

1.1 INTRODUCCIÓN

Construir pavimentos asfálticos en zonas con clima extremo, se ha transformado en un problema complejo. Agrietamientos prematuros o ahuellamiento se producen cuando pavimentos asfálticos deben prestar servicios en condiciones de temperaturas límite. La solución más frecuente para este tipo de dificultades, es el empleo de asfaltos modificados (Del tipo SBS).

Siendo el objetivo principal del ingeniero diseñador de mezclas asfálticas mejorar el comportamiento estructural de los pavimentos y ofrecer comodidad y seguridad al usuario, se requiere buscar la forma de modificar las propiedades mecánicas de la carpeta asfáltica, lo que se consigue con la adición del polímero al asfalto.

La utilización de ligantes para la conformación de mezclas asfálticas es una temática permanente en la ejecución de pavimentos flexibles, sin embargo en los últimos años la necesidad de contar con productos más resistentes a las condiciones climáticas y de carga han hecho que los fabricantes de cementos asfálticos introduzcan en el mercado asfaltos modificados utilizando para su modificación diferentes productos entre los que sobresalen los polímeros elastoméricos.

Es posible modificar químicamente un asfalto mediante la incorporación de aditivos modificadores. La modificación química requiere muy poca energía mecánica en comparación con la requerida por los asfaltos modificados con polímeros. En muchas disciplinas, la búsqueda de nuevas tecnologías y procesos que simplifiquen y/o reduzcan los costos de construcción, es una tarea constante.

Las obras viales no son una excepción, en particular aquellas que consideran pavimentos flexibles.

Este estudio aborda la problemática desde dos perspectivas, por un lado, la optimización de recursos y por otro, la introducción de nuevos procesos y materiales.

Es consenso entre especialistas en construcción de caminos que los pavimentos elaborados con asfaltos normales en climas extremos (frío o calor), tienen altas probabilidades de falla.

En vista de lo anterior, el presente Trabajo de investigación, se ha enfocado hacia el procedimiento de modificación química en el laboratorio con agregados locales, cemento asfálticos conocidos y la adición del ácido fosfórico (Ortofosfórico H_3PO_4) en el asfalto, determinando el efecto de la modificación en las propiedades y características de los cementos asfálticos.

Los materiales considerados son cementos asfálticos CA 85-100 y áridos procedentes ambos de la Alcaldía Municipal ubicada en la comunidad de “la Pintada”, además cementos asfálticos CA 85-100 y áridos procedentes que tiene el proyecto Iscayachi-Copacabana ubicada en la comunidad de “Molino”.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Las carreteras en Bolivia ocupan un lugar muy importante dentro de su infraestructura debido a que contribuyen al desarrollo del país, por ello es necesario darles el mantenimiento adecuado para alargar su vida útil. Existen diferentes tratamientos, entre los que se encuentra: el uso de mezclas asfálticas en caliente, en frío. Actualmente se quiere introducir en Bolivia el uso de mezcla con asfaltos modificados.

La exigencia de obtener obras viales de mayor calidad, durabilidad, seguridad, y de buenas características, cada día es más trascendente, debido principalmente a la mayor necesidad y al considerable aumento de tráfico en nuestro medio.

Se conoce poco acerca de la existencia de un estudio sobre la modificación que tiene principios químicos es que pretendemos desarrollar este trabajo una modificación química específica para condiciones locales con agregados y cemento asfáltico en la producción mezclas asfálticas, ya que un mal manejo del mismo puede causar diferentes tipos de fallas, menor durabilidad, incomodidad al usuario, más mantenimiento y mayor costo de las obras.

Al analizar las modificación química con cemento asfáltico se aportará para orientar a estudiantes, docentes y a personas que se desempeñan en el área de diseño y construcción de carreteras de pavimentos flexibles, en lo fundamental y básico que respecta a esta área de la ingeniería, determinando si se puede modificar el asfalto en la vida útil de la carpeta asfáltica.

1.3. DISEÑO TEÓRICO

1.3.1 Planteamiento del problema

1.3.1.1 Situación problemática

En Bolivia se ha venido implementando cada vez más nuevas ideas que permitan el desarrollo y mejoramiento de los pavimentos, de modo que el país pueda contar con una infraestructura vial acorde a sus necesidades es por esto que surgen los estudios de investigación sobre modificación de asfaltos, como una forma de mejorar las propiedades del ligante modificado y dar solución a ciertos inconvenientes que actualmente presentan.

El problema surge porque hay algunas condiciones, sobre todo climáticas y de cargas que van evolucionando a mayores requerimientos a los pavimentos, el asfalto como aglutinante es un excelente material, pero en algunas zonas este asfalto convencional, no atiene estos requerimientos, estas propiedades originarias no son suficientes para poder resistir las temperaturas, cargas, etc. por lo tanto se debe ayudar a estos asfaltos, y esa es la tarea de los modificación química del ligante.

El envejecimiento es un problema que afecta a todos los asfaltos, debido a cambios subsecuentes en sus propiedades físicas y químicas lo cual tiene un efecto negativo en su comportamiento y durabilidad durante su vida útil.

Está plenamente comprobado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adherencia en una amplia gama de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito.

Sin embargo, el creciente incremento de volumen de tránsito, la magnitud de las cargas y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que en algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

Este estudio nace del interés para verificar la modificación química al ligante obtenido, deberá ser capaz de demostrar un desempeño adecuado al uso y la durabilidad de los pavimentos, para obtener mezclas resistentes a las deformaciones permanentes y fisuramientos.

1.3.1.2 Problema

Los problemas e inquietudes ya mencionadas nos conducen a hacernos una pregunta

¿Si se estudia las propiedades físicos mecánicas del ligante in situ modificado en su condición química, nos permitirá determinar sus variaciones?

1.3.2 Objetivos

1.3.2.1 Objetivo general

Estudiar el comportamiento modificado químicamente del ligante aplicado a pavimentos flexibles, sus características y propiedades físico mecánicas.

1.3.2.2 Objetivos específicos.

- Analizar la metodología para la modificación química de ligantes in situ.
- Realizar los ensayos de laboratorio tanto al cemento asfáltico como al agregado grueso y fino para garantizar la calidad del materiales usados.
- Realizar una investigación sobre el procedimiento de modificación química en laboratorio con la adición del ácido fosfórico (Fosfórico H_3PO_4).

- Realizar ensayos físicos mecánicos comparativos las propiedades del cemento asfáltico normal y el asfalto modificado. Observar y analizar estos cambios y determinar más susceptible y como afecta .
- Con resultados obtenidos elaborar conclusiones y recomendaciones sobre el trabajo realizado.

1.3.3 Hipótesis.

Si aplicamos modificaciones química porcentuales usando (ácido fosfórico) en el ligante 85//100, entonces obtendremos variaciones en el comportamientos físico mecánico de sus propiedades constructivos.

1.3.4 Definición de Variables Independientes y Dependientes

1.3.4.1 Variable Independiente

Porcentajes de adición de ácido fosfórico (H_3PO_4)

1.3.4.2 Variable Dependiente

Propiedades físico-mecánicas del ligante.

1.3.4.3 Conceptualización y Operacionalización de Variables

Tabla 1.1 Conceptualización y Operacionalización de Variables

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor Acción
VARIABLE INDEPENDIENTE Porcentajes de adición de ácido fosfórico (H ₃ PO ₄)	Se refiere a los distintos porcentajes modificados de ácido fosfórico, al porcentual que se adicionaran al cemento asfáltico convencional.	Concentración porcentual	80%	% m/m Mezcla
VARIABLE DEPENDIENTE Propiedades físico -mecánicas	Mide la consistencia de los cementos asfálticos	Viscosidad:	60°C	Norma AASTHO
	Valores altos de penetración indicaran las consistencias suaves.	Penetración:	25°C	Norma AASTHO
	La capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramientos	Ductilidad:	100+	Norma AASTHO
	Identifica la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado sin peligro que se inflame	Punto de inflamación:	232°C	Norma AASTHO
	Representa aquella a la cual el cemento alcanzara un determinando fluidez	Punto de Ablandecimiento:	232°C	Norma AASTHO
	Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar las correcciones de temperatura y volumen	Peso específico:	1,023	Norma AASTHO

Fuente: Elaboración Propia

1.4 DISEÑO METODOLÓGICO

1.4.1 Unidad de estudio y decisión muestral

1.4.1.1 Unidad de estudio

Características del cemento asfáltico.

1.4.1.2 Población

TIPOS DE MODIFICACIONES EN LIGANTES ASFÁLTICAS



Fuente: Elaboración Propia

1.4.1.3 Muestra

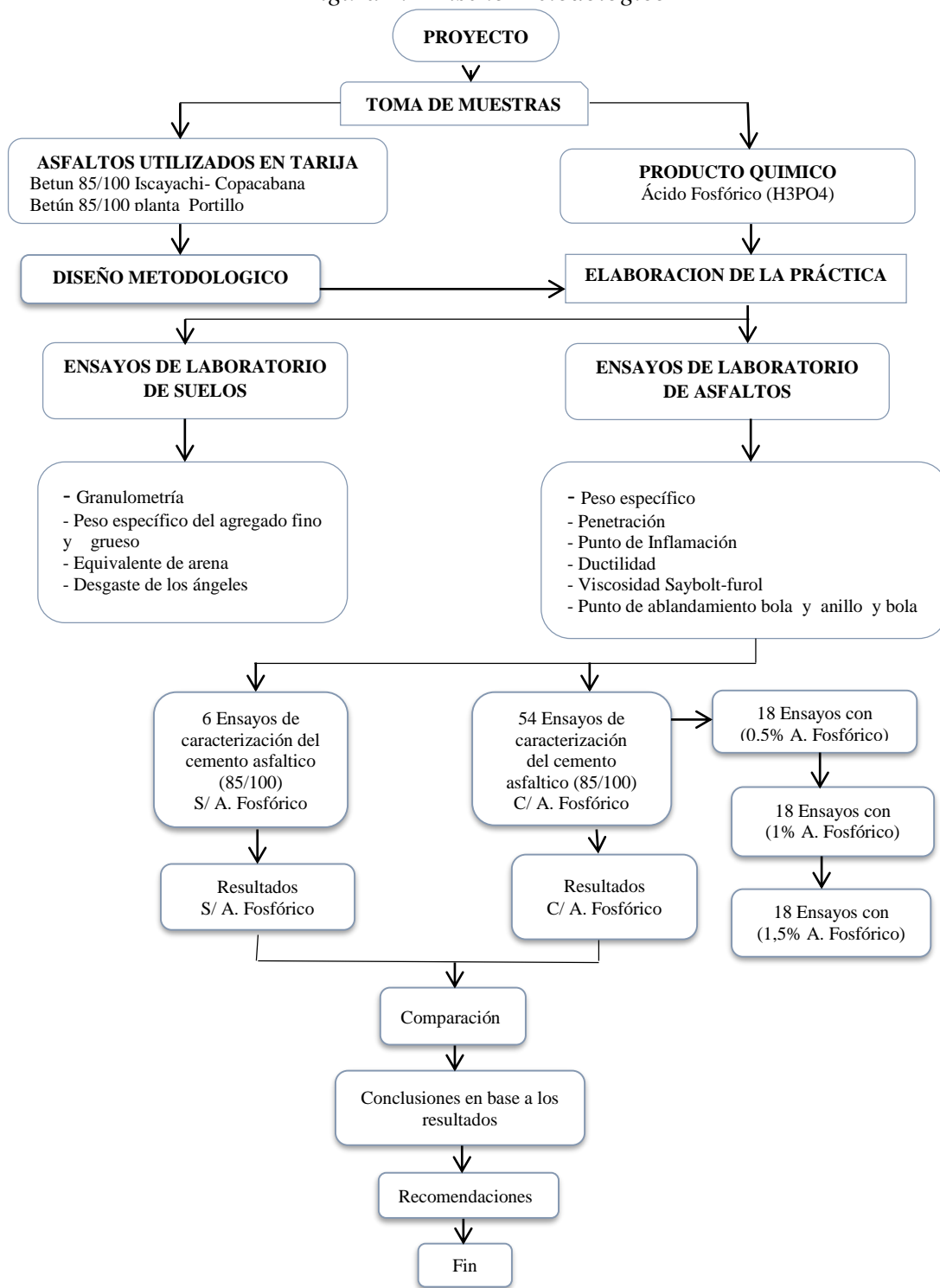
Modificación química con ácido fosfórico (H_3PO_4).

1.4.1.4 Muestreo

Para la obtención de cemento asfáltico realizara un muestreo no probabilístico debido a que sólo se tomará en cuenta la muestra que en este caso será sólo el asfalto utilizado en nuestro medio C.A 85-100 con el que se trabajará para hacer los ensayos de laboratorio y obtener datos.

1.4.1.5 Diseño Metodológico

Figura 1.1 Diseño Metodológico



Fuente: Elaboración Propia

1.4.2 Métodos y Técnicas Empleadas

1.4.2.1 Experimentales

La realización de la investigación se plantea como:

Experimental; ya que se realizaran netamente ensayos de caracterización en el laboratorio del comportamiento del asfalto modificado con ácido fosfórico.

1.4.2.2 Experimento

Se realizan ensayos de caracterización a todos los materiales, tales como:

- Ensayo para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T 51)
- Ensayo de penetración (ASTM D 5 AASHTO T 49)
- Ensayo para determinar la densidad (ASTM D 71 AASHTO T229)
- Ensayo para determinar el punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleverland (ASTM D 1310 AASHTO T 79)
- Ensayo para determinar la viscosidad (ASTM D 217 AASHTO T202)
- Ensayo para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53)

Ensayos realizados para los agregados

- Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E 40 AASHTO T27)
- Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176)
- Método para determinar el desgaste mediante de la Máquina de los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T 96)
- Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127 ASSTHO T85)
- Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 ASSTHO T84)

Todo esto con el fin de ver las características que presenta el cemento asfáltico después de cada modificación química.

Por otra parte se analiza el comportamiento de la mezcla asfáltica en la que se incluye el asfalto modificado de manera tal que permita al investigador partir de la observación de fenómeno o situaciones particulares que enmarcan el problema de investigación.

1.4.2.3 Plan de trabajo

El método o técnica que se realiza para obtener los datos suficientes en este trabajo de investigación consiste en la caracterización de los materiales, el diseño y estudio de las propiedades mecánicas mejoradas con ácido fosfórico (Ortofosfórico H_3PO_4), y la evaluación de los mejoras en la vida útil del pavimento.

En el siguiente trabajo de estudio los criterios tomados en cuenta para la definición de la modificación experimentales se basaron en características del asfalto que será manipulado en laboratorio, es decir cómo se está tratando con un cemento asfáltico que se clasifica según su penetración (85-100), entonces esta propiedad será de mayor importancia siendo una limitante para poder conocer propiedades físicas mecánicas del ligante, se diseñará una mezcla asfáltica convencional sin ninguna adición del ácido fosfórico (Ortofosfórico H_3PO_4) por el Método Marshall, la cual servirá de base para las posteriores modificaciones y obtener el porcentaje óptimo de asfaltos sin que pierda sus propiedades adecuadas para ser empleado en la elaboración de las mezclas asfálticas con cierto porcentajes de ácido fosfórico (Ortofosfórico H_3PO_4) en diferentes mezclas y las mismas que garanticen una buena calidad de la carpeta de rodadura.

1.4.2.4 Técnicas de muestreo

- **Técnica**

Con los agregados y el cemento asfáltico se utilizará la técnica experimental con ensayos de laboratorios que caracterizarán dichos materiales, se procede a diseñar la mezcla asfáltica con el cemento asfáltico (85-100), con la granulometría de los agregados, y haciendo variar los porcentajes de ácido fosfórico, obteniendo así el cemento asfáltico modificado.

Para ello es necesario determinar la cantidad de ensayos que se deben realizar, como se propone en las siguientes Tabla.

Tabla 1.2 Cantidad de ensayos de caracterización

% De ácido Fosfórico	Penetración	Viscosidad	Ductilidad	Punto de Inflamación	Punto de Ablandamiento	Peso Especifico
0.5	✘	✘	✘	✘	✘	✘
1	✘	✘	✘	✘	✘	✘
1,5	✘	✘	✘	✘	✘	✘

Fuente: Elaboración Propia

Se realizaran un total de **54 ensayos de caracterización** del cemento asfáltico mezclado con porcentajes de ácido fosfórico, más los **6 ensayos de caracterización** del cemento asfáltico convencional serán un total de **60 ensayos**.

Para la obtención del número de muestras de la mezcla asfáltica con el cemento asfáltico modificado con ácido fosfórico, se estima una cantidad de briquetas que

se necesitarán para realizar los ensayos de Resistencia de la estabilidad Marshall, como se muestra a continuación.

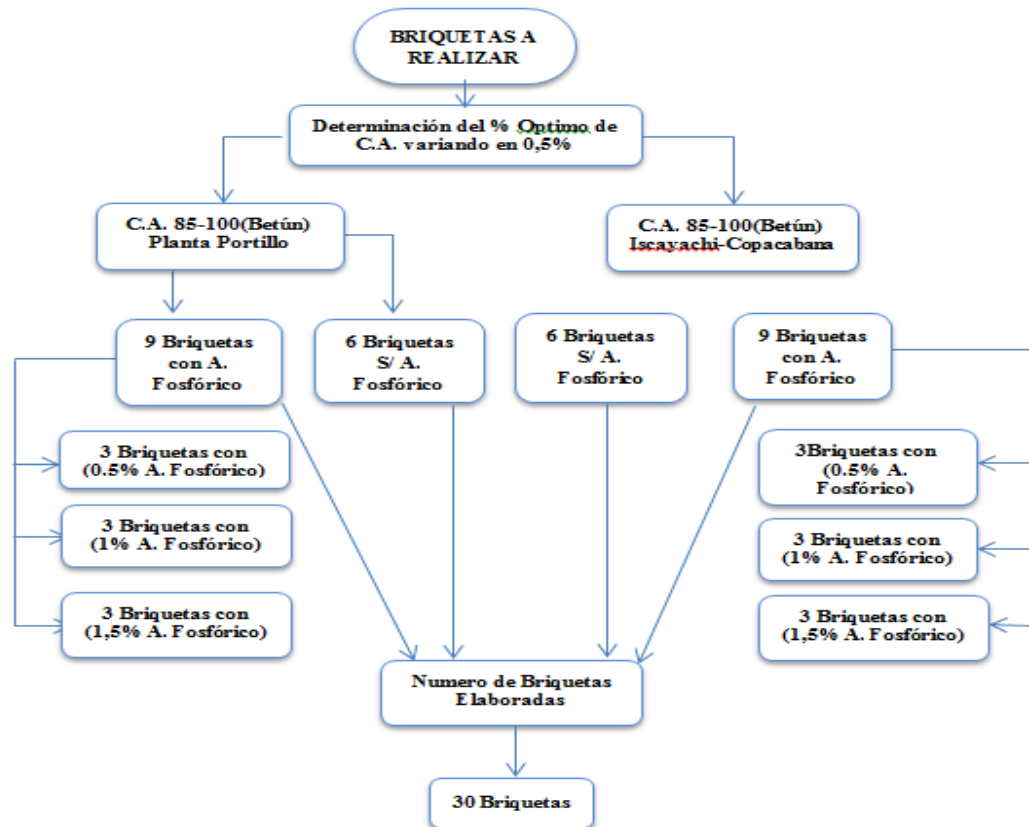
Tabla 1.3 Cantidad de ensayos de resistencia de la estabilidad Marshall

% de modificación química en el cemento	3 Briquetas por cada porcentaje para la resistencia de la estabilidad Marshall
0.5	✘
1	✘
1.5	✘

Fuente: Elaboración Propia

Para los ensayos de la resistencia de la estabilidad Marshall se realizaran un total de **18 briquetas** con porcentajes de modificación química, más 12 briquetas con cemento asfáltico convencional serán un total de **30** Briquetas.

Figura N°2 Resumen de los ensayos a realizar Briquetas



Fuente: Elaboración Propia

- **Técnica de muestreo No Probabilística**

Las técnicas de muestreo que se realizan en este trabajo de investigación será de carácter no probabilístico, ya que el material tanto los agregados como el cemento asfáltico son seleccionados intencionalmente. Ambos se obtienen del acopio de la planta de asfaltos de la Alcaldía Municipal de la Ciudad de Tarija, ubicada en la comunidad de La Pintada.

El cemento asfáltico tiene procedencia del país vecino Brasil.

- **Descripción de Equipos e Instrumentos**

A. Para la caracterización de los agregados

- a. Horno Eléctrico.-El horno eléctrico es utilizado para el secado de los agregados, y debe contar con una temperatura constante de 100 a 110 °C.
- b. Balanza.- La balanza es usada para obtener los distintos pesos que se requiera, con una sensibilidad de 0.1 gr.
- c. Juego de Tamices.- El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, lo cual contiene los tamices 1”, ¾”, ½”, 3/8”, No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100, No. 200, tapa y fondo.

B. Para la caracterización del cemento asfáltico

- a. Penetrómetro de Asfalto.- Que sirve para determinar la penetración del cemento asfáltico en estudio.
- b. Viscosímetro.- Con los cuales se determina la viscosidad cinemática del cemento asfáltico.
- c. Aparato para la determinación del punto de inflamación Cleveland de copa abierta.- Con el cual se determina el punto de Ignición o punto de llama del asfalto.
- d. Ductilímetro.- Con el cual se determina la ductilidad del asfalto, a una temperatura estándar de 25 °C.
- e. Peso Específico.- Que sirve para determinar la densidad del cemento asfáltico.
- f. Aparato para determinar el Punto de Ablandamiento.- Con el cual se determina la temperatura a la cual el asfalto se ablanda y pierde propiedades de plasticidad.

C. Para la dosificación y diseño de briquetas

- a. Moldes de compactación.- En estos moldes se vaciará la mezcla asfáltica creando briquetas para luego ser analizadas.
- b. Martillo compactador.- Este compactador sirve para compactar las briquetas según especificaciones técnicas.

c. Horno.- para que todos los equipos necesarios estén calientes para posterior elaboración de las mezclas asfálticas

D. Para los ensayos de resistencia técnica

a. Marco de carga multiplex Marshall.- Este marco sirve para disponer en él los distintos cabezales, según las pruebas que se requiera.

b. Cabezal de Rotura Marshall.- Este cabezal junto con el marco multiplex, permite realizar ensayos de estabilidad y fluencia para las briquetas en análisis.

- **Procedimiento de aplicación**

- a. Caracterización de los agregados**

Para caracterizar los agregados, se deben someter al horno el secado y luego someterlo a la serie de ensayos, para garantizar que el agregado que se está utilizando es de buen calidad, si cumple con las especificaciones técnicas mencionadas en normas, en este caso la norma ASSTHO.

- b. Caracterización del cemento asfáltico**

En este proyecto la caracterización del cemento asfáltico, se basa en la determinación de sus propiedades ya mencionadas, Estos parámetros deben cumplir con los rangos especificados por normas, caso contrario no sería viable para realizar mezclas asfálticas y se buscaría otra procedencia del cemento asfáltico.

- c. Dosificación y diseño de briquetas**

Para la dosificación de las briquetas, se debe tener muy en cuenta las temperaturas tanto de mezcla como de compactación, debido a que es un factor que incide bastante en el comportamiento de las mismas.

Es necesario resaltar que para el diseño de las briquetas se seguirá el Método Marshall.

d. Ensayos de resistencia técnica

Para los ensayos de resistencia técnica, se deben tener listas las briquetas, con su respectiva enumeración, para luego someterlas a las pruebas de Densidad, Estabilidad y Fluencia según el Método Marshall.

- **Preparación previa**

Dentro de la preparación previa a los ensayos, es necesario contar con tablas que permitan la tabulación de datos, donde especifique el lugar de obtención, el tipo de muestra, el ensayo a realizar, la numeración respectiva y los datos que se van a necesitar para cada tipo de ensayo.

Junto con lo anterior debe ir un cronograma de actividades para que permita el fácil desarrollo de las actividades o acciones a realizar.

- **Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información**

Tratamiento estadístico

Para este estudio se utilizará la estadística inferencial es una parte de la estadística que comprende los métodos y procedimientos que por medio de la inducción determina propiedades de población estadística, a partir de una pequeña parte de esta.

Su objetivo es obtener conclusiones útiles para hacer deducciones sobre una totalidad, basándose en la información numérica.

- **Media Aritmética**

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x$$

Donde:

X= Datos de la serie

n = Número de datos de serie

- **Desviación estándar**

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

- **Parámetro de escala**

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S$$

- **Parámetro de localización**

$$u = \bar{x} - 0,45 * S$$

Prueba de Smirnov-Kolmogorov

La prueba de ajuste de Smirnov-Kolmogorov, consiste en comparar, las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y valor de la recta teórica del modelo, es decir:

$$\Delta = \text{máx. } | F(x) - P(x) |$$

Δ = Estadístico de Smirnov-kolmogorov, cuyo valor es igual a la diferencia máxima existente entre la probabilidad ajustada y la probabilidad empírica.

$F(x)$ = Probabilidad de la distribución teórica.

$P(x)$ = Probabilidad experimental o empírica de los datos, denominada también frecuencia acumulada.

$\Delta < \Delta_0$ = El ajuste es bueno, al nivel de significación seleccionado.

$\Delta \geq \Delta_0$ = El ajuste no es bueno, al nivel de significación seleccionado, siendo necesario probar con otra distribución.

1.5 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance del proyecto de grado tendrá tres componentes:

El estado de conocimiento sobre ligante modificado donde se desarrollara todo lo referente a esta temática, las características y propiedades del ligante convencional y modificados y las metodologías que coadyuvan a la elección y disposición de una modificación química in situ.

La aplicación práctica se realizaran cementos asfálticos conocidos en la región, se tomaran como muestra para la investigación agregados y dos tipos de cementos asfálticos cuyas características tenga relación con los producto químico ácido fosfórico (H_3PO_4) que se utilizaran para la modificación in situ.

Todos los datos y resultados adquiridos de los ensayos de laboratorio son sometidos a un proceso de análisis para su valoración, lo cual se verá reflejado en la obtención de gráficas, cuadros y/o planillas; con dichas herramientas podremos estipular el comportamiento de las caracterización de los cementos asfálticos.

2.1 DEFINICIÓN, ORIGEN, PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

El asfalto se define como una mezcla de hidrocarburos, derivado del petróleo naturalmente o por destilación.

El asfalto se obtiene de la refinación por destilación del crudo de petróleo. Es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo, por medio de un aumento en etapas de la temperatura. Existen dos procesos de destilación con los cuales puede ser producido después de haber combinado los crudos de petróleo:

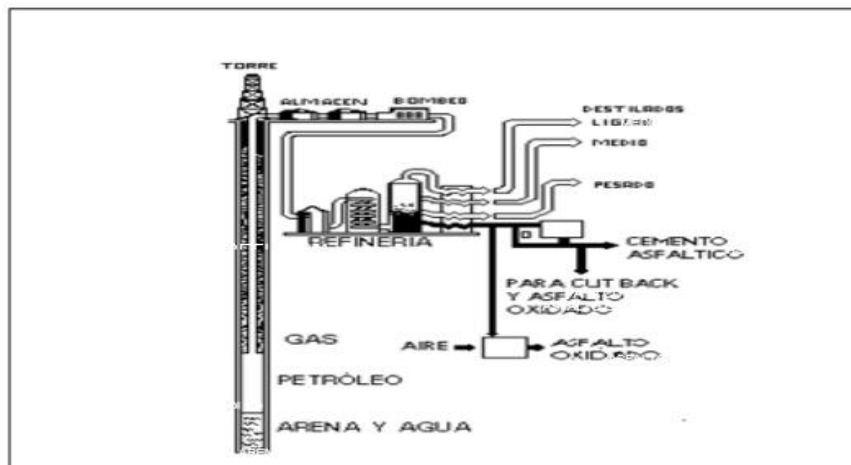
- Destilación por vacío
- Extracción con solventes

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, mejor conocidos como gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. Puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480°C (900°F), esta puede variar un poco dependiendo del

crudo de petróleo que se esté refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo. En el proceso de extracción con solventes, se remueven más gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual.

Dependiendo del uso, es el tipo de asfalto. En las refinerías se deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que se producen para poder cumplir con ciertos requisitos. Esto se logra la mayor parte de las veces, mezclando varios tipos de crudos de petróleo antes de procesarlos, para producir grados intermedios. Así un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso, pueden ser combinados para obtener un asfalto con viscosidad intermedia.

Figura 2.1: proceso de destilación del petróleo



Fuente: Manual de Ensayos Para Pavimentos

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

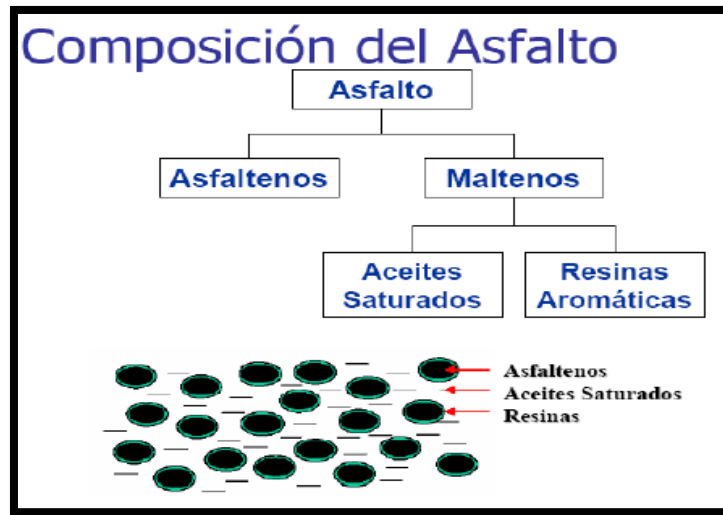
El asfalto es integral de muchos petróleos en los que existe en solución. Mediante el proceso de refinación se separan las fracciones volátiles, quedando el cemento asfáltico como residuo de dicho proceso.

En procesos de destilación natural a través de millones de años, se han formado depósitos naturales de asfalto, algunos libres de impurezas y otros en los que se encuentra mezclado con cantidades variables de minerales, agua y otras sustancias. Los depósitos naturales en que el asfalto se presenta dentro de la estructura de una roca porosa se conocen comúnmente con el nombre de asfaltos de roca o roca asfáltica. Casi todo el asfalto que se produce y utiliza actualmente en el mundo procede de la refinación de petróleo.

2.1.1 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 asfaltenos y maltenos, que son los elementos que le proporcionan dichas particularidades; este último define la capacidad del asfalto para ser manejado a altas temperaturas con seguridad.

Figura 2.2. Composición química del cemento asfáltico



Fuente: Manual de Ensayos Para Pavimentos

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

Los maltenos 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.

Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas (pegajosidad) en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas. La proporción de asfaltenos y maltenos en el asfalto puede variar debido a un sin número de factores partiendo por el origen del crudo incluyendo las altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla asfáltica, y espesor de la película de asfalto que recubre las partículas de agregado.

Las reacciones y cambios que pueden ocurrir en el proceso de mezclado incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o más moléculas para formar una sola molécula más pesada), y otros cambios químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto. Las resinas se convierten gradualmente en asfaltenos, ocasionando así un aumento en la viscosidad del asfalto.

2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL CEMENTO ASFALTICO

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

2.2.1 Durabilidad

La durabilidad de un cemento asfáltico se define como su capacidad para mantener las propiedades ligantes y cohesivas en la mezcla, antes y después de envejecido, las cualidades del cemento asfáltico deben mantenerse a lo largo de la vida útil del pavimento con el objeto de que cumpla la misión que tiene encomendada.

Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto.

Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

2.2.2 Adhesión y Cohesión.

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de 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.

2.2.3 Susceptibilidad a la Temperatura

Los asfaltos son termoplásticos; se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su 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 en un asfalto.

La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado 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.

Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

2.2.4 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).

En el proceso de elaboración de la mezcla el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras se encuentra en el tambor mezclador. Esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa de mezclado. El margen de viscosidad del material original (antes de la Prueba de Película Delgada en Horno rotatorio –RTFO) es mucho menor que el margen obtenido después del calentamiento.

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.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado.

2.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

Los ensayos utilizados para determinar las propiedades físicas de los cementos asfálticos se pueden agrupar en las siguientes categorías:

2.3.1. Ensayos para medir consistencia de los cementos asfálticos

La consistencia se define como el grado de fluidez que tiene un asfalto a una determinada temperatura. El asfalto es un material termoplástico, por lo que su consistencia varía en mayor o menor grado de temperatura.

2.3.2 La viscosidad

Una de las propiedades que más interesan desde el punto de vista ingenieril es la viscosidad de los asfaltos. La viscosidad se define como la resistencia que ofrece un fluido a la deformación, debida básicamente al rozamiento interno de las moléculas. Cuanto más eleva su viscosidad, mucho más lento será su movimiento.

Para medir la viscosidad del cemento asfáltico a temperaturas altas de mezclado, es común utilizar el viscosímetro saybolt equipado con un orificio furol. La unidad de medida se expresa en segundos Saybolt furol.

2.3.3 La penetración.

Es un ensayo empírico usado para medir la consistencia del cemento asfáltico a temperaturas medias de servicio. Usualmente se mide a 25°C considerada como la temperatura media en servicio de la mezcla asfáltica.

El ensayo consiste en calentar una muestra de asfalto 25°C en un baño de agua controlada termostáticamente. Una aguja de 100 g se hace penetrar en la superficie de la muestra durante un tiempo de 5 segundos. La penetración se mide como la distancia en decimas de milímetro que la aguja penetra el cemento asfáltico.

2.3.4 Punto de Ablandamiento

Se mide a través del ensayo de anillo y bola (ring and ball) de acuerdo con la norma se define como la temperatura a la cual el asfalto no puede soportar una carga de una bola de acero y comienza a fluir. Todos los asfaltos son materiales termoplásticos, por lo que no es posible hablar de un punto de fusión en el término estricto de la palabra. Se ha definido por conveniencia, un punto de ablandamiento convencional, dado por la temperatura a la que alcanza un determinado de fluidez.

Se determina colocando en un recipiente con agua, a una determinada altura sobre el fondo, un anillo de latón de dimensiones establecidas, el cual se rellena previamente con el asfalto fundido y se deja enfriar a temperatura ambiente luego se coloca una

esfera de 9,51 mm de diámetro, y se calienta el baño, de tal manera que la temperatura del agua suba a velocidad constante. Debido al calor, el asfalto se ablanda y la esfera desciende gradualmente envuelta en una bolsa de asfalto hasta tocar el fondo del baño. La temperatura del baño en ese instante es lo que se denomina el punto de ablandamiento de anillo y bola del cemento asfáltico ensayado.

2.3.5 Ductilidad

Una propiedad que tienen los cementos asfálticos es su gran capacidad para mantenerse coherentes bajo las grandes deformaciones inducidas por el tránsito. Muchos tecnólogos del asfalto la consideran de gran importancia en la durabilidad del asfalto una vez colocado en servicio.

La durabilidad se mide según norma en el equipo denominado ductilómetro. En el ensayo se mide la resistencia a la ruptura por medio del alargamiento de una probeta de cemento asfáltico, estirada en sus extremos a velocidad constante. Normalmente el ensayo se realiza a una temperatura de 25 ° C y a una velocidad de alargamiento de 5 cm/mto.

Los asfaltos que poseen alta ductilidad son más adherentes que aquellos que tienen en menor grado esta característica, pero pueden variar su consistencia más rápidamente al cambiar la temperatura (más susceptibles térmicamente).

2.3.6 Ensayos para Determinar la Durabilidad del Cemento Asfáltico

Los cementos asfálticos sufren un mayor o menor grado de envejecimiento cuando son mezclados con los agregados en una planta asfáltica en caliente. El envejecimiento continúa durante toda la vida del pavimento por la acción del medio ambiente y otros factores. Los siguientes ensayos son utilizados para medir de manera más o menos aproximada el envejecimiento de un cemento asfáltico.

2.3.7 Ensayos para Determinar la Pureza del Cemento Asfáltico

Los cementos asfálticos están constituidos casi siempre por bitumen puro, el cual por definición es completamente 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 maltenos, los constituyentes cementantes (resinas) y los asfaltenos, 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 del cemento asfáltico. Las especificaciones por lo general exigen un mínimo de 99 % de solubilidad en tricloroetileno.

2.3.8 Ensayos de Seguridad

Si el cemento asfáltico es calentado a temperaturas altas, se producen vapores que en presencia de alguna chispa se pueden incendiar.

2.3.9 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 Cleverland es utilizado para determinar el punto de flash 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.

2.3.10 Ensayo del 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.

Tabla 2.1: Ensayos de laboratorio Normalizados para Asfaltos

Ensayo de laboratorio para ASFALTOS	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 201. ASTM D 2170	En el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el Cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de una mezcla asfáltica, se ve influenciada por la trabajabilidad 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 décimas de milímetros. Valores altos de penetración, indicarán consistencias suaves.
Punto de Inflamación	AASHTO T 48 ASTM D 92	Tiene por propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta Cleveland.
Ductilidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	Provee de una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura especificada.
Punto de reblandecimiento	AASHTO T 53 ASTM D 36	La temperatura determinada como de Reblandecimiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzará un determinado estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico y además es también una prueba de la viscosidad.

Fuente: The Asphalt Institute.

2.4 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 cadenas parafínicas, con cierto número de anillos aromáticos, elevado en las resinas pasadas y reducido en aceites ligeros.

Los asfaltenos 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 asfaltenos 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 asfaltenos, 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 asfaltenos 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 asfaltenos 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 asfaltenos 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 asfaltenos. 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.

2.4.1 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:

1. Tipo de aplicación (mezcla o riego)
2. Características granulométricas de los áridos.
3. Condiciones atmosféricas (importantes en la aplicación por 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. Las temperaturas más elevadas de este campo de variación son normalmente más adecuadas para mezclas con áridos gruesos, y las más bajas para mezclas con áridos

finos. No hay que olvidar que la temperatura de los áridos regula en medida importante la temperatura de la mezcla.

En la siguiente tabla se muestra las diferentes especificaciones para determinar la temperatura de aplicación.

Tabla 2.2: Temperaturas de aplicación del cemento asfáltico

TIPO Y GRADO DE ASFALTO	Temperatura de empleo recomendada	
	Para mezcla	Para riego
Betunes asfálticos		
40 - 50	150-180 °C	²
60-70	135-165 °C	140-175 °C
85-100	135-165 °C	140-175 °C
120-150	135-165 °C	140-175 °C
200-300	95-135 °C	125-160 °C
Asfalto líquido de tipo RC		
RC-0	10-50 °C	18-58 °C
RC-1	25-52 °C	45-83 °C
RC-2	25-52 °C	60-99 °C
RC-3	50-80 °C	77-115 °C
RC-4	65-95 °C	83-125 °C
RC-5	80-110 °C	100-140 °C
Asfalto líquido de tipo MC		
MC-0	10-50 °C	21-60 °C
MC-1	25-52 °C	43-85 °C
MC-2	38-93 °C	60-102 °C
MC-3	65-95 °C	80-121 °C
MC-4	80-110 °C	88-129 °C
MC-5	94-121 °C	104-144 °C
Asfalto líquido de tipo SC		
SC-0	10-50 °C	21-60 °C
SC-1	25-93 °C	43-85 °C
SC-2	65-93 °C	60-102 °C
SC-3	80-121 °C	80-121 °C
SC-4	80-121 °C	88-129 °C
SC-5	94-135 °C	104-144 °C
Emulsiones asfálticas		
RS-1	⁴	24-54 °C
RS-2	⁴	43-71 °C
MS-2	38-71 °C	38-71 °C
SS-1	24-54 °C	24-54 °C
SS-1h	2454 °C	2454 °C

¹ La temperatura inferior corresponde a una viscosidad de 100 s SF para el asfalto líquido, correspondiente al límite inferior de esta especificación, y la temperatura superior corresponde a una viscosidad de 25s.

² Rara vez se emplea en riego

³ como las temperaturas de emulsiones son relativamente bajas y se fijan solamente determinado la temperatura necesaria para que a viscosidad sea tal que la emulsión pueda pulverizarse para las boquillas, se recomienda la misma temperatura para riego y para mezcla.

⁴ No se emplea en las mezclas.

Fuente: The Asphalt Institute

2.5 ASFALTO MODIFICADO

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se les añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación.

Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura.

Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo.

2.5.1 Principales modificadores utilizados en el asfalto.

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

- **POLÍMERO TIPO I:** Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros

elastómeros radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno – Butadieno - Estireno (SBS) o Estireno - Butadieno (SB), entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- **POLÍMERO TIPO II:** Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastómeros lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.
- **POLÍMERO TIPO III:** Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo elastómero, mediante configuraciones como Etileno – Vinil - Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad, entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

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

El grado de modificación en la elasticidad dependerá del tipo de polímero empleado y su concentración.

Los nuevos procesos en los cuales el polímero se asocia con el asfalto a través de una reacción química, incrementan notablemente las propiedades reológicas del asfalto.

2.5.2. ¿Por qué se modifican los asfaltos?

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

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

Una solución evidente fue mejorar las características de los asfaltos para mejorar su comportamiento en los pavimentos; ello dio origen a nuevos asfaltos que fueron denominados “Asfaltos Modificados”.

2.6 MODIFICACIÓN DEL ASFALTO

La modificación del asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías carreteras. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes, de las mezclas que componen las capas o superficie de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

2.6.1 Estructura de los asfaltos modificados.

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella. Esta micro morfología bifásica y las interacciones existentes entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto parecen ser la causa del cambio de propiedades que experimentan los asfaltos modificados con polímeros.

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

2.7 ÁCIDO FOSFÓRICO

El ácido fosfórico es un ácido débil triprótico, cuyas constantes de disociación se encuentra en estado acuoso está al 85% (m/m). Esto significa que puede disociarse en agua hasta tres veces, liberando cada vez un protón al agua como se muestra en las siguientes reacciones.

El ácido fosfórico está disponible en varios grados, las concentraciones pueden resultar confusas para el usuario, ya que con frecuencia exceden el 100%.

Esto es resultado del efecto del cálculo de concentración de H_3PO_4 en P_2O_5 . Para modificación de asfaltos, se utilizan concentraciones de 105, 110, y 114% de H_3PO_4 (75,9, 79,8, y 82,6% referidos al P_2O_5 , respectivamente).

La primera patente de uso de PPA como modificador de ligantes fue publicada en 1973 (Patent US 3751278).

La adición de ácido fosfórico al asfalto, aumenta notablemente el punto de ablandamiento de este, sin afectar las propiedades a bajas temperatura, ya que el ácido fosforico no oxida el ligante.

Esto permite mejorar el desempeño del asfalto en el rango de altas temperaturas, aumentando, por ejemplo, su resistencia a las deformaciones bajo condiciones de carga.

Las propiedades a bajas temperaturas de este asfalto modificado químicamente dependen de las características del asfalto base.

2.7.1 Ventajas de la modificación química con el ácido fosfórico

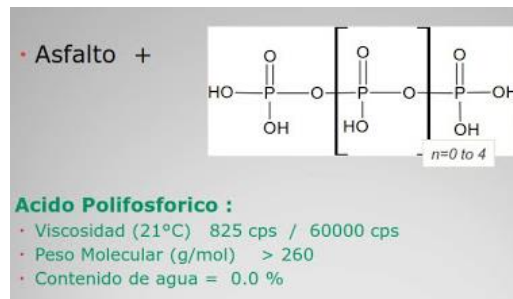
Las principales ventajas de la modificación química de Ligante con con ácido fosforico son las siguientes:

- Excelente compatibilidad PPA-Asfalto: No se produce separación de fases durante largos períodos de almacenamiento.
- Características del Asfalto Modificado: Incremento de la viscosidad sin oxidación, mejoras en el valor del punto de ablandamiento, mejoras en la rigidez.
- Características del Pavimento: Reducción de tendencias al ahuellamiento, incremento de la resistencia a la fatiga y agrietamiento de origen térmico, incremento de la resistencia a la humedad, incremento de la durabilidad como consecuencia de mejoras en la adhesión agregado-ligante.
- Facilidades de Proceso: Facilidades de bombeo a bajas temperaturas, reducción de emisiones al ambiente causadas por procesos relacionados con el asfalto.
- Sumado a polímeros: Reducción del uso de polímeros (En general muy costosos), posibilidad de procesamiento a más bajas temperaturas, reducción de costos.

Desde el año 2003 se ha estudiado el efecto de PPA en la modificación de ligantes con caucho proveniente de NFU. El PPA mejora la viscosidad, recuperación elástica y estabilidad al almacenamiento, reduce la cantidad de ligante para lograr mezclas óptimas. Asfaltos con 5-8% de caucho y 0,5 y 1 % de PPA tienen características similares al asfalto modificado con polímero y PPA.

La reacción del PPA con asfalto, depende fuertemente de la composición química de este último, la cual está relacionada con su tipo y origen, por lo tanto, las propiedades del asfalto modificado pueden variar ligeramente

.Figura 2.3. Composición asfalto con el ácido fosfórico



Fuente: Elaboración propia

3.1 DETERMINACIÓN DE LAS MUESTRAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.1 Ubicación de la obtención del material

Los materiales empleados en la construcción de carreteras, deben cumplir con requisitos y especificaciones técnicas, que garanticen un buen comportamiento durante su periodo de vida.

Para el presente trabajo de investigación se utilizó materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas. Además de tenerlos a disponibilidad.

Los agregados necesarios se extrajeron de dos lugares, del acopio o almacenamiento de la Alcaldía del Municipio de Tarija de la Provincia Cercado, que se encuentra ubicado en la comunidad de la “Pintada” y de la planta de asfaltos “El Molino” de la asociación accidentada “Vial Copacabana” y está ubicado en la comunidad del Molino que se encuentra en la zona alta de Tarija, más concretamente a 500 m. del túnel Falda la Queñua.

Imagen 3.1: Croquis de Ubicación del acopio de agregados y cemento asfáltico

“La Pintada”



Fuente: Programa Google Earth

Imagen 3.2: Croquis de Ubicación del acopio de agregados y cemento asfáltico



Fuente: Elaboración Propia

El cemento asfáltico que se usó fue el C.A. 85-100 con nombre Betún es de procedencia Brasileira, también proporcionado por la misma institución; para seleccionar las muestras se procedió de acuerdo a las especificaciones indicadas en el Manual de Carreteras V4A (Método de muestreo ASTM D140 AASHTO T40-78). Siendo los

mismos analizados en laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho,

3.2. Caracterización de los materiales.

3.2.1 Granulometría (ASTM E40 AASHTO T27-99)

El termino granulometría corresponde a la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un pétreo

Este método consiste en la determinación por tamices de la distribución del tamaño de las partículas de agregados finos y gruesos. Para una gradación óptima, los agregados se separan mediante el tamizado, en dos o tres grupos de diferentes tamaños para las arenas, y en varios grupos de diferentes tamaños para los gruesos.

Se procedió a realizar el análisis granulométrico tanto del material grueso como del material fino de acuerdo a la Norma ASSHTO T-27. (Ver figura 3.4 y 3.5).

Imagen 3.4: Lavado de material antes de realizar la granulometría



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.5: Tamizado mediante el equipo de ROP-TAP



Fuente: Elaboración Propia

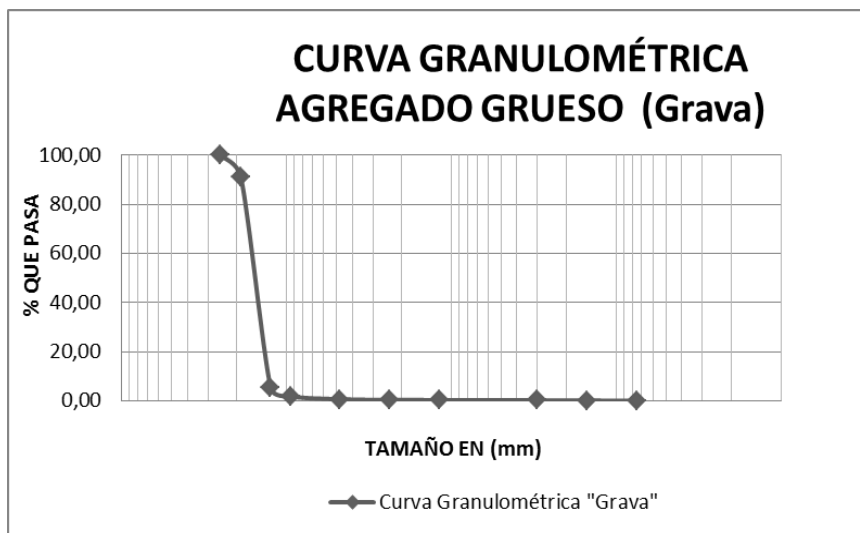
RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.1: Granulometría del Agregado grueso (grava)

Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	439,60	439,60	8,79	91,21
1/2"	12,5	4285,00	4724,60	94,49	5,51
3/8"	9,50	179,00	4903,60	98,07	1,93
Nº4	4,75	61,50	4965,10	99,30	0,70
Nº8	2,36	11,00	4976,10	99,52	0,48
Nº16	1,18	5,15	4981,25	99,63	0,38
Nº50	0,30	4,04	4985,29	99,71	0,29
Nº 100	0,15	4,20	4989,49	99,79	0,21
Nº 200	0,08	4,45	4993,94	99,88	0,12
BASE		5,10	4999,04	99,98	0,02
SUMA		4999,0			
PÉRDIDAS		1,0			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.1: Curva Granulometría del Agregado grueso



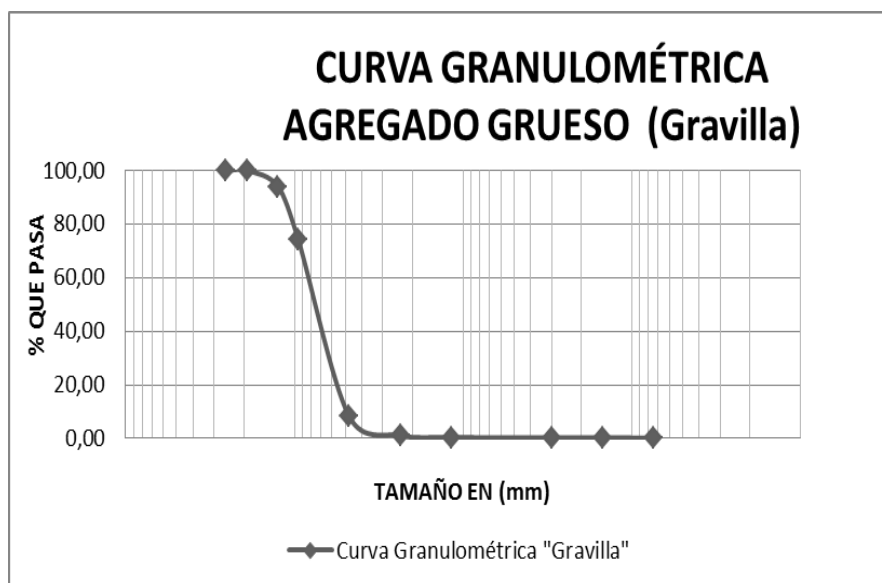
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2: Granulometría del Agregado medio (gravilla)

Peso Total (gr.)		5000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	300,20	300,20	6,00	94,00
3/8"	9,50	989,60	1289,80	25,80	74,20
Nº4	4,75	3295,20	4585,00	91,70	8,30
Nº8	2,36	359,60	4944,60	98,89	1,11
Nº16	1,18	35,55	4980,15	99,60	0,40
Nº50	0,30	5,25	4985,40	99,71	0,29
Nº100	0,15	1,45	4986,85	99,74	0,26
Nº200	0,08	5,20	4992,05	99,84	0,16
BASE		5,85	4997,90	99,96	0,04
SUMA		4997,9			
PÉRDIDAS		2,1			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.2: Curva Granulometría del Agregado medio gravilla



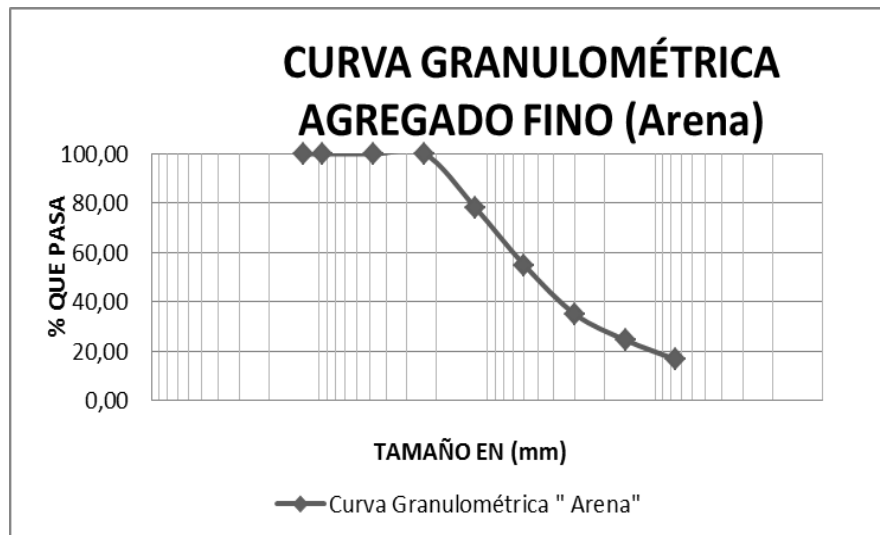
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.3: Granulometría del Agregado fino (arena)

Peso Total (gr.)		3000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3/4	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	2,36	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº8	1,18	649,42	649,42	21,65	78,35
Nº16	0,60	704,89	1354,31	45,14	54,86
Nº30	0,30	593,75	1948,06	64,94	35,06
Nº50	0,15	315,30	2263,36	75,45	24,55
Nº100	0,075	237,32	2500,68	83,36	16,64
Nº 200	-	393,19	2893,87	96,46	3,54
BASE	-	104,45			
SUMA		2998,3			
PÉRDIDAS		1,7			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.3: Curva Granulometría del Agregado fino (Arena)



Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Desgaste Mediante la Máquina de Los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99)

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.

Para garantizar la resistencia de los agregados se los somete al ensayo de desgaste de Los Ángeles, ASTM E 131, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

La cantidad de material a ensayar y el número de esferas a incluir dependen de la granulometría del agregado grueso en la tabla a continuación, se muestra el método a emplear; así como la cantidad de material, número de esferas, número de revoluciones y tiempo de rotación, para cada uno de ellos. La gradación que deberá ser representativa de la gradación original suministrado.

Tabla 3.4: Tabla de pesos del agregado grueso y N° de esferas

Para el Desgaste de los Ángeles.

GRADACIÓN	A	B	C	D
DIAMETRO	CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr)			

PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
PESO TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N°DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		30	15	15	15

Fuente: Norma ASTM, C131.

Procedimiento de ensayo:

Imagen 3.6: Lavar y secar en el horno a una temperatura de 105-110 °C el material antes de introducir en la Máquina de Los Ángeles



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.7: Pesar los materiales retenidos en las cantidades

Del método que corresponden



Fuente: Elaboración Propia

*Imagen 3.8: Introducir la muestra y las cargas abrasivas
En la Máquina de Los Ángeles*



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.9: Sacar el material y las cargas abrasivas



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.10: Tamizar la muestra por los tamices N°8 y N°12, para luego lavar y dejar al horno a secar y pesar



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.5: Tabla de datos del Desgaste de Los Ángeles (grava)

GRADACIÓN A		GRADACIÓN B		GRADACIÓN C		GRADACIÓN D	
TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO
1"	-	1/2"	2500	1/4"	-	N°8	-

3/4"	-	3/8"	2500	N°4	-
1/2"	-				
3/8"	-				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.6: Tabla de resultados del Desgaste de Los Ángeles (grava)

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A				35% MAX
B	5000	3865	22,70	35% MAX
C	-	-	-	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.7: Tabla de datos del Desgaste de Los Ángeles (gravilla)

GRADACIÓN A		GRADACIÓN B		GRADACIÓN C		GRADACIÓN D	
TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO
1"	-	1/2"	-	1/4"	2500	N°8	-
3/4"	-	3/8"	-	N°4	2500		
1/2"	-						
3/8"	-						

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.8: Tabla de resultados del Desgaste de Los Ángeles (gravilla)

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A	-	-	-	35% MAX
B	-	-	-	35% MAX
C	5000	3825	23,41	35% MAX

D	-	-	-	35% MAX
---	---	---	---	---------

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3. Peso Específico del Agregado Grueso ASTM C-127 (Grava, Gravilla)

El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

Para ello se realizó el ensayo con tres muestras, cada una de 5 Kg, tanto de grava como de gravilla, se siguieron los pasos como se muestra a continuación:

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.11: Lavar y dejar saturar con agua por 24 horas

El agregado retenido en el tamiz N°4



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.12: Secado superficial de la muestra saturada en agua.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.13: Peso del material superficialmente seco



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.14: Obtención del peso sumergido en agua.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.15: Secado de la muestra en el horno.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.9: Tabla de resultados del peso específico (grava)

Gravedad específica seca aparente G_{sa}	2,56	gr/cm ³
Gravedad específica seca Bulk G_{sb}	2,46	gr/cm ³
Gravedad específica saturada sup. Seca Bulk G_{sssb}	2,51	gr/cm ³
Absorción %	1,46	%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.10: Tabla de resultados del peso específico (gravilla)

Gravedad específica seca aparente G_{sa}	2,6	gr/cm ³
Gravedad específica seca Bulk G_{sb}	2,45	gr/cm ³
Gravedad específica saturada sup. Seca Bulk G_{sssb}	2,51	gr/cm ³
Absorción %	1,92	%

Fuente: Elaboración Propia

3.2.4. Peso Específico del Agregado Fino (ASTM C-128)

Se realizó el ensayo según la norma, con tres muestras y se siguieron los pasos como se muestran a continuación:

Procedimiento del ensayo:

Imagen 3.16: Se obtiene el material necesario



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.17: Lavar y dejar saturar en agua por 24 horas

El material que pasa por el tamiz N°4



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.18: Secado superficial del material con secadora



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.19: Verificación de la condición muestra Saturada con superficie seca.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.20: Colocar en un matraz 500gr de material, llenar agua y pesar



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.21: Sacar la muestra del matraz y dejar secar en el horno para posteriormente pesar



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.11: Tabla de resultados del peso específico (Arena)

Gravedad específica seca aparente G_{sa}	2,65	gr/cm ³
Gravedad específica seca Bulk G_{sb}	2,44	gr/cm ³
Gravedad específica saturada sup. Seca Bulk G_{sssb}	2,53	gr/cm ³
Absorción %	2,98	%

Fuente: Elaboración Propia

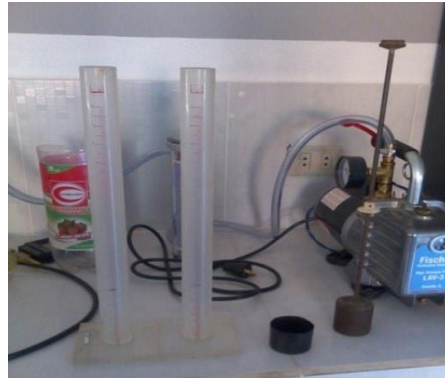
3.2.5. Equivalente de Arena (ASTM D 2419 AASTHO T176)

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).

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.

Imagen 3.22: Equipo necesario para el ensayo



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.23: seleccionar material que pase el tamiz N° 4



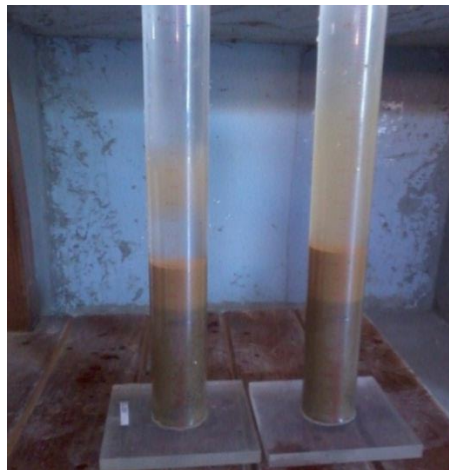
Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.24: Colocar la solución indicada hasta la medida



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.25: Colocar el material y golpear en la parte baja del cilindro para evitar burbujas de aire y dejar reposar por 10 minutos



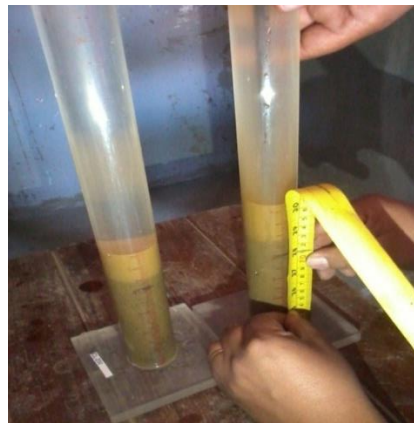
Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.26: Una vez transcurrido los 10 min, agitar el cilindro con la muestra y completar con la solución hasta la siguiente marca y dejar reposar por 20 min.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.27: Una vez transcurrido los 20 min, lecturar y obtener datos



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.12: Tabla de resultados del equivalente de arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,8	13,28	73,80
2	10,7	14,5	73,79
Promedio			73,79

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Caracterización del cemento asfáltico

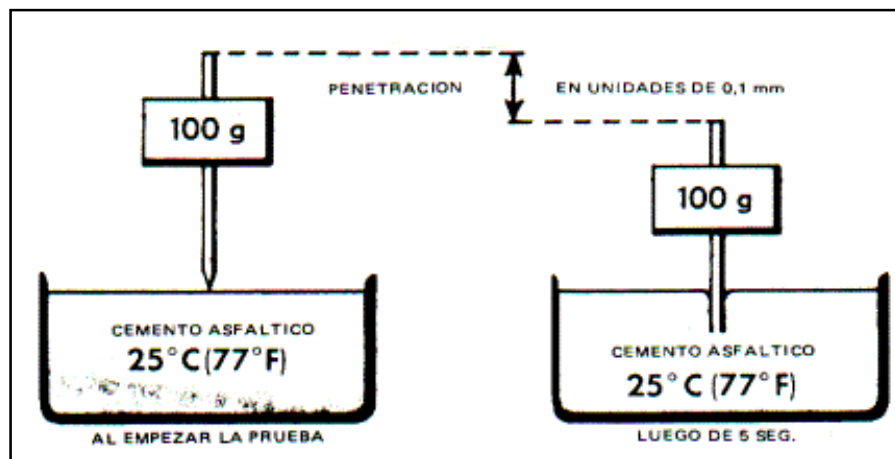
Para los ensayos de caracterización del cemento asfáltico, se realizaron con el mismo método, es decir se repite el mismo procedimiento tanto para el asfalto original como para el asfalto recalentado.

3.3.1. Ensayo de Penetración (ASTM D 5 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 éste 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.

Imagen 3.28: Ensayo de penetración



Fuente: Manual de carreteras

Imagen 3.29: Colocar el betún en taras



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.30: Colocar las muestras en baño María de 25 °C por 30 min



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.31: Realizar el ensayo teniendo en cuenta que esté limpia la aguja.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.13: Tabla de resultados 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)	Lectura N°1	95	101	86			
	Lectura N°2	98	98	89			
	Lectura N°3	99	99	81			
	Promedio	mm.	97,3	99,3	85,3	94,0	85

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2. Ensayo de Viscosidad (ASTM D 217 ASSHTO T202-91)

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

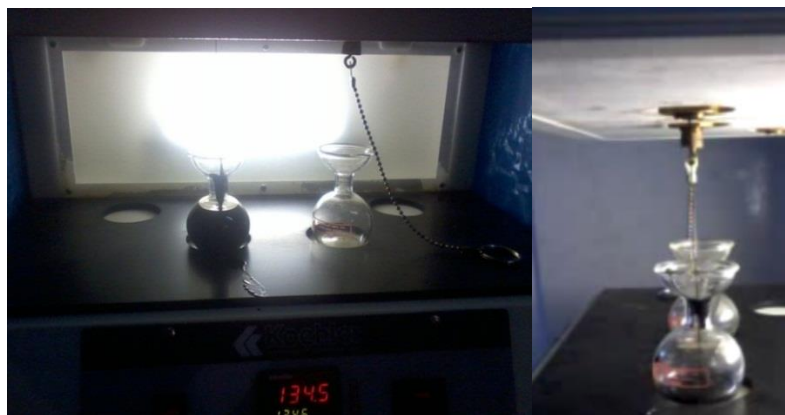
El objetivo de este ensayo de viscosidad es de determinar el grado de fluidez de un asfalto líquido a una temperatura de 135°C.

Imagen 3.32: Prender el equipo y esperar que caliente por un lado el aceite y por otro lado el asfalto a una temperatura de 135°C. Luego introducir el asfalto



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.33: Una vez alcanzada la temperatura deseada quitar el corcho y dejar caer el asfalto y medir el tiempo con ayuda de un cronometro



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.14: Tabla de datos y resultados del ensayo de Viscosidad.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad al 135 °C Saybolt- Furol	SSF	193	192,0	187,0	190,0	250	-

Fuente: Elaboración Propia

3.3.3. Ensayo de Ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00)

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 temporizador caliente cortar el exceso del 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.

Imagen 3.34: Armado y engrasado de los platos de base y los moldes



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.35: verter el cemento asfáltico en los moldes y dejar enfriar Después poner en baño maría



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.36: Con una espátula enrazar los moldes para luego realizar el ensayo



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.15: Tabla de datos y resultados del ensayo de Ductilidad.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	146	165,0	144,0	145,0	75	-

Fuente: Elaboración Propia

3.3.4. Punto de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO 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.

Imagen 3.37: Muestra en la copa de Cleveland



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.38: Muestra en ensayo pasando la llama de fuego.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.16: Tabla de datos y resultados del ensayo de Punto de Inflamación

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASTHO T-48	°C	289	260,0	285,0	287,0	>232	-

Fuente: Elaboración Propia

3.3.5. Punto de Ablandamiento con el Aparato de Anillo y Bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96)

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.

Imagen 3.39: Engrasado de los anillos y base para evitar que se pegue



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.40: Verter el cemento asfáltico en los anillos y dejar enfriar



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.41: Poner los anillos en el poseedor y colocar hielo alrededor del vaso para poder bajar la temperatura hasta 5°C



Fuente: Elaboración Propia

*Imagen 3.42: Alcanzada la temperatura de 5°C
Colocar las guías centradoras y las bolas de acero y calentar*



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.17: Tabla de datos y resultados del ensayo de Punto de Ablandamiento.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Ablandamiento	°C	43	44,0	44,0	44,0	>232	-

Fuente: Elaboración Propia

3.3.6. Peso Específico (ASTM D71-94 AASHTO T229-97)

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".

Imagen 3.43: Peso de los picnómetros vacíos



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.44: Calibrar y luego pesar cada uno de los picnómetros



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.45: Verter el cemento asfáltico en los picnómetros



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.46: Llenar con agua destilada cada uno de los picnómetros y

Dejar en baño maría por 30 minutos también en agua destilada sacar y pesar



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.18: Tabla de datos y resultados del ensayo de Peso Específico.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	38,2	37,5	38,1			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	62,1	62,2	62,4			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	56,7	57,9	57,4			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	62,9	62,0	62,8			
Peso Específico	grs./cm³	1,042	0,987	1,018	1,016	1	1,05

Fuente: Elaboración Propia

3.4. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL PARA DETERMINAR EL CONTENIDO ÓPTIMO DEL CEMENTO ASFÁLTICO

El siguiente procedimiento será aplicado para obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico que será utilizado para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, éste se realizará mediante el método Marshall de acuerdo a la Norma (ASTM D15-59) que es empleado también para proyectos en laboratorio y comprobación en obra de las mezclas que contienen cemento asfáltico y áridos cuyo tamaño máximo no exceda de ¾” pulgadas.

El propósito del método de dosificación Marshall es determinar el contenido óptimo de betún para una combinación específica de áridos. Se trata de un ensayo mecánico que consiste en romper probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de altura y compactadas mediante un martillo de peso y altura de caída normalizados. Posteriormente se calientan a una temperatura de 60°C y se rompen en la prensa Marshall mediante la aplicación de una carga vertical a través de una mordaza perimetral y una velocidad de deformación constante de 50,8 mm/min para determinar su estabilidad y deformación. Este método establece densidades y contenidos óptimos de huecos que se han de cumplir durante la construcción del pavimento.

Es importante saber que este ensayo es uno de los más conocidos y utilizados tanto para la dosificación de mezclas bituminosas como para su control en planta mediante la verificación de los parámetros de diseño de las muestras tomadas. Usualmente se preparan tres probetas para cada contenido de asfalto.

Los datos así obtenidos se emplean para establecer el contenido de asfalto óptimo de la mezcla y para determinar algunas de sus características físicas.

Para la confección de las briquetas se debe primero tamizar todo el agregado que será utilizado y tener en bolsas separadas, antes de pesar el agregado deberá secarse hasta

obtener peso constante entre 105°C y 110°C. Sobre la base del peso de 1200 gr que debe pesar cada muestra antes de compactar, se preparan las proporciones separadas para cada una de las 18 probetas, colocando las cantidades necesarias de los agregados.

Posteriormente se pesará tres muestras para cada contenido de asfalto y poner al horno, ya que los agregados deben ser calentados a una temperatura superior en más o menos 15°C a la del cemento asfáltico. Por otro lado, el asfalto también se calienta a una temperatura entre 140 y 150°C. Los moldes y la zapata del pisón de compactación también deben ser previamente calentados a una temperatura comprendida entre 100 y 150°C.

Se retira los agregados del horno previamente pesados y se añade el cemento asfáltico mezclando hasta obtener una muestra homogénea la misma debe realizarse a una temperatura inferior en 10 a 20°C a la del calentamiento del cemento asfáltico.

Luego se coloca en el molde y estando todo caliente se compacta con 75 golpes a cada cara de la briqueta, retirar la probeta del molde y dejar enfriar al aire para luego ser ensayada dentro de las 24 horas subsiguientes.

Imagen 3.53: Separación los agregados por tamaño para armar la granulometría



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.54: Pesar los agregados, las cantidades necesarias la granulometría y dejar en el horno



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.55: Una vez calientes a las temperaturas determinadas mezclar



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.56: Compactar con 75 golpes cada lado, desmoldar y dejar enfriar



Fuente: Elaboración Propia

3.4.1 Determinación de la Densidad, Estabilidad y Fluencia Marshall

Previo a los ensayos Marshall, se debe determinar la altura de las briquetas para un factor de corrección que se aplica cuando no cumple con lo establecido en la norma. Se hizo la lectura de tres alturas para promediar, ya que las briquetas no tienen una altura pareja, por desvío del martillo compactador al realizarlo manualmente.

Determinación de la Densidad

Imagen 3.57: Medir sus alturas y pesar en su estado seco al aire libre.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.58: Briquetas en baño maría a 25°C por 5 min, pesar las briquetas saturadas con superficie seca.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.59: Determinación del peso sumergido en el agua.



Fuente: Elaboración Propia

Determinación de la Estabilidad y Fluencia

Imagen 3.60: Poner en baño maría a 60°C por 35 min para cada una.

Colocar las briquetas en la mordaza y lectura del dial de Estabilidad (dentro del anillo Marshall) y el dial de deformación para el Flujo.

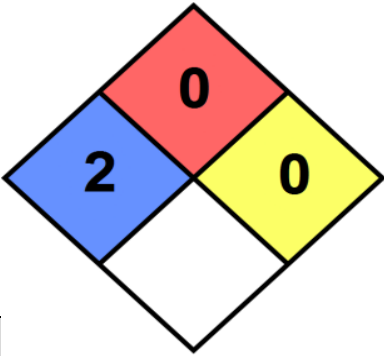



Fuente: Elaboración Propia

3.5. Cemento asfáltico modificado con Ácido Fosfórico (H_3PO_4)

3.5.1 Ácido Fosfórico

Tabla 3.19 Identificación del compuesto químico

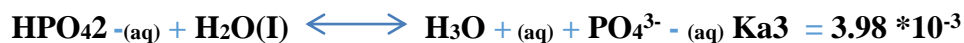
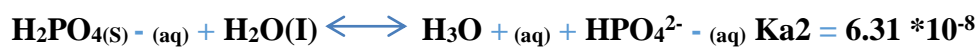
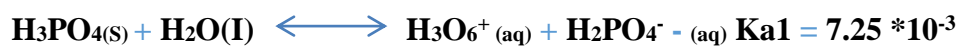
IDENTIFICACION DEL COMPUESTO QUIMICO	
	
	Ácido Fosfórico (H_3PO_4)
Familia Química	Ácido Inorgánico
Información DOT :	Corrosivo, Clase 8
Sinónimos:	Acido orto fosfórico
Otro datos:	Uso industrial

Fuente:

Elaboración Propia

El ácido fosfórico es un ácido débil triprótico, cuyas constantes de disociación se encuentra en estado acuoso está al 85% (m/m).

Esto significa que puede disociarse en agua hasta tres veces, liberando cada vez un protón al agua como se muestra en las siguientes reacciones:



3.5.2 Uso (s)

El ácido es muy útil debido a su acción resistente a la reducción y a la evaporación. Entre otras propiedades importantes el ácido fosfórico puede ser neutralizado por una acción de una base como por ejemplo: una disolución forma soluciones el amoniaco produce Fosfato diamónico (MAP).

Se usa para mezclar con aceite Urea, Brea, Betún, piedrilla con arena para crear asfalto para pavimento en suelos de carreteras y preparaciones de roturas en suelo solo agregar agua para activar, derretir el asfalto y compactar con una aplanadora.

Tabla 3.20 Propiedades Físicas y químicas del ácido fosfórico

Apariencia y Olor	Incoloro, espeso
Concentración	85%
PH	1
Temperatura Especifica	Datos no disponible
Punto Inflamación	No corresponde
Solubilidad Agua y Otros Solventes	Totalmente soluble en agua

Fuente: Elaboración Propia

3.5.3 Cuidados y seguridad para el H_3PO_4

Controles de Ingeniería: Ventilación local y general resistente a la corrosión para asegurar que la concentración no exceda los límites de exposición ocupacional.

Debe disponerse de duchas de seguridad y estaciones lava ojos.

3.5.4 Cálculos operacionales con el (H₃PO₄)

Imagen 3.61: Obtención de la densidad



Fuente: Elaboración Propia

- **Cálculo de la densidad Ácido Fosfórico (H₃PO₄):**

$$D = \frac{m}{v}$$

$$D = \frac{16,20g}{9,90l} \longrightarrow D = 1,64 \text{ g/l}$$

- **Cálculo de una masa (H₃PO₄) para la mezcla masa (g):**

$$g (\text{H}_3\text{PO}_4) = \text{Grado comestible \%} \times \text{densidad}$$

$$g (\text{H}_3\text{PO}_4) = 85 \text{ \%} / g \times 1,64 \text{ g/l}$$

$$g (\text{H}_3\text{PO}_4) = 1,39\text{ml}$$

Tabla 3.21: Resultados sobre el manipuleo del ácido fosfórico

ÁCIDO FOSFÓRICO		UNIDADES
Masa	16,2	g.
Volumen	9,9	l
Densidad	1,64	g/l
Grado comestible	85	%
Concentración porcentual	80	%

Fuente: Elaboración Propia

- **Cálculo del ácido fosfórico (H₃PO₄) en ml relacionados con el asfalto en %**

$$V\Theta = \frac{\text{Peso del Asfalto gr}}{\text{gr (H}_3\text{PO}_4)} * (\text{H}_3\text{PO}_4) \%$$

- Para el porcentaje 0,5% ácido fosfórico (H₃PO₄) en ml

$$V\Theta = \frac{74,6 \text{ g}}{1,39 \text{ ml}} * 0,005 \longrightarrow V\Theta = 0,26 \text{ ml}$$

- Para el porcentaje 1% ácido fosfórico (H₃PO₄) en ml

$$V\Theta = \frac{74,6 \text{ g}}{1,39 \text{ ml}} * 0,01 \longrightarrow V\Theta = 0,54 \text{ ml}$$

- Para el porcentaje 1,5% ácido fosfórico (H₃PO₄) en ml

$$V\Theta = \frac{74,6 \text{ g}}{1,39 \text{ ml}} * 0,015 \longrightarrow V\Theta = 0,80 \text{ ml}$$

Imagen 3.62: Cemento asfáltico modificado con 0,5%, 1%, y 1,5% con ácido fosfórico



Fuente: Elaboración Propia

3.5.5 Procedimiento del Ensayo

Después de haber obtenido los resultados de la caracterización del cemento asfáltico 85/100 convencional y se procederá a la mezcla del cemento asfáltico con el ácido fosfórico, en porcentajes de (0,5%, 1%, 1,5%), luego del Mezclado se realizara los mismos ensayos que se realizaran con el cemento asfáltico 85/100 convencional donde se obtendrá resultados que posteriormente serán analizados.

Imagen 3.63: Incorporando el ácido fosfórico en el asfalto, con la ayuda de jeringa



Fuente: Elaboración Propia

Para todas las mezclas de cemento asfáltico añadiendo porcentajes de ácido fosfórico, se realizara el mismo procedimiento que se muestra en las imágenes a continuación:

Imagen 3.63: Mezclando con ayuda de mezclador asfáltico



Fuente: Elaboración Propia

Al mezclar el cemento asfáltico 85/100 con el ácido fosfórico, hay q tomar en cuenta la temperatura de la mezcla tiene que ser a 150°C y mantener a un ritmo constante de mezclado por unos 30min y luego dejarlo reposando sin mezclarlo a la misma temperatura por unos 30 min más para que la mezcla sea completada.

3.6. Determinación de las muestras de investigación

3.6.1. Ubicación de la obtención del material

La realización de nuestras briquetas de matriz asfáltica fina se desarrolló en la planta de asfaltos “El Molino” de la asociación accidentada “Vial Copacabana” y está ubicado en la comunidad del Molino que se encuentra en la zona alta de Tarija, más concretamente a 500 m. del túnel Falda la Queñua.

*Imagen 3.65: Croquis de Ubicación del acopio de agregados
“Campamento del Molino”*



Fuente: Elaboración Propia

*Imagen 3.66: Croquis de Ubicación del acopio de cemento asfáltico
“Campamento del Molino”*



Fuente: Elaboración Propia

3.6.2 Caracterización de los materiales

Granulometría (ASTM E40 AASHTO T27-99)

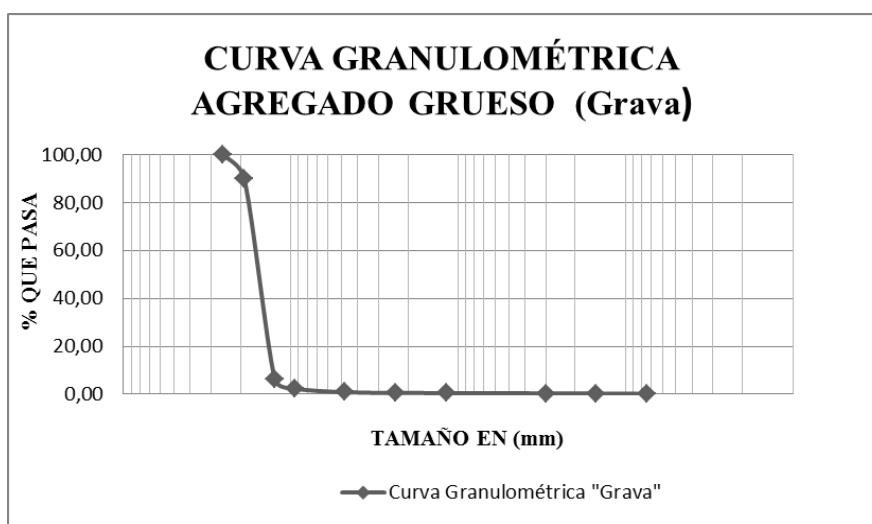
RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.22: Granulometría del Agregado grueso (grava)

Peso Total (gr.)		5000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	499,88	499,88	10,00	90,00
1/2"	12,5	4179,98	4679,86	93,60	6,40
3/8"	9,50	198,89	4878,75	97,58	2,43
Nº4	4,75	79,39	4958,14	99,16	0,84
Nº8	2,36	11,79	4969,93	99,40	0,60
Nº16	1,18	6,50	4976,43	99,53	0,47
Nº50	0,30	4,18	4980,61	99,61	0,39
Nº 100	0,15	4,50	4985,11	99,70	0,30
Nº 200	0,08	7,00	4992,11	99,84	0,16
BASE		6,58	4998,69	99,97	0,03
SUMA		4998,7			
PÉRDIDAS		1,3			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.3: Curva Granulométrica del Agregado grueso



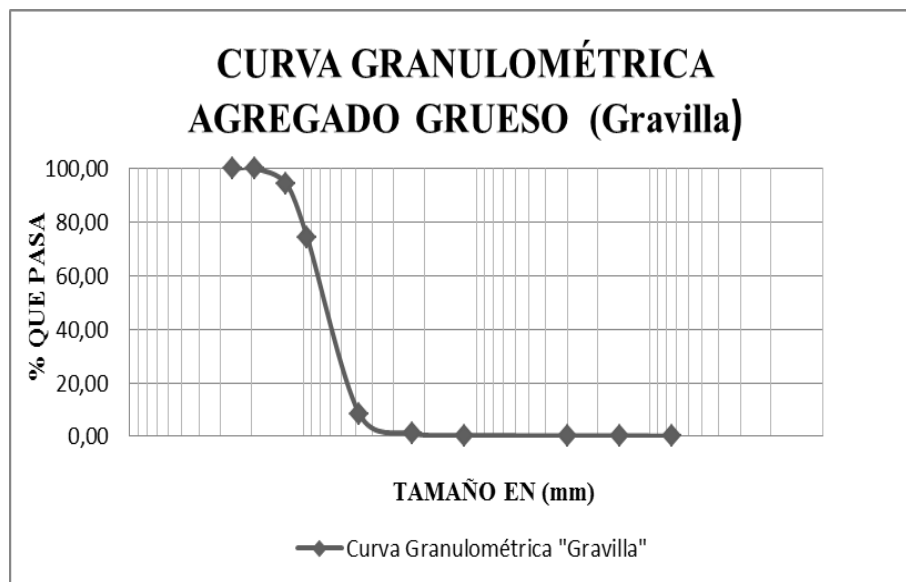
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.23: Granulometría del Agregado medio (gravilla)

Peso Total (gr.)		5000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	290,00	290,00	5,80	94,20
3/8"	9,50	989,60	1279,60	25,59	74,41
Nº4	4,75	3295,20	4574,80	91,50	8,50
Nº8	2,36	365,20	4940,00	98,80	1,20
Nº16	1,18	39,00	4979,00	99,58	0,42
Nº50	0,30	5,35	4984,35	99,69	0,31
Nº100	0,15	2,45	4986,80	99,74	0,26
Nº200	0,08	5,40	4992,20	99,84	0,16
BASE		5,78	4997,98	99,96	0,04
SUMA		4998,0			
PÉRDIDAS		2,0			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.4: Curva Granulométrica del Agregado medio gravilla



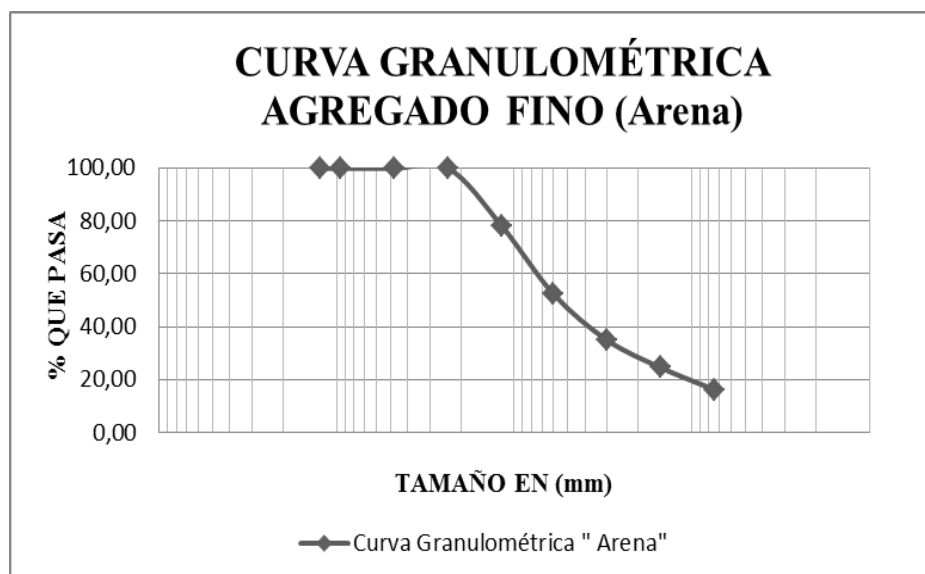
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.24: Granulometría del Agregado fino (arena)

Peso Total (gr.)		3000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3/4	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	2,36	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº8	1,18	653,12	653,12	21,77	78,23
Nº16	0,60	777,60	1430,72	47,69	52,31
Nº30	0,30	520,20	1950,92	65,03	34,97
Nº50	0,15	310,70	2261,62	75,39	24,61
Nº100	0,075	248,70	2510,32	83,68	16,32
Nº 200	-	379,90	2890,22	96,34	3,66
BASE	-	108,30			
SUMA		2998,5			
PÉRDIDAS		1,5			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.5: Curva Granulometría del Agregado fino (Arena)



Fuente: Elaboración Propia

3.6.3. Desgaste Mediante la Máquina de Los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99)

Tabla 3.25: Tabla de datos del Desgaste de Los Ángeles (grava)

GRADACIÓN A		GRADACIÓN B		GRADACIÓN C		GRADACIÓN D	
TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO
1"	-	1/2"	2500	1/4"	-	N°8	-
3/4"	-	3/8"	2500	N°4	-		
1/2"	-						
3/8"	-						

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.26: Tabla de resultados del Desgaste de Los Ángeles (grava)

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A				35% MAX
B	5000	3795	24,10	35% MAX
C	-	-	-	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.27: Tabla de datos del Desgaste de Los Ángeles (gravilla)

GRADACIÓN A		GRADACIÓN B		GRADACIÓN C		GRADACIÓN D	
TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO
1"	-	1/2"	-	1/4"	2500	N°8	-
3/4"	-	3/8"	-	N°4	2500		
1/2"	-						
3/8"	-						

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.28: Tabla de resultados del Desgaste de Los Ángeles (gravilla)

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A	-	-	-	35% MAX
B	-	-	-	35% MAX
C	5000	583,9	88,32	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.29: Tabla de resultados del peso específico (grava)

Gravedad específica seca aparente G_{sa}	2,49	gr/cm ³
Gravedad específica seca Bulk G_{sb}	2,59	gr/cm ³
Gravedad específica saturada sup. Seca Bulk G_{sssb}	2,6	gr/cm ³
Absorción %	1,72	%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.30: Tabla de resultados del peso específico (gravilla)

Gravedad específica seca aparente G_{sa}	2,48	gr/cm ³
Gravedad específica seca Bulk G_{sb}	2,52	gr/cm ³
Gravedad específica saturada sup. Seca Bulk G_{sssb}	2,65	gr/cm ³
Absorción %	1,93	%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.31: Tabla de resultados del peso específico (Arena)

Gravedad específica seca aparente G_{sa}	2,66	gr/cm ³
Gravedad específica seca Bulk G_{sb}	2,66	gr/cm ³
Gravedad específica saturada sup. Seca Bulk G_{sssb}	2,73	gr/cm ³
Absorción %	1,87	%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.32: Tabla de resultados del equivalente de arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,07	13,15	92,00
2	10,7	15	88,00
		Promedio	90,00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.33: Tabla de resultados 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)	Lectura N°1	85	87,7	86			
	Lectura N°2	90	87	90			
	Lectura N°3	88	89	89			
	Promedio	mm.	87,7	87,9	88,3	88,0	85

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.35: Tabla de datos y resultados del ensayo de Viscosidad.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad al 135 °C Saybolt- Furol	SSF	135	145,0	135,0	135,0	250	-

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.36: Tabla de datos y resultados del ensayo de Ductilidad.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C AASTHO T-51	cm	136	165,0	144,0	140,0	75	-

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.37: Tabla de datos y resultados del ensayo de Punto de Inflamación

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASTHO T-48	°C	250	260,0	256,0	253,0	>232	-

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.38: Tabla de datos y resultados del ensayo de Punto de Ablandamiento.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Ablandamiento	°C	43	45,0	42,0	44,0	>232	-

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.39: Tabla de datos y resultados del ensayo de Peso Específico.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	38	35,0	39,0			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	62	63,5	62,0			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	52,5	58,0	59,0			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	62,5	63,0	62,0			
Peso Específico	grs./cm ³	1,033	0,976	0,997	1,010	1	1,05

Fuente: Elaboración Propia

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1. Resultados de los Ensayos del Cemento Asfáltico

Analizando cemento asfáltico de La Pintada (85-100)

Tabla 4.1: Tablas resultados de caracterización asfáltico convencional y el cemento asfáltico modificado en porcentajes de ácido fosfórico

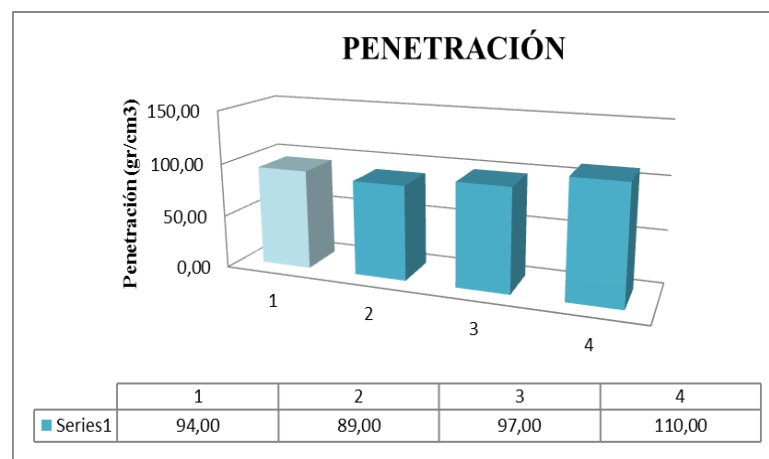
CEMENTO ASFALTICO 85-100					
Ensayo	Unidad	Resultados	0,50%	1%	1,50%
Penetración a 25°C	gr/cm ³	94	89	97	110
Viscosidad al 135 °C Saybolt- Furol	mm.	190	230	232	251
Ductilidad a 25°C	mm.	145	100,2	96,5	81,5
Punto de Inflamcion	°C	253	>232	>232	>232
Punto de Ablandamiento	°C	44	48	59	46
Peso Específico	°C	1,016	1,014	1,001	0,999

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2. Análisis de comparación de los Cementos Asfálticos

- Primera comparación del ensayo de Penetración

Gráfica 4.1: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Penetración



Fuente: Elaboración Propia

1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

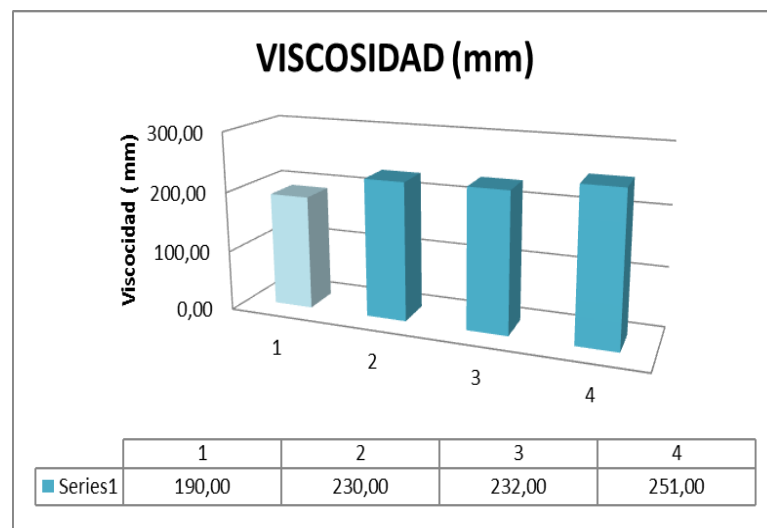
Análisis de resultados obtenidos:

En el análisis del cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 % ,1% de ácido fosfórico, se observa que los valores de Penetración cumplieron acuerdo a la norma, tienden a aumentar sus valores.

El porcentaje de 1.5% sube el valor por arriba de la Penetración del cemento asfáltico convencional como se muestra en la figura.

- **Segunda comparación del ensayo de Viscosidad**

Gráfica 4.2: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Viscosidad



Fuente: Elaboración Propia

1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

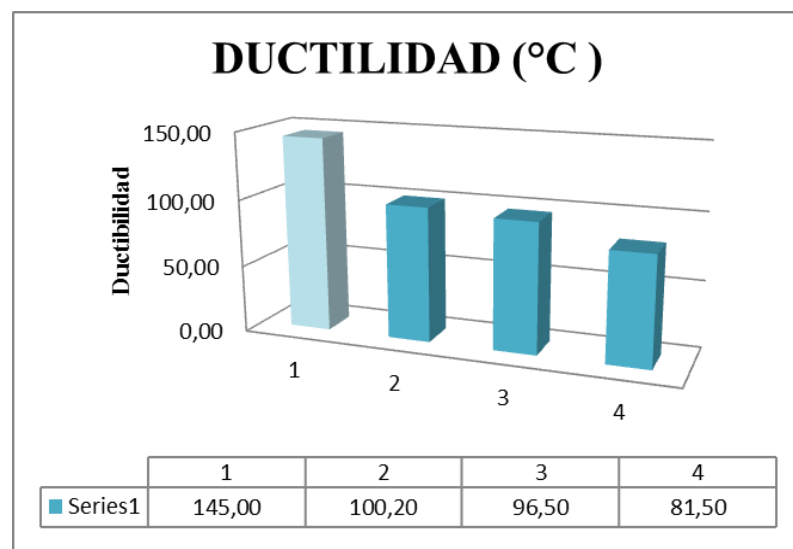
Análisis de resultados obtenidos:

Para el análisis del cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 % ,1%,1.5% de ácido fosfórico, se observa que la viscosidad está dentro de la norma, tienden a aumentar sus valores, mientras más porcentajes del ácido fosfórico.

Puede significar una buena compatibilidad del asfalto con el ácido fosfórico.

▪ **Tercera comparación del ensayo Ductilidad**

Gráfica 4.3: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Ductilidad



Fuente: Elaboración Propia

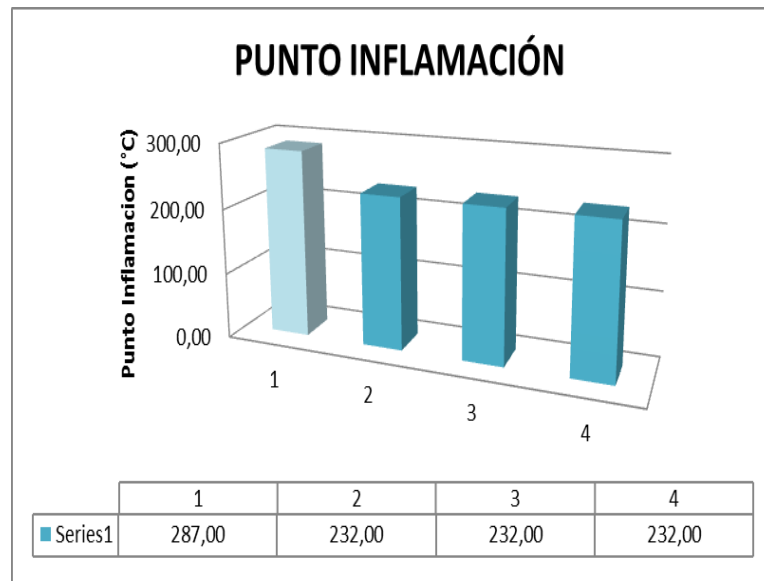
1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

Análisis de resultados obtenidos:

Para el análisis del cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 % 1%,1.5% de ácido fosfórico, se observa que el ensayo de Ductilidad no cumplió con la norma y se redujo sustancialmente respecto al cemento asfáltico convencional 85-100 lo que puede significar una baja compatibilidad del asfalto con el ácido fosfórico.

▪ **Cuarta comparación del ensayo de Punto de Inflamación**

Gráfica 4.4: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Punto de Inflamación



Fuente: Elaboración Propia

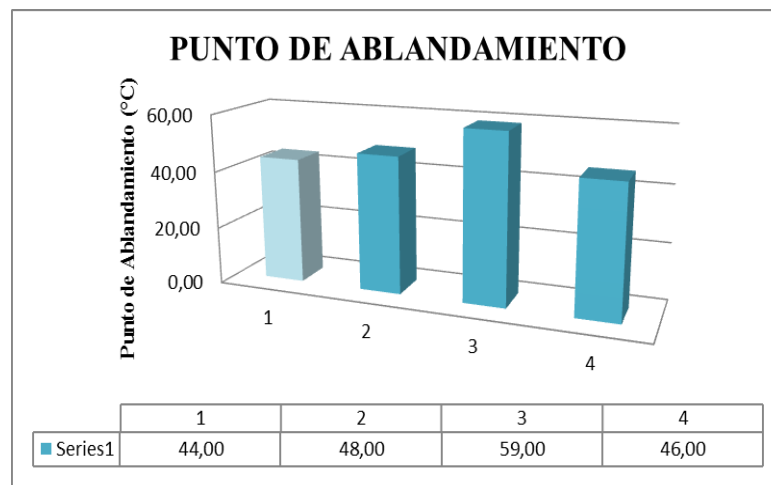
1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

Análisis de resultados obtenidos:

Para el análisis del cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificada 0,5 % 1%,1.5% de ácido fosfórico, se observa que el ensayo de Punto de Inflamación no cumplió con la norma y se redujo sustancialmente respecto al cemento asfáltico convencional, y que también no alcanza la temperatura mínima que esta como especificación 232°C ya que al alcanzar la temperatura de los 200°C la mezcla tiene una reacción que es producida por el alto contenido de porcentaje de ácido fosfórico y una reacción química del fosforo.

▪ **Quinta comparación del ensayo de Punto de Ablandamiento**

Gráfica 4.5: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Cemento modificado en porcentajes de ácido fosfórico



Fuente: Elaboración Propia

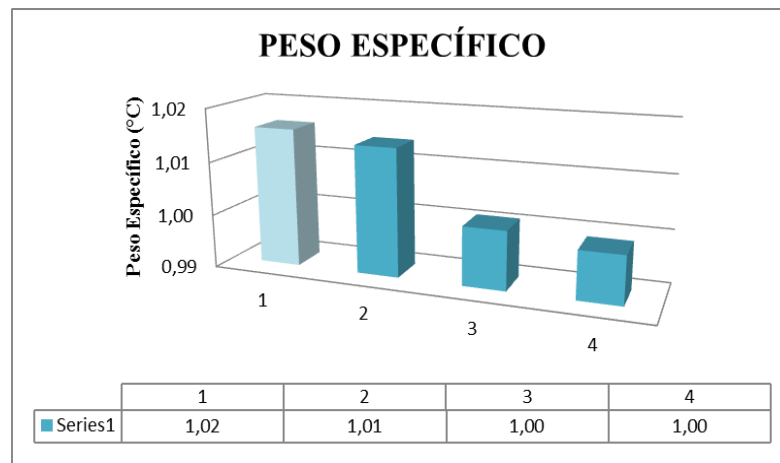
1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

Análisis de resultados obtenidos:

Para el análisis del cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 %, 1%, 1.5% de ácido fosfórico, se observa en el ensayo Punto de Ablandamiento está dentro de la norma, como criterio de evaluación de la estabilidad al almacenamiento para el cemento asfáltico.

- **Sexta comparación del ensayo de Peso Específico**

Gráfica 4.6: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Cemento modificado en porcentajes de ácido fosfórico



Fuente: Elaboración Propia

1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

Análisis de resultados obtenidos:

Para el análisis de cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 %, 1%, 1,5% de ácido fosfórico, se observa en el ensayo peso específico nos da como resultado de calidad regular dentro de la norma.

Se puede observar en la figura mientras más porcentajes de ácido fosfórico pongamos en la mezcla asfáltica su valor de calidad disminuye.

4.1.3 Tratamiento Estadístico

4.1.4 Tratamiento estadístico del cemento asfáltico 85-100 con cemento asfáltico modificado

Prueba de Bondad de Ajuste Smirnov- Kolmogorov

0,879	0,977	0,978	0,981	0,997	0,997
1,019	1,024	1,055	42	45	47
47	49	49	57	58	60
80	82	83	86	86,3	92,3
95	95	95,7	96,3	97	98
98,7	99	102,3	105	106	125,3
209	222	228	230	230	231
232	232	232	233	235	236
238	240	241	244	256	259

Fuente: Elaboración Propia

- **Media Aritmética**

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{X} = 118,774$$

- **Desviación estándar**

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$S_x = 89,395$$

- **Parámetro de escala**

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S$$

$$\alpha = 69,7$$

- **Parámetro de localización**

$$u = x - 0,45 * S$$

$$u = 78,545$$

Tabla 4.2: Tabla de resultados estadísticos

m	x	P = $\left(\frac{m}{n+1}\right)$	z = $\frac{x-u}{\alpha}$	F(z) = $e^{-e^{-z}}$	$\Delta_{max} = (F(z) - P(x))$
1	0,879	0,018	-1,114	0,048	0,030
2	0,977	0,036	-1,113	0,048	0,012
3	0,978	0,055	-1,113	0,048	-0,007
4	0,981	0,073	-1,113	0,048	-0,025
5	0,997	0,091	-1,113	0,048	-0,043
6	0,997	0,109	-1,113	0,048	-0,061
7	1,019	0,127	-1,112	0,047	-0,080
8	1,024	0,145	-1,112	0,047	-0,098
9	1,055	0,164	-1,112	0,047	-0,117
10	42	0,182	-0,524	0,185	0,003
11	45	0,200	-0,481	0,198	-0,002
12	47	0,218	-0,453	0,207	-0,011
13	47	0,236	-0,453	0,207	-0,029
14	49	0,255	-0,424	0,217	-0,038
15	49	0,273	-0,424	0,217	-0,056
16	57	0,291	-0,309	0,256	-0,035
17	58	0,309	-0,295	0,261	-0,048
18	60	0,327	-0,266	0,271	-0,056
19	80	0,345	0,021	0,36	0,015
20	82	0,364	0,050	0,349	-0,015
21	83	0,382	0,064	0,344	-0,038
22	86	0,400	0,107	0,329	-0,071
23	86,3	0,418	0,111	0,327	-0,091
24	92,3	0,436	0,197	0,296	-0,140
25	95	0,455	0,236	0,45	-0,005
26	95	0,473	0,236	0,45	-0,023
27	95,7	0,491	0,246	0,458	-0,033
28	96,3	0,509	0,255	0,46	-0,049
29	97	0,527	0,265	0,46	-0,067
30	98	0,545	0,279	0,469	-0,076
31	98,7	0,564	0,289	0,47	-0,094
32	99	0,582	0,293	0,474	-0,108
33	102,3	0,600	0,341	0,49	-0,110
34	105	0,618	0,380	0,5	-0,118
35	106	0,636	0,394	0,509	-0,127
36	125,3	0,655	0,671	0,599	-0,056
37	209	0,673	1,872	0,857	0,184
38	222	0,691	2,058	0,88	0,189
39	228	0,709	2,144	0,889	0,180
40	230	0,727	2,173	0,89	0,163
41	230	0,745	2,173	0,89	0,145
42	231	0,764	2,187	0,893	0,129
43	232	0,782	2,202	0,895	0,113
44	232	0,800	2,202	0,895	0,095
45	232	0,818	2,202	0,895	0,077
46	233	0,836	2,216	0,897	0,061
47	235	0,855	2,245	0,899	0,044
48	236	0,873	2,259	0,9	0,027
49	238	0,891	2,288	0,9	0,009
50	240	0,909	2,316	0,906	-0,003
51	241	0,927	2,331	0,907	-0,020
52	244	0,945	2,374	0,911	-0,034
53	256	0,964	2,546	0,925	-0,039
54	259	0,982	2,589	0,928	-0,054

Fuente: Elaboración Propia

$$5\% = \frac{1,36}{\sqrt{n}} \quad \frac{1,36}{\sqrt{54}} = 0,185$$

$$\Delta \text{ máx.} \leq \Delta_0$$

$$0,189 \leq 0,185 \quad \text{NO CUMPLE}$$

El ajuste no es bueno y los datos no se ajustan a la distribución Gumbell

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.2.1 Resultados de los Ensayos del Cemento Asfáltico

Analizando cemento asfáltico Del Molino (85-100)

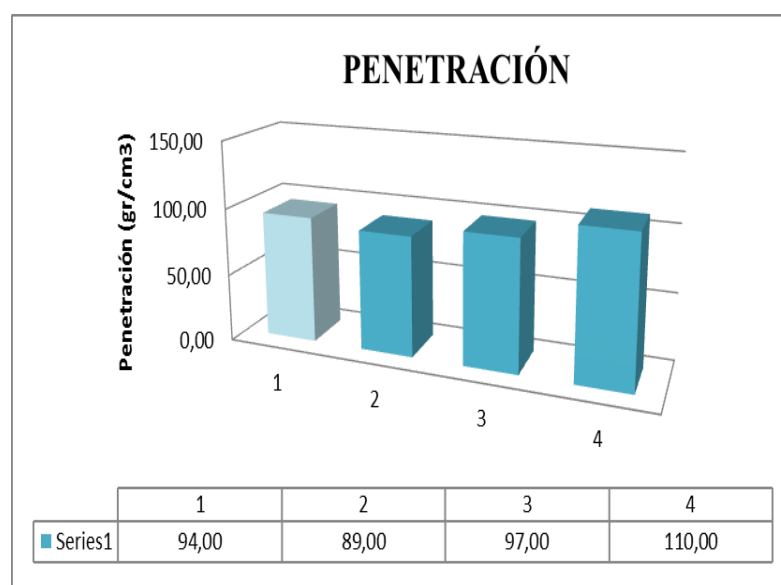
Tabla 4.3: Tablas resultados de caracterización asfáltico convencional y el cemento asfáltico modificado en porcentajes de ácido fosfórico

CEMENTO ASFALTICO 85-100					
Ensayo	Unidad	Resultados	0,50%	1%	1,50%
Penetración a 25°C	gr/cm ³	88	91	99	120
Viscosidad al 135 °C Saybolt- Furol	mm.	190	140	190	185
Ductilidad a 25°C	mm.	145	139	91,5	80
Punto de Inflamcion	°C	253	>232	>232	>232
Punto de Ablandamiento	°C	42	44	46	50
Peso Específico	°C	1,01	1,014	1,001	1

Fuente: Elaboración Propia

- Primera comparación del ensayo de Penetración

Gráfica 4.7: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Cemento modificado en porcentajes de ácido fosfórico



Fuente: Elaboración Propia

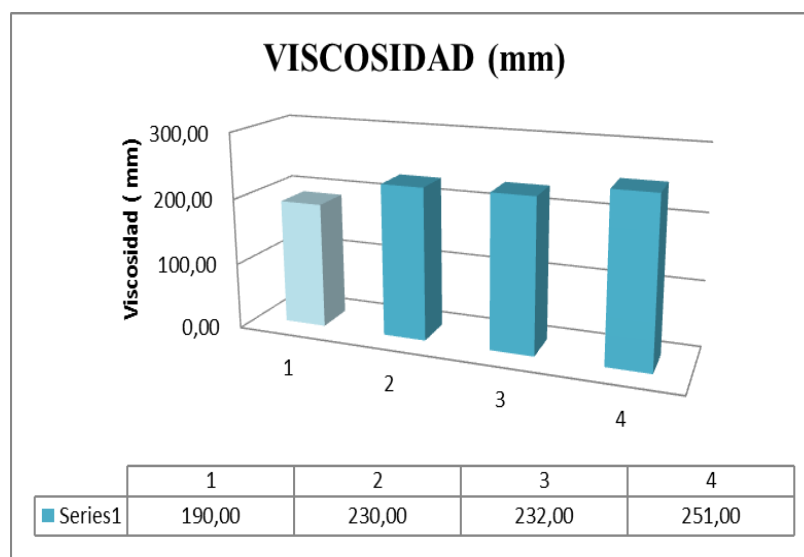
1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

Análisis de resultados obtenidos:

En el análisis cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 % ,1% 1.5% de ácido fosfórico, se observa que los valores de Penetración cumplieron acuerdo a la norma, tienden a aumentar sus valores como se muestra la figura.

▪ **Segunda comparación del ensayo de Viscosidad**

Gráfica 4.8: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Viscosidad



Fuente: Elaboración Propia

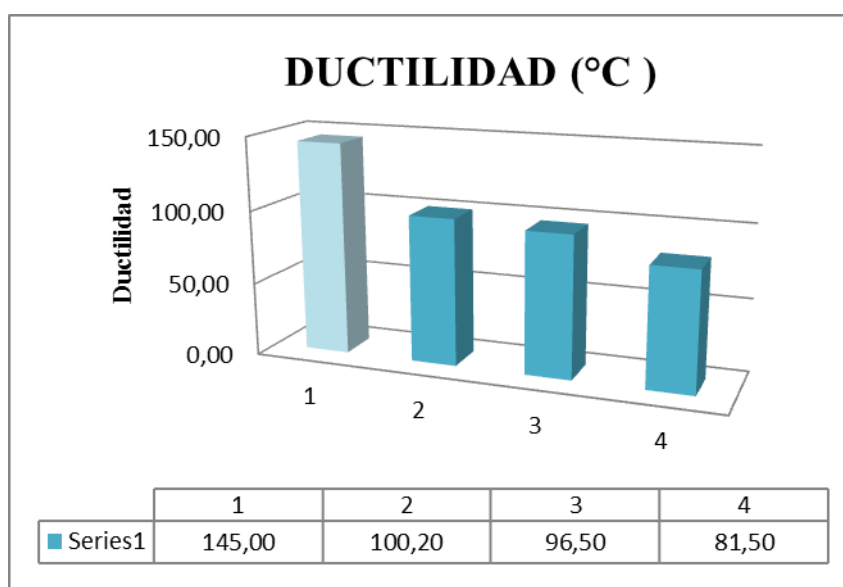
1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

Análisis de resultados obtenidos:

Para el análisis cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 % ,1%,1.5% de ácido fosfórico, se observa que la viscosidad está dentro de la norma, tienden a aumentar a medida que se aumenta sus valores de acuerdo a los porcentajes del ácido fosfórico.

▪ **Tercera comparación del ensayo Ductilidad**

Gráfica 4.9: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Ductilidad



Fuente: Elaboración Propia

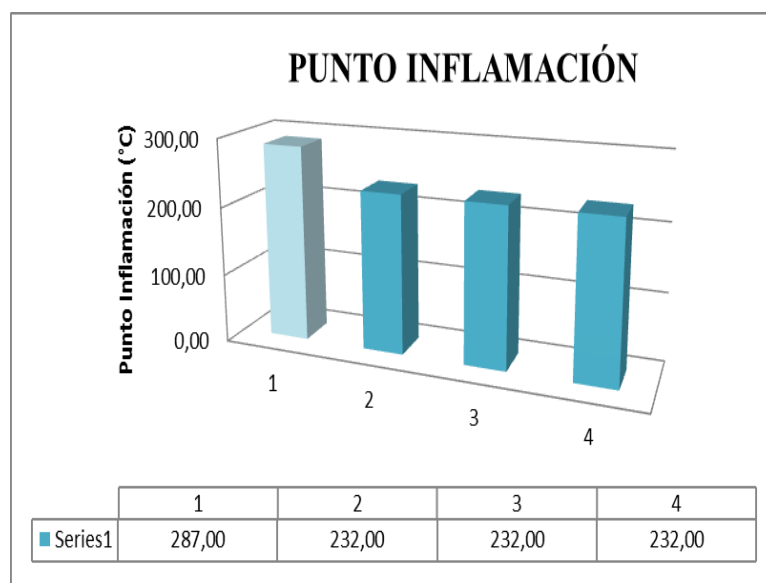
1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

Análisis de resultados obtenidos:

Para el análisis cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 % 1%,1.5% de ácido fosfórico, se observa que el ensayo de Ductilidad no cumplió con la norma y se redujo sustancialmente respecto al cemento asfáltico convencional 85-100 lo que puede significar una baja compatibilidad del asfalto con el ácido fosfórico.

▪ **Cuarta comparación del ensayo de Punto de Inflamación**

Gráfica 4.10: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Punto de Inflamación



Fuente: Elaboración Propia

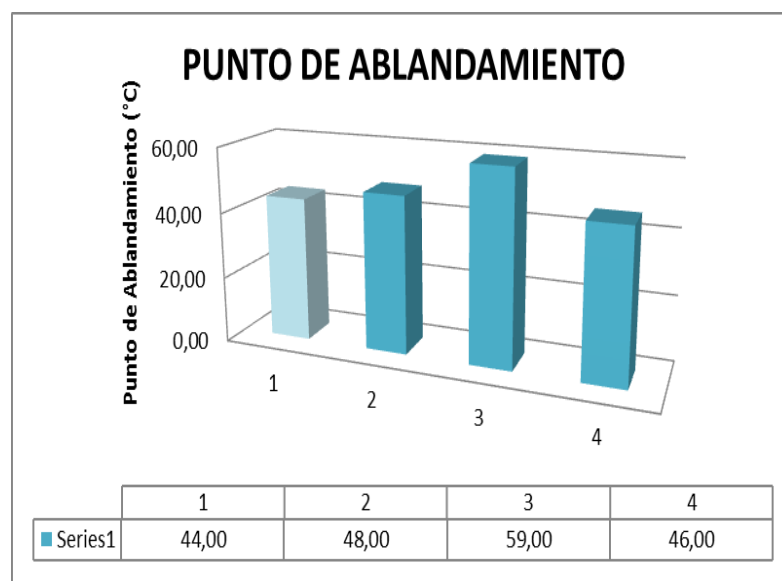
1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

Análisis de resultados obtenidos:

Para el análisis cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 % 1%,1.5% de ácido fosfórico, se observa que el ensayo de Punto de Inflamación no cumplió con la norma y se redujo sustancialmente respecto al cemento asfáltico convencional, y que también no alcanza la temperatura mínima que esta como especificación 232°C ya que al alcanzar la temperatura de los 200°C la mezcla tiene una reacción que es producida por el alto contenido de porcentaje de ácido fosfórico y una reacción química del fosforo.

▪ **Quinta comparación del ensayo de Punto de Ablandamiento**

Gráfica 4.11: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Punto de Ablandamiento



Fuente: Elaboración Propia

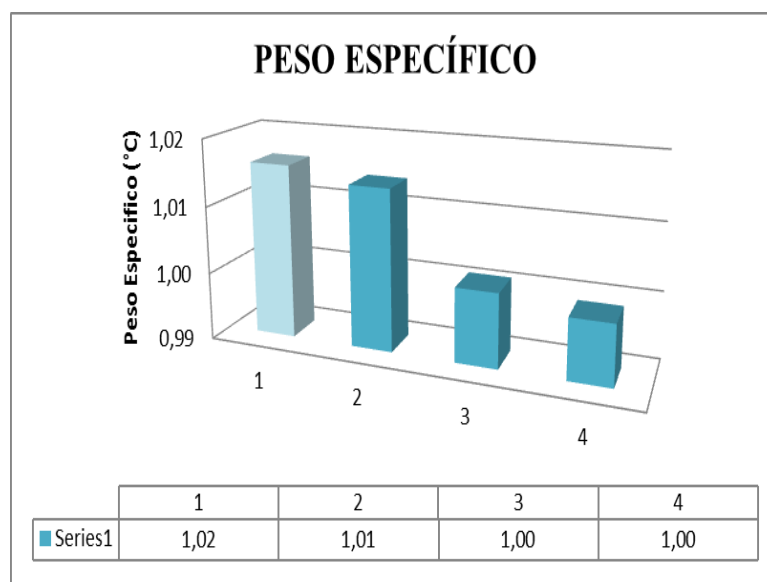
1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

Análisis de resultados obtenidos:

Para el análisis cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 %, 1%, 1.5% de ácido fosfórico, se observa en el ensayo Punto de Ablandamiento está dentro de la norma.

- **Sexta comparación del ensayo de Peso Especifico**

Gráfica 4.12: Porcentaje de Cemento asfáltico vs. Punto de Ablandamiento



Fuente: Elaboración Propia

1. Cemento asfáltico (85/100) sin modificación
2. Cemento asfáltico (85/100) con - 0,5% de ácido fosfórico
3. Cemento asfáltico (85/100) con - 1% de ácido fosfórico
4. Cemento asfáltico (85/100) con - 1,5% de ácido fosfórico

Análisis de resultados obtenidos:

Para el análisis cemento asfáltico convencional con el cemento asfáltico modificado 0,5 %, 1%, 1.5% de ácido fosfórico, se observa en el ensayo Peso nos da como resultado de calidad regular dentro de la norma.

4.2.3. Tratamiento Estadístico Básico

Prueba de Bondad de Ajuste Smirnov- Kolmogorov

0,894	0,968	0,991	1,001	1,002	1,01
1,01	1,019	1,052	43	43	44
45	46	46	47	48	52
79	80	82	86,3	86,7	90
92	93	96	96	97,3	105
108,7	118,3	133	138	139	139
145	150	155	178	187	188
189	190	193	230	230	230
230	230	232	234	234	234

Fuente: Elaboración Propia

Media x	110,023
Desviación	
Sx	78,465
u	74,92
α	61,178

Tabla 4.13: Tabla de resultados estadísticos

m	x	$Px=\frac{m}{n+1}$	$z=\frac{x-u}{\alpha}$	$F(z)=e^{-e^{-z}}$	$\Delta_{\max}=F(z)-P(x)$
1	0,894	0,018	-1,210	0,034	0,016
2	0,968	0,036	-1,209	0,035	0,071
3	0,991	0,055	-1,208	0,034	-0,021
4	1,001	0,073	-1,208	0,034	-0,039
5	1,002	0,091	-1,208	0,035	-0,056
6	1,01	0,109	-1,208	0,107	-0,002
7	1,01	0,127	-0,803	0,107	-0,020
8	1,019	0,145	-0,803	0,107	-0,038
9	1,052	0,164	-0,803	0,107	-0,057
10	43	0,182	-0,243	0,279	0,097
11	43	0,200	-0,243	0,279	0,079
12	44	0,218	-0,229	0,284	0,066
13	45	0,236	-0,216	0,289	0,053
14	46	0,255	-0,203	0,293	0,038
15	46	0,273	-0,203	0,293	0,020
16	47	0,291	-0,189	0,298	0,007
17	48	0,309	-0,176	0,303	-0,006
18	52	0,327	-0,123	0,322	-0,005
19	79	0,345	0,238	0,281	-0,064
20	80	0,364	0,251	0,277	-0,087
21	82	0,382	0,278	0,469	0,087
22	86,3	0,400	0,186	0,436	0,036
23	86,7	0,418	0,341	0,49	0,072
24	90	0,436	0,385	0,506	0,070
25	92	0,455	0,411	0,515	0,060
26	93	0,473	0,425	0,52	0,047
27	96	0,491	0,465	0,534	0,043
28	96	0,509	0,465	0,534	0,025
29	97,3	0,527	0,482	0,539	0,012
30	105	0,545	0,585	0,572	0,027
31	108,7	0,564	0,634	0,588	0,024
32	118,3	0,582	0,762	0,627	0,045
33	133	0,600	0,959	0,681	0,081
34	138	0,618	1,025	0,698	0,080
35	139	0,636	1,039	0,702	0,066
36	139	0,655	1,039	0,702	0,047
37	145	0,673	1,119	0,72	0,047
38	150	0,691	1,186	0,736	0,189
39	155	0,709	1,252	0,75	0,041
40	178	0,727	1,559	0,81	0,083

m	x	$P_x = \frac{m}{n+1}$	$z = \frac{X-u}{\alpha}$	$F(z) = e^{-e^{-z}}$	$\Delta_{max} = F(z) - P(x)$
41	187	0,745	1,679	0,829	0,183
42	188	0,764	1,693	0,832	0,068
43	189	0,782	1,706	0,834	0,052
44	190	0,800	1,719	0,836	0,188
45	193	0,818	1,760	0,842	0,024
46	230	0,836	2,253	0,9	0,064
47	230	0,855	2,253	0,9	0,045
48	230	0,873	2,253	0,9	0,027
49	230	0,891	2,253	0,95	0,059
50	230	0,909	2,253	0,9	-0,009
51	232	0,927	2,280	0,9	-0,027
52	234	0,945	2,307	0,9	-0,045
53	234	0,964	2,307	0,9	-0,064
54	234	0,982	2,307	0,9	-0,082

Fuente: Elaboración Propia

$\Delta_{max} \leq \Delta_0$
 $0,188 \leq 0,185$ No cumple

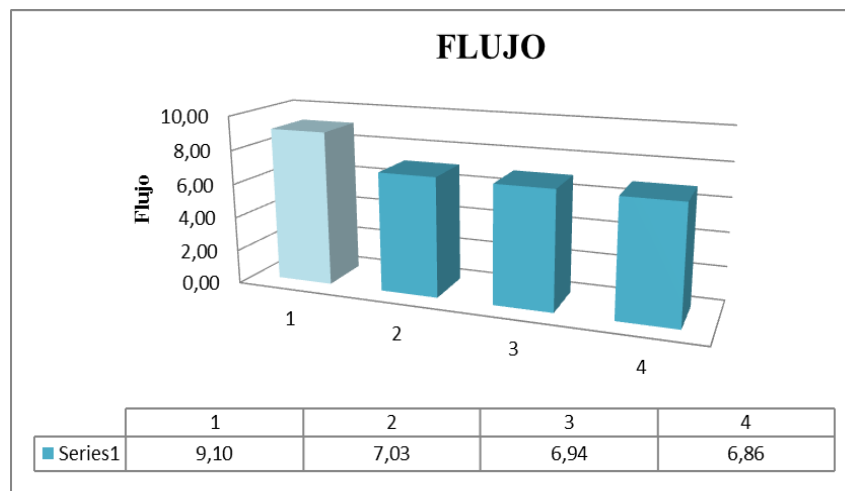
5.1. CONCLUSIONES

- Se logró estudiar la modificación química porcentuales usando (ácido fosfórico) en el ligante 85-100 se han cumplido los objetivos planteados debido a que se logra obtener resultados que nos permite comprobar que efectivamente no cumple la modificación del cemento asfáltico en sus características.
- Se pudo conseguir mediante la Distribuidora Sur, el ácido fosfórico para la realización de los ensayos, utilizando porcentajes de ácido fosfórico en el ligante 85-100, tomando en cuenta que el ácido fosfórico es líquido y comestible.
- Al usar el ácido fosfórico en el ligante 85-100 la disminución de la susceptibilidad térmica se refleja en las propiedades físico-mecánicas específicamente en el punto de ablandamiento (aumenta) y en la penetración (aumenta) a mayores valores de penetración, menor susceptibilidad térmica en el ligante.
- El uso del ácido fosfórico, el punto de ablandamiento aumenta, garantizando que el ligante tendrá un buen desempeño trabajando a altas temperaturas disminuye.
- El ligante 85-100 con el ácido fosfórico aumento su viscosidad de esta forma la mezcla elástica es más resistente y el riesgo de fluir temperaturas disminuye.
- Realizando la caracterización del ligante con ácido fosfórico se observó, que las densidades tienden a aumentar según el porcentaje que se le agregaba.
- El estudio mostró la disponibilidad de materias primas en el país, dada la generación actual de ácidos y las proyecciones futuras.
- El uso de ligante modificados no altera los procedimientos usados normalmente en los trabajos de pavimentación.
- Así también se establece que a mayor temperatura mayor es la pérdida de algunas propiedades físico-mecánicas del ligante asfáltico.
- Llegando a la conclusión que la modificación química en ligante disminuye la durabilidad del mismo, ya que la viscosidad aumenta, presentando la desventaja en la trabajabilidad del mismo, el peso específico se torna más pesado en una

masa de volumen casi constante lo que provoca que en cada calentamiento se torne más duro, frágil que se puede ver mediante el punto de ablandamiento, la penetración y ductilidad

- Para seguir más a profundidad el estudio del ligante modificado, se realizó el diseño de la mezcla asfáltica por el Método Marshall.
- Se elaboraron briquetas de mezcla asfáltica convencional, que se sometieron a ensayos de Marshall para determinar sus propiedades y se realizó el mismo procedimiento con briquetas agregando porcentajes (0,5%, 1% y 1,5%) de ácido fosfórico al ligante asfáltico.

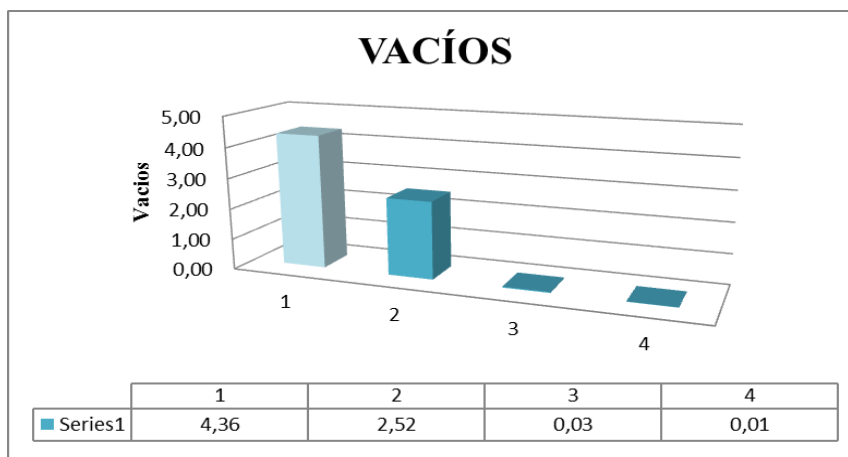
Tabla: 5.1. Porcentaje de Asfalto vs. Fluencia (flujo)



Fuente: Elaboración Propia

- Los valores de fluencia disminuyen con aumentos de los porcentajes del ácido fosfórico.
- En la muestra modificada se observó un decrecimiento proporcional del flujo, esto indica que la mezcla modificada es rígidas, lo que en teoría la hace menos susceptible al agrietamiento cuando se encuentra en lugares de bajas temperaturas.

Tabla: 5.2. Porcentaje de Asfalto vs. Vacíos en aire con respecto a la mezcla total.



Fuente: Elaboración Propia

- Llegando a la conclusión final que las mezclas asfálticas diseñadas con cemento asfáltico modificado con el ácido fosfórico, presentarán una estructura con bajo porcentaje de vacíos.
- En la mezcla modificada se observó que la briqueta se rigidiza a partir del 1,5% de ácido agregado.
- Al analizar los resultados obtenidos de estabilidad fluencia y porcentajes vacíos queda demostrado que las mezclas asfálticas elaboradas con porcentajes de ácido fosfórico posee un bajo comportamiento que las mezclas asfálticas convencionales, tal como se esperaba ya que la finalidad de modificar el ligante y sus propiedades.

5.2. RECOMENDACIONES

- En lo posterior, se recomienda profundizar el estudio ampliando el campo de investigación a la química del asfalto, ya que se ha demostrado a través de los años

que los diferentes problemas que se presentan durante el diseño y la construcción de la estructura de un pavimento se deben principalmente a la composición química del asfalto que influye directamente en las propiedades químicas.

- Se recomienda tener mucho cuidado en la utilización y manipulación los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos y también se recomienda utilizar ropa adecuada como guantes, barbijo, lentes y otros para evitar problemas de salud.
- Para realizar los ensayos se debe tomar en cuenta todas las especificaciones mencionadas en las guías o manual, para que los resultados sean más precisos.
- Por otro lado se recomienda tener bastante cuidado con las temperaturas en todo momento ya que se demostró que es un factor que puede hacer variar en muchos aspectos las propiedades del cemento asfáltico.
- Para el diseño de las mezclas se debe dar mucha importancia a la temperatura, todos los equipos tienen que estar a la temperatura especificada en la norma, como ser el martillo, moldes, los agregados como así también para realizar el rompimiento de las briquetas se las debe hacer a las 24 horas después de confeccionarlas tomando en cuenta todos los aspectos mencionados en la norma.
- Se recomienda también profundizar más sobre el tema del uso del asfalto modificado ácido fosfórico, con mayor número de muestras con la finalidad de obtener resultados con mayor confiabilidad.
- También se recomienda que previamente al pavimentado de cualquier carretera se debe planificar de manera adecuada, es decir tener una ruta crítica, tomar en cuenta las condiciones climáticas, el estado de todas las maquinarias necesarias, el personal necesario, sobre todo que las plantas productoras de las mezclas deben estar a poca distancia de la obra.