					3,20
Cargas sociales = (55% del subtotal de la mano de obra)					1,76
Impuesto IVA mano de obra= (13% de suma del subtotal de la mano de obra + carga sociales)					0,64
Total mano de obra					5,60
3. Equipo y herramientas					
1	Planta mezcladora de cemento asfáltico	Hrs	0,09	250	22,5
*	Herramientas= (5% del total de la mano de obra)				0,28
Total equipo, maquinaria y herramientas					22,78
4. Gastos generales					
*	Gastos generales = 5% de 1 + 2 + 3				1805,61
Total gastos generales y administrativos					90,28

5. Utilidad		
*	Utilidad = 0% de 1 + 2 + 3 + 4	1895,89
Total utilidad		0,00
6. Impuestos		
*	Impuestos IT = 3% de 1 + 2 + 3 + 4 + 5	1895,89
Total impuestos		56,88
Total precio unitario (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)		1952,77
Total precio unitario adoptado (con dos (2) decimales)		1952,77
(*) El proponente deberán señalar los porcentajes pertinentes a cada rubro		
Nota.- El Proponente declara que el presente Formulario ha sido llenado de acuerdo con las especificaciones técnicas, aplicando las leyes sociales y tributarias vigentes, y es consistente con el Formulario B-3.		

Fuente: Elaboración propia

El costo por cada tambor de 190 kg de cemento asfáltico modificado con residuo de (HDPE), es de 1952,77 bs. dando el precio unitario por 1 kilo de 10,27 bs.

4.8. ANÁLISIS DE COMPARACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUFLEX Y EL MODIFICADO CON RESIDUOS DE (HDPE)

Tabla 4.25: Guía técnica del cemento asfáltico modificado investigado

Cemento asfáltico con adición del 1% de (HDPE) Característica del producto

Ensayo	Unidad	Normativa		Resultado	Especificaciones	
		AASHTO	ASTM		Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C	0,1mm	T-49-97	D-5	65,20	62	66
Punto de Inflamación	°C	T-79-96	D-1310-01	263,00	260	-
Ductilidad a 25°C	cm.	T-51	D-113	70,40	68	-
Viscosidad Saybolt Furol 135 °C	seg	T-72	D-88	242,00	240	-
Punto de ablandamiento	°C	T-53-96	D-36	48,20	48	52
Índice de penetración		UNE 104-281		-1,03	-1,1	1
Recuperación elástica	%	T-301-99	D-6084-06	20,00	16	24
Ensayo de la mancha				No se realizó	Negativo	
Solvente gasolina standart				No se realizó	Negativo	
Solvente gasolina-xilol, % xilol				No se realizó	Negativo	
Solvente heptano-xilol, % xilol				No se realizó	Negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 3,2 mm, 163°C, 5 hrs.						
* Pérdida en masa	%	T 179-05	D-175	0,202	-	1
* Penetración del residuo, penetración original				No se realizó		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.26: Ficha técnica del cemento asfáltico Betuflex 60/85

Cemento asfáltico STRATURA BETUFLEX 60/85

Origen: Brasileiro

Característica del producto

Ensayo	Unidad	Normativa		Resultado	Especificaciones	
		AASHTO	ASTM		Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C	0,1mm	T-49-97	D-5	51,00	40	70
Punto de Inflamación	°C	T-79-96	D-1310-01	>235	235	-
Ductilidad a 25°C	cm.	T-51	D-113		-	-
Viscosidad Saybolt Furol	seg	T-72	D-88		-	-
Punto de ablandamiento	°C	T-53-96	D-36	68,00	60	-
Índice de penetración		UNE 104-281			-	-
Recuperación elástica	%	T-301-99	D-6084-06	90,00	85	-
Ensayo de la mancha				No se realizó	Negativo	
Solvente gasolina standart				No se realizó	Negativo	
Solvente gasolina-xilol, % xilol				No se realizó	Negativo	
Solvente heptano-xilol, % xilol				No se realizó	Negativo	
Ensayo de película delgada en horno, 3.2 mm, 163°C, 5 hrs.						
* Pérdida en masa	%	T 179-05	D-175	-0,123	-	1
* Penetración del residuo, penetración original				No se realizó		

Fuente: Elaboración propia

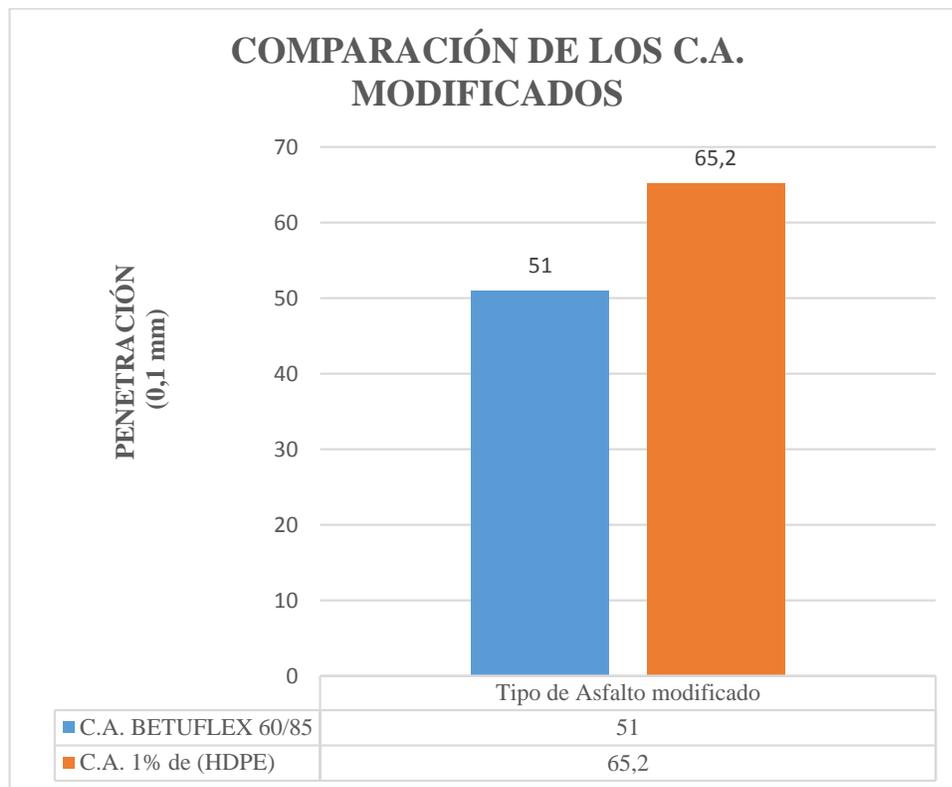
Tabla 4.27: Datos de los ensayos de los cementos asfálticos

Ensayo	Unidad	C.A. BETUFLEX 60/85	C.A. al 1% (HDPE)
Penetración a 25°C	0,1mm	51	65,2
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	seg	-	242
Ductilidad a 25°C	cm	-	70,4
Punto de inflamación	°C	235	263
Punto de ablandamiento	°C	68	48,2
Recuperación elástica	%	90	20
Índice de penetración		-	-1,03
Pérdida de masa	%	-0,123	0,202

Fuente: Elaboración propia

4.8.1. Penetración (ASTM D-5)

Figura 4.16: Comparación de los datos de penetración



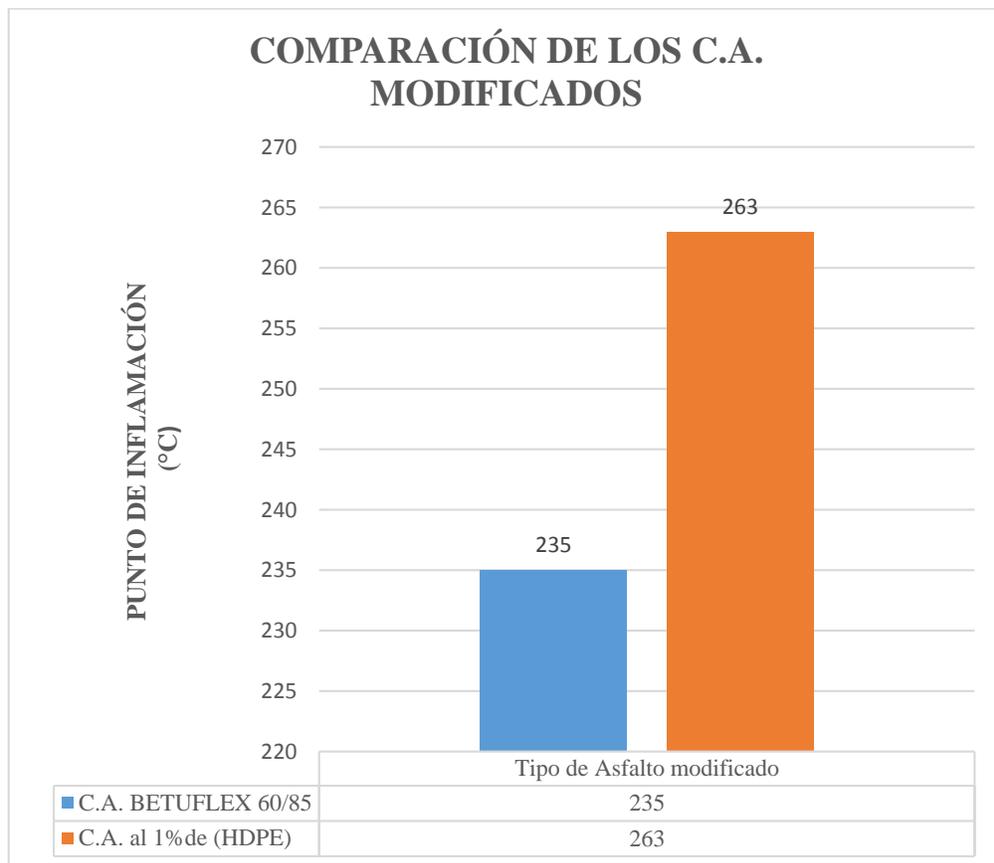
Fuente: Elaboración propia

Se evidencia una clara diferencia en los valores de ambos cementos asfálticos modificados donde el cemento Betuflex 60/85 tiene una penetración más baja, lo que da un indicador que posee una mayor rigidez en la propiedad de la consistencia con su resultado de 51 0,1mm, el cemento asfáltico investigado y modificado con los residuos de polietileno de alta densidad tiene una penetración más alta, lo que da un indicador que posee una menor rigidez en la propiedad de la consistencia con un resultado de 65,2 0,1mm.

El análisis que se puede dar es que el cemento asfáltico modificado investigado cumple con los valores de penetración que tienen los cementos asfálticos modificado que nos ofrecen las industrias internacionales.

4.8.2. Punto de inflamación (ASTM D-92)

Figura 4.17: Comparación de los datos de punto de inflamación

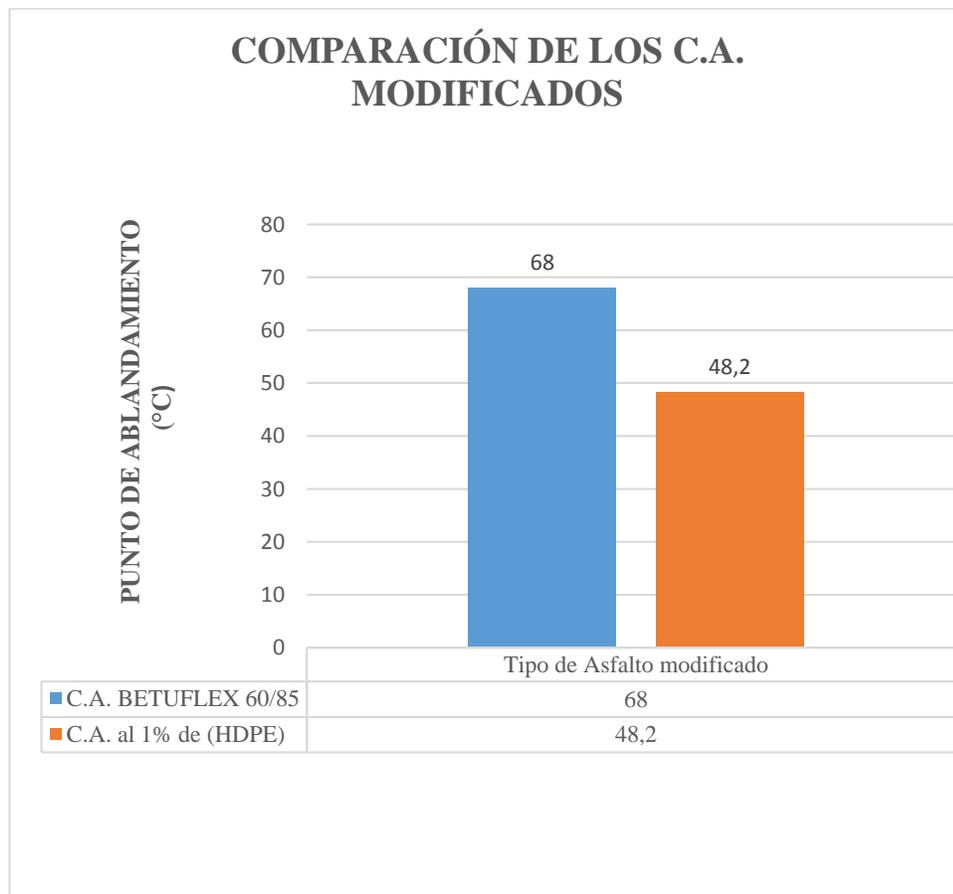


Fuente: Elaboración propia

En el punto de inflamación la información de la ficha técnica de cemento asfáltico Betuflex nos indica que su resultado es mayor a 235 °C, no da un valor exacto por tal motivo se analiza en base al cemento asfáltico modificado investigado, teniendo un valor de 263 °C, que nos evidencia una mejora importante en la seguridad que nos brinda el cemento asfáltico, con respecto al punto de inflamación del cemento asfáltico Betuflex 60/85 cumple con las normativas que se imparte de un mínimo de 235°C, que debe tener un cemento asfáltico.

4.8.3. Punto de ablandamiento (ASTM D-36)

Figura 4.18: Comparación de los datos de punto de ablandamiento

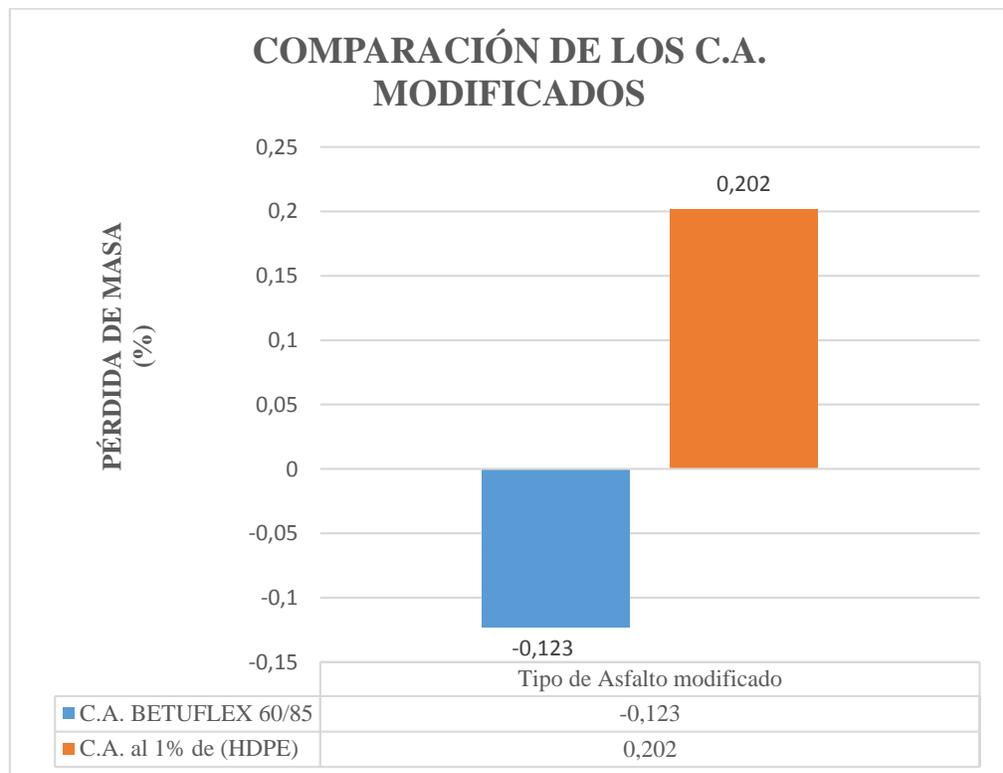


Fuente: Elaboración propia

En el punto de ablandamiento se evidencia una clara diferencia en los resultados en ambos cementos asfáltico modificados, donde el Betuflex tiene un mayor punto de ablandamiento con un valor de 68°C, y el cemento investigado tiene un valor de 48,2 °C. Se analiza que el cemento asfáltico modificado investigado no tiene un gran impacto en el punto de ablandamiento como lo tiene el cemento Betuflex, pero se debe denotar que el cemento Betuflex tiene una mayor consistencia por ende tienen un mayor valor en el punto de ablandamiento.

4.8.4. Pérdida de masa (ASTM D-1754)

Figura 4.19: Comparación de los datos de pérdida de masa



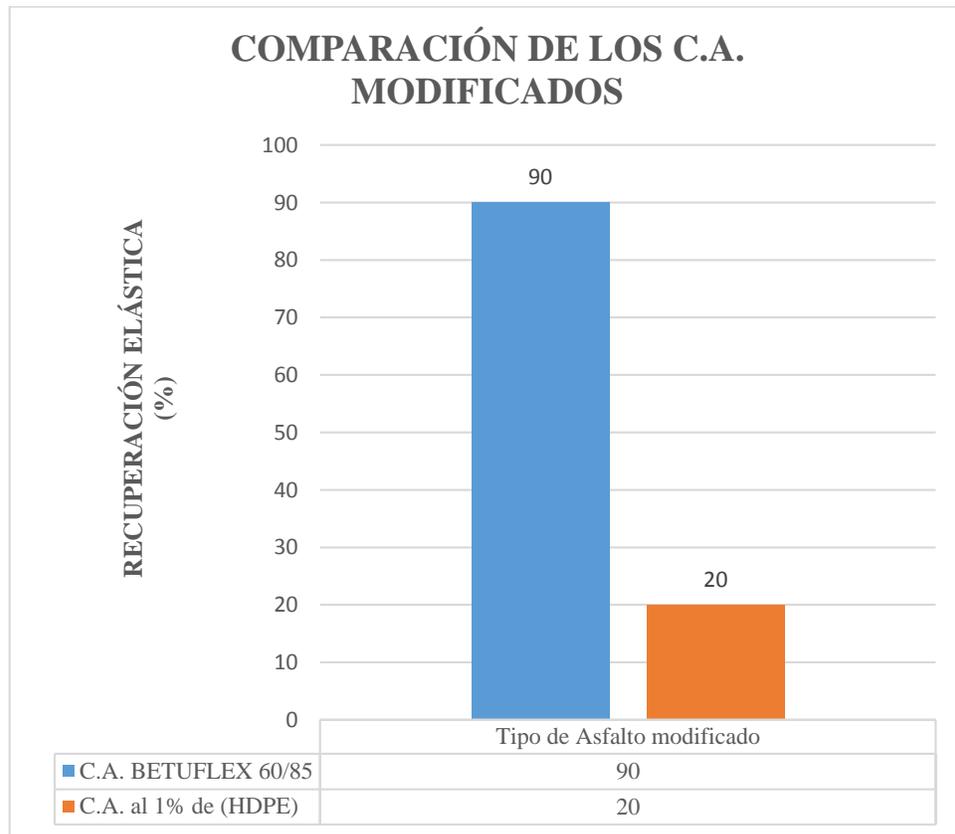
Fuente: Elaboración propia

En la pérdida de masa se evidencia una diferencia mínima en ambos cementos asfáltico, pero ambos cumplen los requisitos según sus fichas técnicas, donde su valor máximo es 1% se puede, dar un análisis de que el cemento asfáltico modificado investigado tiene una mejora menor con un valor de 0,202 % a comparación del cemento Betuflex con un valor de -0,123%, dicha diferencia se da por el motivo que el polímero con el que se realizó la modificación se analizó minuciosamente por gente experimentada en la modificación de los cementos asfálticos.

El cemento asfáltico modificado con el residuo de polietileno de alta densidad es un polímero resistente a elevadas temperaturas y la durabilidad de su composición, es lo que refuerza al cemento asfáltico dándole una mejora en la propiedad de la durabilidad del cemento asfáltico,

4.8.5. Recuperación elástica (ASTM D-6084)

Figura 4.20: Comparación de los datos de recuperación elástica



Fuente: Elaboración propia

En la recuperación elástica que presentan los 2 cementos asfálticos modificados, se evidencia una gran diferencia, el cemento asfáltico Betuflex es un cemento que tiene una gran recuperación elástica con un valor de 90%, se analiza que el cemento fue modificado con un polímero elastómero que le proporciona esa capacidad de recuperación, el cemento asfáltico modificado investigado no tiene esa gran capacidad de recuperación, por el motivo que el polietileno es un plástico que tiende a rigidizar al mezclarse, por tal motivo es el valor de recuperación elástica de 20%.

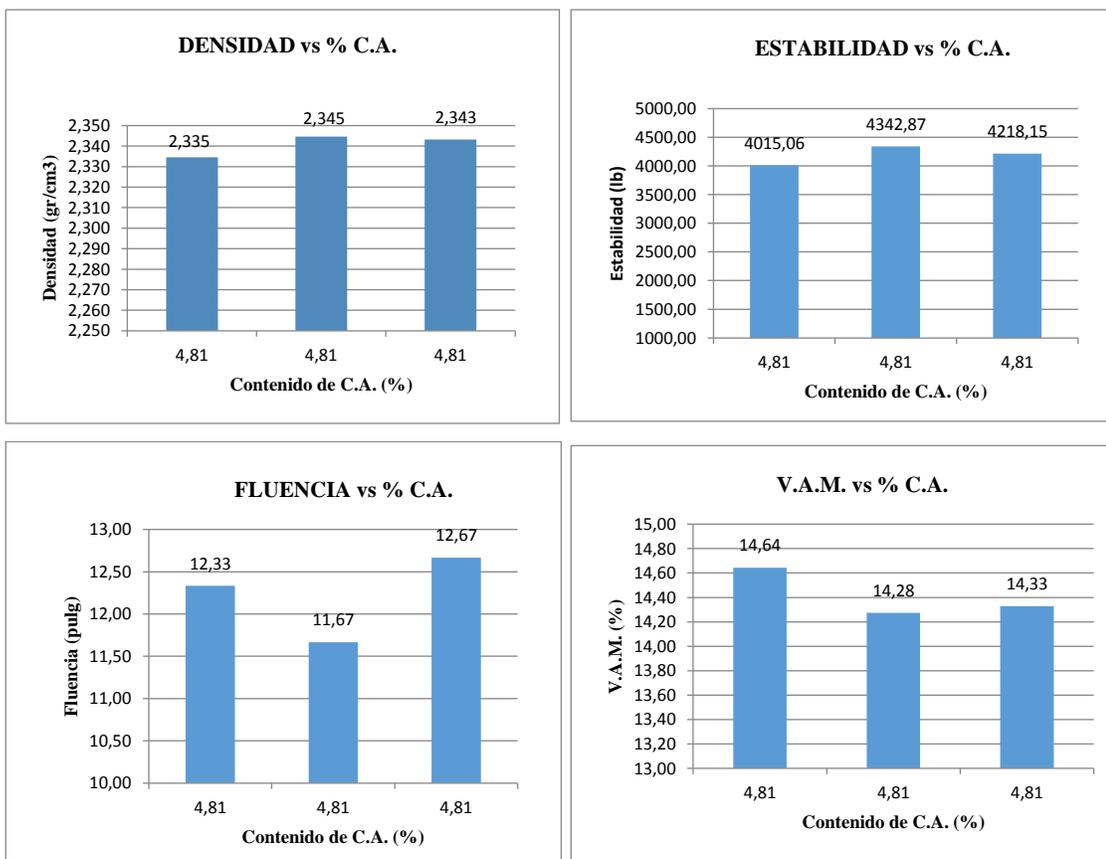
4.9. ANÁLISIS DE COMPARACIÓN DE LA MEZCLAS ASFÁLTICA CONVENCIONAL Y MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA

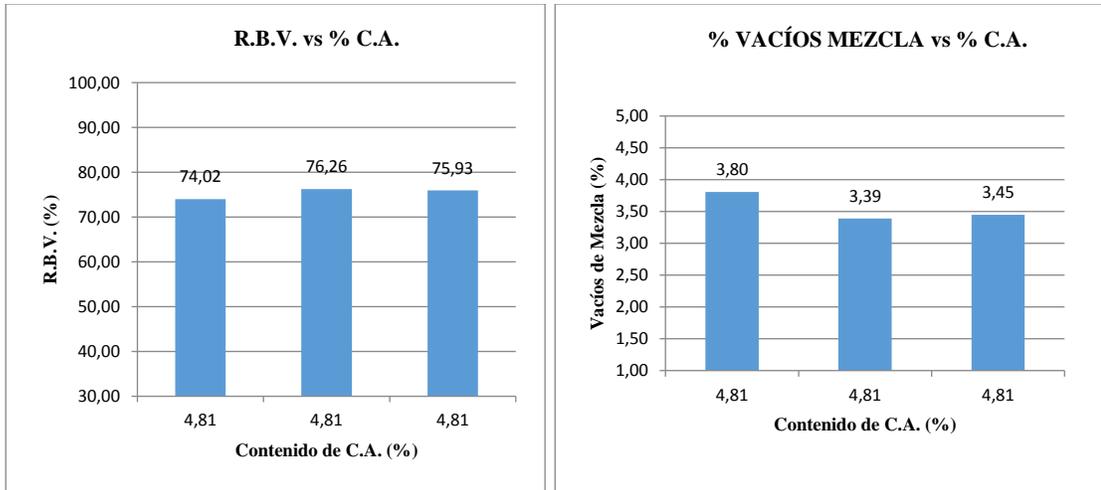
Tabla 4.28: Resultado de las 9 probetas de mezcla asfáltica convencional

Ensayo	Valor con él % óptimo de C.A.	Especificaciones
Estabilidad Marshall (Lb)	4192,03	Min. 1800 (lb)
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,34	-
Vacíos de la mezcla (%)	3,55	3- 5 (%)
Relación betumen vacío (%)	75,40	70 - 80 (%)
Fluencia (0,01 pulg.)	12,22	8- 16 (0,01 pulg)
Vacíos del agregado mineral (%)	14,42	Min. 13 (%)

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.21: Gráficas de la mezcla asfáltica convencional con él % óptimo de cemento asfáltico





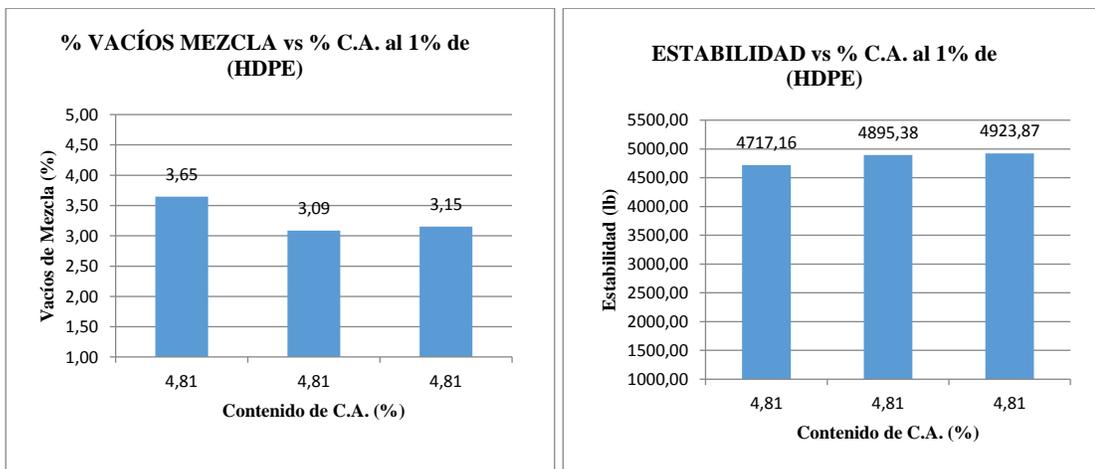
Fuente: Elaboración propia

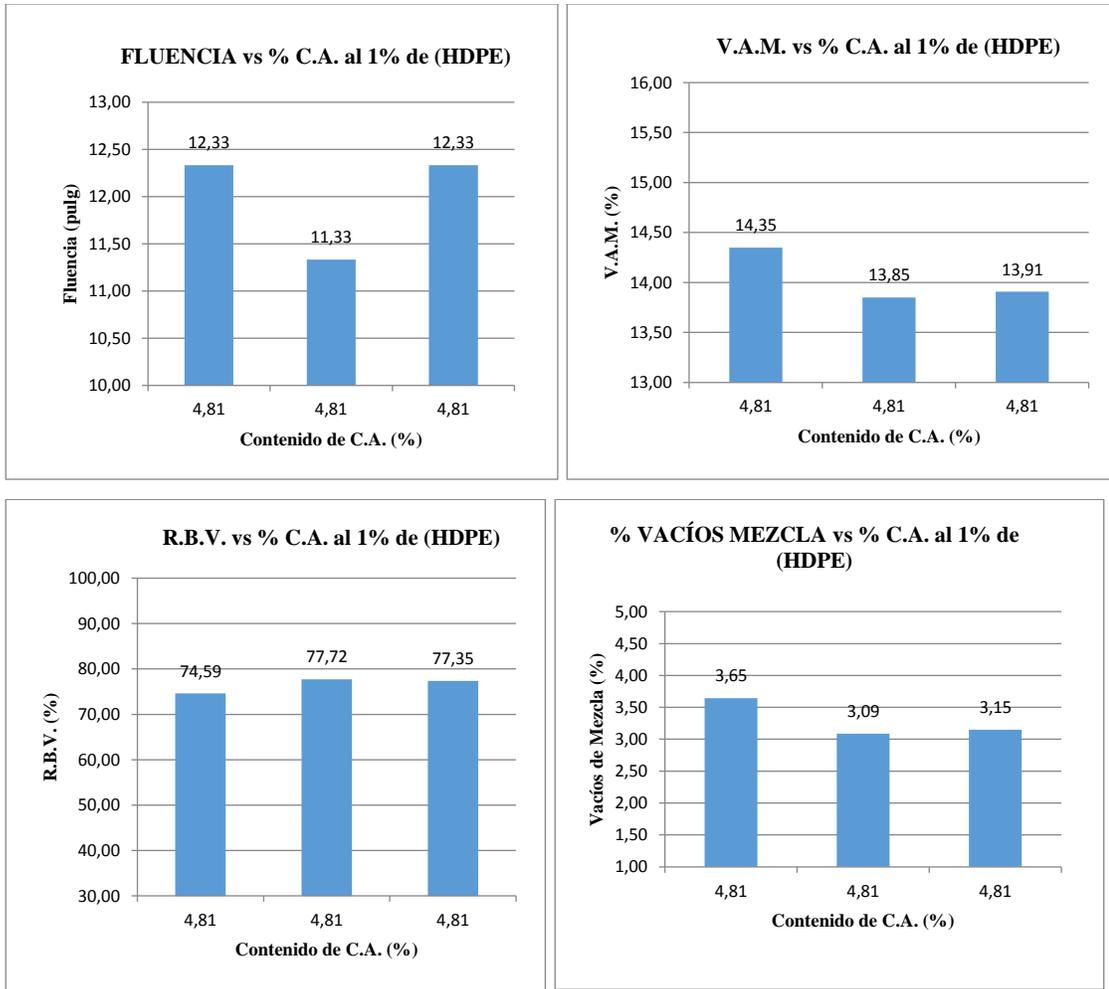
Tabla 4.29: Resultados de las 9 probetas de mezcla asfáltica modificada con residuos de (HDPE)

Ensayo	Valor con él % óptimo de C.A.	Especificaciones
Estabilidad Marshall (Lb)	4845,47	Min. 1800 (lb)
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,35	-
Vacíos de la mezcla (%)	3,29	3 - 5 (%)
Relación betumen vacío (%)	76,55	70 - 80 (%)
Fluencia (0,01 pulg.)	12,00	8- 16 (0,01 pulg.)
Vacíos del agregado mineral (%)	14,04	Min. 13 (%)

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.22: Gráficas de la mezcla asfáltica modificada con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico





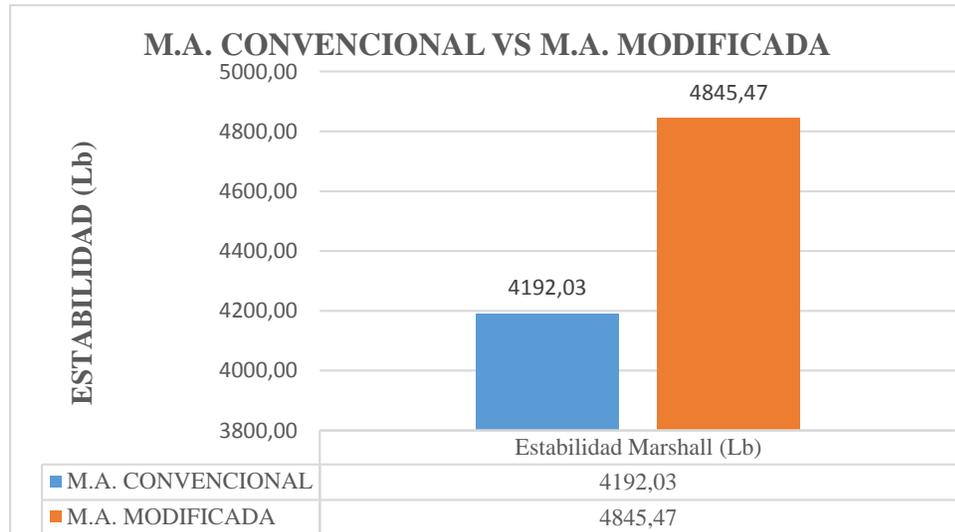
Fuente: Elaboración propia

Se analizó los parámetros mecánicos de la mezcla asfáltica convencional donde se comparó con la mezcla asfáltica modificada con el residuo de polietileno de alta densidad, se evidenció mejoras en la estabilidad, en la relación betumen vacío y en la densidad, da un indicador claro que el residuo de polietileno sí mejora los parámetros mecánicos de una mezcla asfáltica que es lo que se busca al realizar una comparación de la mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificada.

Se justifica el análisis con las siguientes gráficas comparativas:

4.9.1. Estabilidad

Figura 4.23: Comparación de los resultados de estabilidad

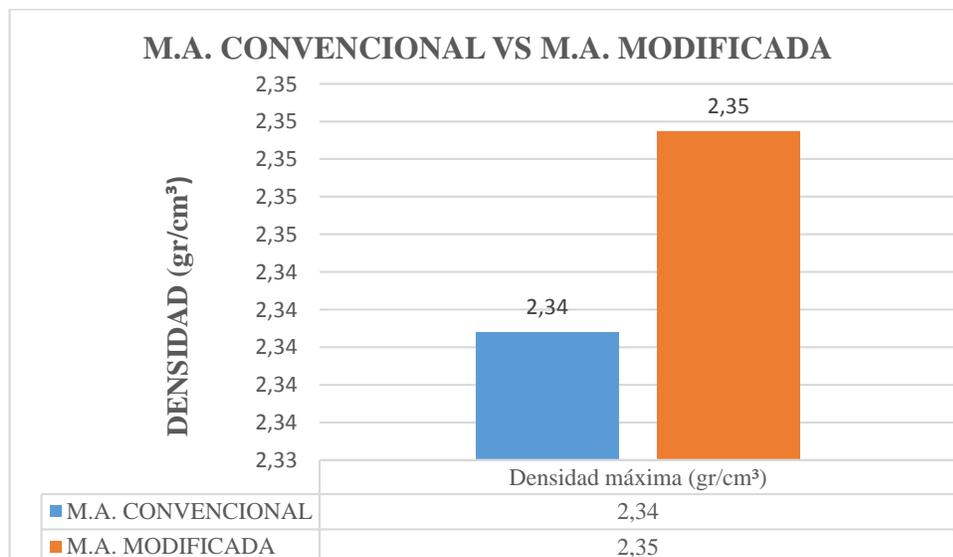


Fuente: Elaboración propia

Se analiza que la estabilidad mejora con la adición de residuos de polietileno al cemento asfáltico que se utilizó en la mezcla asfáltica modificada, como se evidencia en la gráfica la estabilidad de la mezcla asfáltica con un valor de 4845,47 Lb. a comparación del valor de la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional de 4192,03 Lb.

4.9.2. Densidad

Figura 4.24: Comparación de los resultados de la densidad

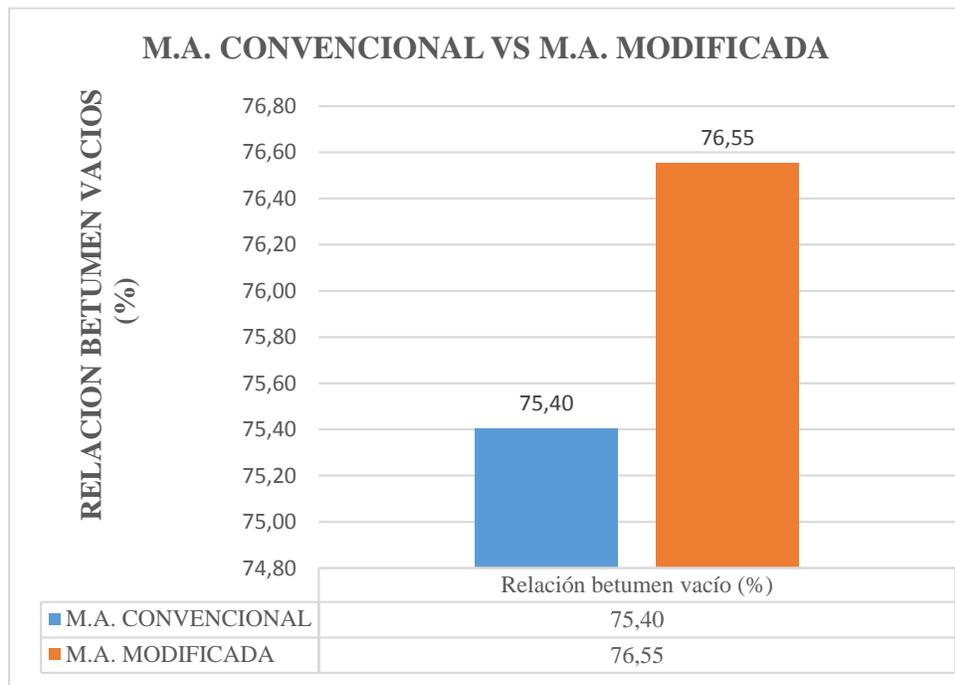


Fuente: Elaboración propia

Se analiza que la densidad de la mezcla asfáltica modifica incrementa lo que da un claro indicador que el cemento asfáltico modificado con el residuo de (HDPE), mejora la densidad de la mezcla asfáltica con un valor de 2,35 gr/cm³, la mezcla convencional tiene un valor de 2,34 gr/cm³, se concluye que el residuo de polietileno de alta densidad sí refuerza los parámetros mecánicos.

4.9.3. Relación betumen vacíos

Figura 4.25: Comparación de los resultados de RBV



Fuente: Elaboración propia

Se analizó que el residuo de polietileno de alta densidad tiene una influencia de mejora en la mezcla asfáltica modificada, en la relación betumen vacíos con un valor de 76,55 % donde se busca que la mezcla asfáltica se refuerce y tenga una mayor duración que las que tienen las mezclas convencionales, se puede concluir que sí se mejoró la relación betumen vacíos de una mezcla asfáltica.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio correspondiente el análisis de la consistencia del cemento asfáltico con adición de residuos de polietileno de alta densidad (HDPE), se llegó a las siguientes conclusiones:

- El objetivo general que se planteó en la investigación se cumple a cabalidad, porque se logró mejorar la propiedad de la consistencia al realizar ensayos de caracterización del cemento asfáltico en diferentes porcentajes (0,5%, 1%, 2% y 4%), y precisar un porcentaje óptimo (1%) de adición de (HDPE), dando como resultado un cemento asfáltico mejorado que nos brindará más seguridad al implementarlo en las obras viales de pavimentos flexibles.
- Los objetivos específicos planteados se cumplieron, se recopiló información de los cementos asfálticos modificados con polímeros, que sirvió para respaldo de la investigación planteada, ya que no hay normas establecidas para la modificación de los cementos asfálticos con residuos de polietileno de alta densidad.
- Se realizó la granulometría del residuo de polietileno con una cantidad de 273 gramos en los tamices (3/8, N°4, N°10, N°40, N°100 y N°200), se procedió a utilizar para la adición al cemento asfáltico los que retiene el tamiz N°100, por el motivo que es el que más fino retiene, para la modificación se necesita que las partículas de polietileno sea lo más fino posible.
- Para determinar la optimización de la combinación del cemento asfáltico y el residuo de polietileno de alta densidad se planteó 4 porcentajes de (0,5%, 1%, 2% y 4%), se analizó el comportamiento de cada uno, y se optó por el porcentaje del 1% que dio mejoras a la propiedad de la consistencia.
- Con el porcentaje óptimo del 1% de residuos de polietileno de alta densidad se realizó 30 ensayos de penetración y 30 ensayos de viscosidad saybolt furol.
- Se verificó que al adicionar el residuo de polietileno de alta densidad (1%), al cemento asfáltico presenta mejoras en la propiedad de la consistencia y en las

propiedades relacionada (durabilidad, seguridad y susceptibilidad a la temperatura).

- El precio unitario se estimó tomando en cuenta todos materiales y mano de obra necesaria para la modificación del cemento asfáltico, dando como resultado el precio por 1 kilogramo es de 10,27 bs.
- Se realizó una guía técnica del cemento asfáltico modificado investigado para guía de que parámetros debe cumplir y desempeñar.
- Las 9 probetas de la mezcla asfáltica convencional y las 9 probetas de la mezcla asfáltica modificada, se realizaron con el contenido óptimo de cemento asfáltico que se obtuvo de realizar 18 probetas de una mezcla asfáltica convencional, y calcular por el método Marshall, el contenido óptimo de cemento asfáltico de 4,81%.
- Se evaluó los parámetros mecánicos de la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada, donde se denota mejoras en los parámetros mecánicos de la estabilidad con un valor de 4845,47 libras de la mezcla asfáltica modificada investigada a comparación de la mezcla convencional con un valor de estabilidad de 4192,03 libras, la densidad de la mezcla asfáltica modificada investigada con un valor de 2,34 gr/cm³ a comparación de la mezcla convencional con un valor de 2,34 gr/cm³ y la relación de betumen vacío de la mezcla asfáltica modificada con un valor de 76,55 % a comparación de la mezcla convencional con un valor de 75,40 % donde se denota que al adicionar el residuo de polietileno al cemento asfáltico mejora la mezcla asfáltica dándonos una mezcla asfáltica con propiedades reforzadas, donde la estabilidad es la que se incrementa de manera significativa dando como resultado una mezcla asfáltica más reforzada.
- La hipótesis que se planteó en la investigación se pudo determinar mediante un análisis de estadística inferencial, se comprobó mediante el método t de Student, que dio como resultado que la hipótesis alterna es verdadera concluyendo que la cantidad óptima de residuo de polietileno de alta densidad mejoran la consistencia de los cementos asfálticos.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda revisar la guía técnica realizada en la investigación donde se plasman los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico modificado, que ayudará como guía base de su manejo en las obras viales.
- Se recomienda usar un molino mecánico triturador para triturar el residuo de polietileno de alta densidad, por el motivo que el molino mecánico puede triturar el polietileno hasta un punto que sus partículas se convierten en polvo.
- Se recomienda seguir los parámetros establecido para la modificación del cemento asfáltico con el residuo de polietileno de alta densidad.
- Se recomienda que al modificar el cemento asfáltico al adicionar el residuo de polietileno de alta densidad agregar en pequeñas cantidades y mezclar a una temperatura de 150 °C para que se forme una mezcla homogénea entre cemento asfáltico y polietileno de alta densidad.
- Es recomendable realizar 3 ensayos para caracterizar el cemento asfáltico para obtener resultados más confiables.
- Es recomendable seguir las normas ASTM Y AASHTO para los ensayos de caracterización del cemento asfáltico.
- Se recomienda calcular un contenido mínimo de cemento asfáltico, para calcular el contenido óptimo de cemento asfáltico para una mezcla asfáltica.
- Se recomienda cuando se dosifica los agregados para mezcla asfáltica usar una balanza con una precisión según lo que detalle la norma.
- Se recomienda tomar con un termómetro de 360°C siempre la temperatura cuando se realiza la mezcla asfáltica de los agregados con el cemento asfáltico se debe alcanzar una temperatura de 140 °C y 180°C según el libro pavimentos materiales, construcción y diseño del autor Hugo Rondón Quintana, que son respaldados por las normas de las INVIAS.
- Se recomienda cuando se procederá a romper las probetas en el equipo Marshall siempre estar atento a las lecturas de la estabilidad y flujo para obtener datos más precisos.
- Revisar siempre los equipos de laboratorio para evitar resultados dudosos.

- Se recomienda revisar investigaciones realizadas en otras universidades como respaldo, por el motivo que no hay normas establecidas para la modificación de cemento asfálticos con polímeros.
- Se recomienda usar vestimenta de seguridad, por el motivo que se trabaja con cemento asfáltico calentado a temperaturas donde es peligroso si se llega a vaciar sobre la humanidad del investigador.
- Se recomienda no recalentar el cemento asfáltico, por el motivo que va perdiendo sus propiedades físico-mecánicas.