

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

EVALUACIÓN DE LIGANTES PARA MEZCLAS DE BAJA TEMPERATURA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Los ligantes asfálticos son materiales bituminosos ampliamente usados en todo el mundo en la construcción de carreteras. Son hidrocarburos que se pueden encontrar en depósitos naturales o se obtienen por producto de la destilación del petróleo crudo.

El ligante asfáltico tiene múltiples usos en la industria: en la preparación de mezclas asfálticas para pavimentación, como impermeabilizante y pinturas asfálticas, para techados de edificios y viviendas, revestimiento de diques y canales, etc.

Es un material por excelencia para la pavimentación, en virtud de sus propiedades y características. Es altamente cementante, termoplástico, repelente del agua y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales.

Debido que los pavimentos asfálticos constituyen un elemento básico de las infraestructuras viales de cada país y en éstos se realiza una inversión importante para su construcción y mantenimiento, es necesario un adecuado comportamiento del ligante que contribuya al aumento de vida útil del pavimento.

Las carreteras son esenciales para el bienestar de la humanidad, tanto en términos sociales como económicos, pero es innegable que su construcción, mantenimiento y uso tienen un impacto negativo en el ambiente. Para minimizar parte de esos impactos, la respuesta de los ingenieros ha sido la producción y aplicación de mezclas asfálticas a temperatura reducida. En esta línea, se ha desarrollado la técnica para producir las mezclas a bajas temperaturas.

La falta de ensayos que permita una valoración del efecto que produce la reducción de temperatura en los ligantes; en su comportamiento, propiedades y características, no permite el uso óptimo y correcto de muchos de ellos.

Por esto se requiere una evaluación de los ligantes para mezclas de baja temperatura en el que se pueda percibir de qué manera son afectados sus propiedades y características, y así ver cual tiene mejor respuesta.

Para la evaluación de ligantes se realizará ensayos al cemento asfáltico con distinto fluidificante, lo que dará lugar a la formación de un ligante asfáltico que será la herramienta para el desarrollo experimental de esta de investigación. El aporte teórico a la ingeniería civil, consiste en información que proporcione datos acerca de la variación en su comportamiento de los ligantes a baja temperatura a partir de las propiedades de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento.

Con el conocimiento de la variación en su comportamiento de los ligantes en condiciones de baja temperatura, se podrá utilizar la siguiente información en la conformación de mezclas de baja temperatura, que tienen un campo de aplicación amplio.

El beneficio social se verá reflejado en la mayor utilización de ligantes asfálticos de uso frecuente en nuestra región en mezclas de baja temperatura para caminos, disminuyendo lo que es consumo energético de los combustibles, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que se producen durante su combustión, disminución de la temperatura de trabajo y el impacto negativo al medio ambiente.

1.2. Fundamentación teórica

1.2.1. Justificación

Se quiere realizar una evaluación de ligantes porque constituyen un elemento importante en la conformación de pavimentos asfálticos, es decir, que su papel es de brindar propiedades y características que ayuden a que el pavimento en su conjunto tenga un comportamiento bueno que alargue su vida útil.

Uno de los aspectos importantes en la construcción de carpetas asfálticas es la variación en el uso de ligantes para la construcción y estas variaciones dependen de las necesidades y especificaciones que requieren los proyectos viales. Por esta situación se requiere la caracterización de los ligantes de uso más frecuente en nuestra región que puedan utilizarse en mezclas de baja temperatura, contando así con un conocimiento claro y resultados precisos acerca de la variabilidad en su comportamiento y de la aportación que pudieran brindar a la ingeniería de caminos.

Es importante definir de qué manera varía el comportamiento de los distintos ligantes en condiciones de baja temperatura, el uso que se le pudiera dar y ver cuál responde de mejor manera.

Con los resultados obtenidos de la investigación se podrá brindar información del comportamiento, propiedades y características de los ligantes que puedan ser utilizados en mezclas de baja temperatura, a las constructoras privadas e instituciones públicas de la Ciudad de Tarija enfocadas a proyectos viales que estén interesados en implementar nuevas tecnologías en mezclas asfálticas, como lo son las mezclas de baja temperatura que se vienen perfilando como una solución en la reducción de costos en materia prima, en la producción, desecho de materiales y además de la imperiosa necesidad de minimizar los impactos negativos en el medio ambiente que producen las mezclas calientes.

El desarrollo del trabajo investigativo se llevará a cabo en el laboratorio de asfaltos del Servicio Departamental de Caminos (SEDECA) y la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (U.A.J.M.S.) que cuenta con los equipos necesarios para llevar a cabo todos los planteamientos.

1.3. Diseño teórico

1.3.1. Determinación del problema

1.3.1.1. Situación problémica

Los pavimentos asfálticos constituyen un elemento básico de las infraestructuras viales de cada país y en éstos se realiza una inversión importante para su construcción y mantenimiento. Sin embargo se deterioran en el tiempo, por lo que es necesario para rentabilizar esta inversión, lograr que éstos se comporten adecuadamente con el fin de prolongar su ciclo de vida.

Para lograr un buen comportamiento del pavimento en obra es necesario tener presente las propiedades que brindan los ligantes asfálticos a las mezclas y para ello se caracteriza los ligantes asfálticos en laboratorio.

En la actualidad para la conformación de carpetas asfálticas se ha visto una gran variedad de nuevas tecnologías que varían de acuerdo a las necesidades y

especificaciones de la obra. Debido a la constante incursión de nuevas tecnologías que puedan mejorar el comportamiento en conjunto del pavimento, se tuvo que ampliar el campo de aplicación de los ligantes, teniendo ahora ligantes convencionales y modificados, de uso variado en mezclas calientes, tibias, semitibias, frías, porosas, drenantes, etc.

Debido al amplio empleo que se da a los distintos ligantes convencionales y modificados es necesario contar con una caracterización que describa las propiedades del mismo en diferentes condiciones y ver si responde de forma satisfactoria.

La caracterización de los ligantes bituminosos se ha venido realizando mediante una serie de ensayos físicos: penetración, punto de reblandecimiento, punto de fragilidad, ductilidad, etc., que tienen por objeto identificar el producto y comprobar si éstos satisfacen las especificaciones fijadas.

Con todo lo anteriormente mencionado es necesario realizar la caracterización de los ligantes asfálticos de uso más frecuente en nuestra región que pueda emplearse en mezclas de baja temperatura. Para poder percibir de qué manera afecta la variación de temperatura en su comportamiento y ver si éstos responden de forma adecuada.

Con la información que se pueda compilar de la variación en su comportamiento del ligante se podrá abrir puertas al mayor uso de mezclas de baja temperatura una nueva tecnología que se está implementando con más fuerza debido a los beneficios tanto sociales como ingenieriles que está brindando.

1.3.1.2. Problema

¿Cómo afecta la variación de temperatura en las propiedades de viscosidad, penetración y punto de ablandamiento de ligantes asfálticos de uso frecuente en nuestra región para el empleo en mezclas de baja temperatura?

1.3.2. Objetivos del trabajo

1.3.2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto que produce la variación de temperatura en ligantes asfálticos de uso frecuente en nuestra región, mediante ensayos físicos en laboratorio, con la finalidad de ser empleados en mezclas de baja temperatura.

1.3.2.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un marco teórico bastante sólido a través de la investigación bibliográfica.
- Establecer las muestras con las que se desarrollará la investigación.
- Realizar la caracterización del cemento asfáltico 85 - 100 mediante ensayos de penetración, viscosidad, punto de ablandamiento y ductilidad.
- Formar ligantes asfálticos a partir de cemento asfáltico y fluidificante en laboratorio.
- Evaluar los diferentes ligantes asfálticos formados de cemento asfáltico más fluidificante a partir de características de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento en condiciones de baja temperatura.
- Realizar un análisis estadístico con los resultados que nos permita obtener indicadores de tendencia media.
- Concluida la investigación se establecerán las conclusiones y recomendaciones que se tiene del trabajo desarrollado.

1.3.3. Hipótesis

Si se realiza una variación de temperatura en ligantes asfálticos de uso frecuente en Tarija mediante ensayos físicos en laboratorio, entonces se conocerá el efecto que causa en las propiedades de viscosidad, penetración y punto de ablandamiento que permita el empleo en mezclas de baja temperatura.

1.3.4. Definición de variables

1.3.4.1. Variable independiente

La variable independiente es aquella cuyo valor no depende de otra variable. Es la característica o propiedad que se supone ser la causa del fenómeno estudio y que el investigador puede manipular.

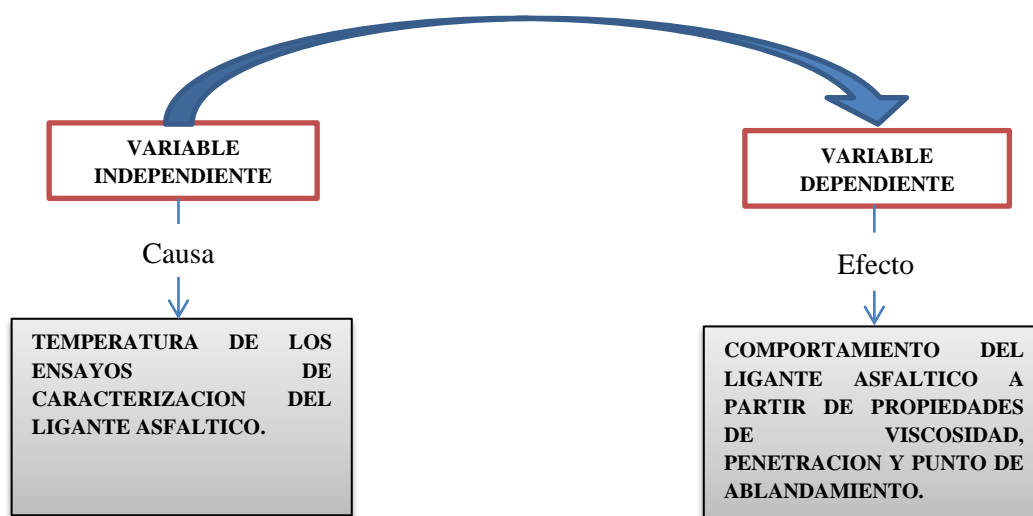
Temperatura.-En el presente trabajo de investigación la variable independiente es la temperatura a la que se realizará los ensayos de caracterización de los ligantes asfálticos formados a partir de cemento asfáltico y fluidificante, la temperatura tendrá una variación de entre 60 - 100°C.

1.3.4.2. Variable dependiente

La variable dependiente son variables de respuesta que se observan en el estudio y que están influenciadas por los valores de las variables independientes.

Se define como la propiedad o característica que se trata de cambiar mediante la manipulación de la variable independiente. La variable dependiente es el factor que es observado y medido para determinar el efecto de la variable independiente.

Comportamiento.- Como variable dependiente se tendrá el comportamiento que pueda presentar el ligante asfáltico en laboratorio. Para medir la variación en su comportamiento se realizará ensayos de viscosidad, penetración y punto de ablandamiento.



Grafica N° 1. Esquemas de las variables independientes y dependientes.

1.3.5. Alcance

El alcance es la forma en la que se va desarrollar el trabajo de investigación, es donde se indicará lo que se quiere hacer y cómo.

El alcance del trabajo de investigación tiene el siguiente desarrollo:

El capítulo I del trabajo de investigación empezará con una breve introducción en la que se indicará el enfoque que se le da al tema.

Luego se realizará la fundamentación teórica para lo cual se recurrirá a la bibliografía, conceptos, documentos en internet, etc., disponibles en nuestro medio que nos puedan proporcionar los argumentos suficientes que reflejen la importancia del tema de investigación. Con ayuda de la bibliografía se podrá dar respuestas a muchas interrogantes acerca de la viabilidad del proyecto, entre las cuales tenemos: el porqué, para qué, qué se va resolver, dónde se va resolver, como se va resolver, como se va aplicar, quienes van a utilizar los resultados, cual va ser el aporte; dando respuesta a todas estas preguntas se justificara lo que es la realización del proyecto.

El diseño teórico iniciará con la *determinación del problema* donde primeramente se tendrá que realizar una descripción de la *situación problemica* que está referido a la realidad que ocurre, teniendo una idea clara de lo que acontece determinaremos nuestro problema, objetivo general y metodología que estarán concatenadas, es decir, que tengan una relación estrecha de tal forma que en conjunto den una descripción precisa de todo lo que se quiere realizar en la investigación.

Se determinará los *objetivos del trabajo*, para lo cual se empezará con el *objetivo general* que será planteado a partir del problema y será transcrito de tal forma que sea la esencia del trabajo, posteriormente se determinará los *objetivos específicos*, los cuales indicaran de forma detallada las acciones necesarias para cumplir con el *objetivo general*.

Nos plantearemos una *hipótesis* que es la respuesta al problema planteado y estará enfocada al futuro, pudiendo dar resultados positivos o negativos.

Se realizará la *definición de variables* donde determinaremos las *variables independientes* y *variables dependientes*, para tener identificado cuáles son los

objetos que serán manipulados en la investigación y cuáles cambiarán sus propiedades y características a través de dicha manipulación.

El *diseño metodológico* es el procedimiento que se llevará a cabo para el desarrollo de la investigación, que estará conformada por:

1) La unidad de estudio y decisión muestral, es donde se indicará la *unidad de estudio*, es decir, el elemento a ser estudiado, *la población* que es el conjunto de elementos de la unidad de estudio con propiedades similares, *muestra* que es una parte pequeña de la población y el tipo de *muestreo* que es la selección de la muestra sustentada técnicamente.

2) Métodos, técnicas y procedimientos, el *método* que se utilizará dependerá directamente del tipo de investigación, la *técnica* a emplear es la bibliografía, observación y experimento, el *procedimiento* es la sección donde se indicará todo el procedimiento o desarrollo de la investigación en laboratorio, se indicará la cantidades de muestras, los equipos de laboratorio a usar, las condiciones a desarrollarse dichos procedimientos.

El *tratamiento estadístico* que recibirá los datos recolectados en la investigación estará dado a través de medidas de tendencia media, máxima y mínimas.

El capítulo II es toda la parte teórica obtenida a partir de una investigación bibliográfica realizada a libros, trabajos, internet, etc. Teoría enfocada al tema de investigación.

El capítulo III es la investigación pura donde se indicará el muestreo, la caracterización de las muestras, los datos obtenidos en laboratorio, el procesamiento, análisis de resultados, etc.

El capítulo IV se indicará las conclusiones a las que se llegaron del tema "Evaluación de ligantes para mezclas a baja temperatura" y sus recomendaciones.

1.4. Diseño metodológico

1.4.1. Unidad de estudio y decisión muestral

1.4.1.1. Unidad de estudio

Como el objetivo principal del trabajo de investigación es determinar la influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes asfálticos formados a partir de cemento más fluidificante, por tal motivo, tenemos como unidad de estudio *los ligantes asfálticos para mezclas de baja temperatura.*

1.4.1.2. Población

La población que nos proporcionará los resultados necesarios para el presente trabajo de investigación estará constituida por *los ligantes asfálticos formados a partir de cemento asfáltico con distinto fluidificante.*

1.4.1.3. Muestra

Debido que la muestra es un sub-conjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible. La muestra del trabajo de investigación será *los ligantes asfálticos formados a partir de cemento más fluidificante en un número de tres ligantes y una variación de temperatura de incorporada de 60-100°C.* Todo esto concentrado en el comportamiento que pueda presentar el ligante para el empleo en mezclas de baja temperatura.

1.4.1.4. Muestreo

El muestreo que se utilizará para desarrollar la investigación será no probabilístico debido que todos los elementos de la población no tienen las mismas posibilidades de ser escogidas en el estudio. Por tanto la unidad de muestreo estará concentrada en el siguiente marco muestral:

- *Ligante 1 (cemento asfáltico + fluidificante gasolina) y temperatura 60-100°C.*
- *Ligante 2 (cemento asfáltico + fluidificante keroseno) y temperatura 60-100°C.*
- *Ligante 3 (cemento asfáltico + fluidificante diesel) y temperatura 60-100°C.*

1.4.2. Métodos, técnicas y procedimientos

En este punto de la investigación se establecerá el número de ligantes asfálticos a elaborar, la variación de temperatura con la que se realizará las caracterizaciones de los mismos, los métodos, técnicas y procedimientos para su diseño, el número ensayos, el tipo de cemento asfáltico y fluidificante, las pruebas de laboratorio que nos proporcionará la variación en su comportamiento, etc.

1.4.2.1. Experimentales

Debido al tipo de investigación que se quiere realizar se utilizará el método experimental.

Experimento.-La investigación es de tipo experimental debido que la esencia de esta concepción de "experimento" requiere la manipulación intencional de una acción para analizar sus posibles efectos.

Los experimentos "auténticos o puros" manipulan las variables independientes para ver sus efectos sobre variables dependientes en una situación de control.

Para conocer la causa y efecto del presente trabajo de investigación es necesario someter a pruebas de laboratorio las variables independientes para que nos lancen resultados que posteriormente sean analizados, logrando un correcto desarrollo del trabajo de investigación.

1.4.2.2. Técnicas

Las técnicas que se utilizará en la investigación son las siguientes:

- **Bibliográfica:** Es la consulta de diferentes libros, investigaciones realizadas e Internet a fin de obtener información de la investigación. La bibliografía obtenida permitirá el desarrollo del capítulo teórico, donde se tocará los aspectos generales y específicos de la investigación. Brindando una idea clara de la problemática que se quiere abarcar.
- **Observación:** Se observará de forma directa los sujetos en estudio, aislándolo el objeto y sus propiedades para no entorpecer la investigación.

- **Experimento:** Se va a intervenir en la observación del sujeto estudiado con laboratorios estandarizados y normados que darán a conocer propiedades y características de la variación en comportamiento del objeto en estudio que son los ligantes asfálticos en condiciones de baja temperatura para mezclas de baja temperatura.

1.4.2.3. Procedimientos

- Primeramente se aislará los sujetos de investigación que son los ligantes asfálticos formados a partir de cemento asfáltico más fluidificante, para poder apreciar sus características y propiedades.
- El cemento asfáltico que proviene de la destilación del petróleo será caracterizado mediante las pruebas de penetración, viscosidad, punto de ablandamiento y ductilidad.
- Se describirá las características químicas de los fluidificantes gasolina, keroseno y diesel que serán utilizados en la conformación del ligante.
- Se fluidificará los solventes gasolina, keroseno y diesel en el cemento asfáltico 85 - 100, dando lugar a la formación de tres ligantes asfálticos.
- Con los ligantes asfálticos formados en laboratorio se realizará la caracterización mediante las pruebas de Penetración, Viscosidad y Punto de ablandamiento en condiciones de baja temperatura, para luego evaluar las variaciones en su comportamiento a partir de características y propiedades de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento.
- Para cada prueba de laboratorio se realizada tres ensayos por cada variación de temperatura, en este caso se tendrá las siguientes variaciones 60°C, 70°C, 80°C, 90°C y 100°C,
- Luego se realizará el procesamiento de datos en gabinete donde serán sometidos a tratamiento estadístico para poder tener una mejor percepción del comportamiento respecto a características y propiedades; y así hacer un análisis de resultados acompañados de fundamentos teóricos, para decidir cuál cuenta con un mejor comportamiento para el empleo en carreteras.

- Con todo lo anteriormente mencionado y realizado podremos manifestar nuestras conclusiones a las que llegamos de la investigación y recomendaciones que se pudiera dar para futuros trabajos que enfoquen esta temática.

1.4.3. Tratamiento estadístico

Para el tratamiento estadístico se contará con 30 datos mínimo recolectados en laboratorio. Los cuales recibirán el siguiente tratamiento:

- Medidas de tendencia central.

1.4.3.1. Medidas de tendencia central

Las medidas de tendencia central son empleadas para resumir a los conjuntos de datos que serán sometidos a un estudio estadístico, se les llama medidas de tendencia central porque generalmente la acumulación más alta de datos se encuentra en los valores intermedios. Estas medidas son utilizadas con gran frecuencia como medidas descriptivas de muestras.

Las medidas de tendencia central más empleadas son:

- Media aritmética

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

- Mediana

Serie de datos: $X_1; X_2; X_3;$

$$Me_{(x)} = X_2$$

Serie de datos: $X_1; X_2; X_3; X_4$

$$Me_{(x)} = \frac{X_2 + X_3}{2}$$

— Moda

Serie de datos: $X_1; X_2; X_3; X_4; X_5; X_3; X_6; X_3$

$$Mo_{(x)} = X_3$$

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LOS

LIGANTES ASFÁLTICOS Y MEZCLAS

ASFÁLTICAS

CAPÍTULO II

2. ASPECTOS GENERALES DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1. Asfalto

2.1.1. Antecedentes

El **Asfalto** es un producto natural o compuesto que proviene de la destilación seca de productos orgánicos vegetales. Es una mezcla de Betún con productos materiales inertes tales como Sílice, Arena, Arcilla, etc. El Asfalto se utiliza principalmente en la pavimentación de viales.

Como se explica en el manual del Instituto del Asfalto, el asfalto es uno de los componentes ingenieriles más arcaico utilizado desde los inicios del hombre para la construcción. Fue en Egipto, aproximadamente en el año 2500 a.c. que el asfalto fue descubierto; es una palabra cuyo vocablo que deriva del acadio “Sphalto” que significa “que deja caer”, este término se utilizaba en Asiria entre los años 1400 y 600 a.c., tiempo después esta palabra fue adoptada por los griegos, quienes le otorgaron el significado de “que rigidiza o estabiliza”, y finalmente evolucionó al latín y después al francés (Asphalte) y al español (Asfalto), hasta llegar al inglés (Asphalt).

En el antiguo mundo el asfalto era utilizado como mortero para la pega de bloques en la construcción, en la realización de pavimentos interiores y como impermeabilizante en la industria naval y numerosas aplicaciones más.

En aquel entonces era común encontrar asfalto natural depositado en estanques y lagos de asfalto, así como en piedras porosas como la caliza y la arenisca (piedras conocidas también como “piedras asfálticas”). Esto se explica debido a las fuerzas geológicas que provocaron el ascenso del asfalto a la superficie y al hacer contacto éste con los elementos de la atmósfera provocaban su endurecimiento, ejemplo de esto son los depósitos del lago de asfalto de Trinidad, el cual se encuentra en la isla del mismo nombre en la Costa Septentrional de Venezuela. Sin embargo, en la actualidad el asfalto que se utiliza es artificial y se deriva del petróleo.

El asfalto refinado comenzó a utilizarse hace casi doscientos años como sustituto del asfalto natural debido a que este último sólo se encontraba en lugares apartados y su reología no era tan buena, ya que su contenido malténico al calentarse se evaporaba con rapidez y se endurecía con mucha facilidad. Al mismo tiempo, la industria automotriz empezó a expandirse por lo que una nueva industria llegó para mejorar las condiciones de las carreteras proporcionándoles texturas más suaves y diseños más modernos, por lo que el asfalto comenzó a verse como un producto industrial barato e inagotable; fue así como se inició el uso del asfalto en la construcción de las carreteras.

2.1.2. Definición

Ligante asfáltico.- Los ligantes hidrocarbonatos son aglomerantes constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos. Tiene carácter termoplástico que hace que su consistencia dependa de la temperatura. A elevadas temperaturas es un fluido newtoniano.

Un ligante asfáltico es un material que contiene betún (bitumen), el cual es un hidrocarburo soluble en bisulfuro de carbono (CS_2). El asfalto y alquitrán son materiales bituminosos.

2.1.3. Producción de los asfaltos

Los materiales asfálticos se obtienen de charcas de depósitos naturales en diferentes partes del mundo o como un producto de la destilación de petróleo crudo.

Depósitos naturales.- Los depósitos naturales de los materiales asfálticos se presentan como asfaltos naturales o como asfalto mineral o de roca.

- Los asfaltos naturales, después de ser suavizados con fluidificantes de petróleo, se usaron ampliamente alguna vez como cementantes en la construcción de carreteras. Las propiedades de los asfaltos naturales varían de un depósito a otro, especialmente con respecto a la cantidad de material insoluble que contiene el asfalto.

- Los asfaltos minerales son depósitos naturales de rocas areniscas o calizas llenas con asfalto. La cantidad de material asfáltico varía de un depósito a otro y puede ser tan bajo como 4.5 por ciento y tan alto como 18 por ciento. El asfalto mineral o de roca puede usarse para la carpeta de camino, después que el material extraído o minado ha sido procesado adecuadamente. Este proceso incluye la adición de agregados minerales adecuados, cementante asfáltico y aceite, lo que facilita el flujo del material. El asfalto mineral no se usa ampliamente debido a su elevado costo de transporte.

Materiales asfálticos del petróleo.- Los materiales asfálticos que se obtienen de la destilación del petróleo se encuentran en la forma de diferentes tipos de asfaltos. Éstos incluyen los cementos asfálticos, los asfaltos líquidos de curación lenta, los asfaltos líquidos de curación media, los asfaltos líquidos de curación rápida y las emulsiones asfálticas. La cantidad de asfalto obtenida del petróleo crudo depende de la gravedad del petróleo conforme al Instituto Norteamericano del Petróleo (American Petroleum Institute (API)). En general, se obtienen grandes cantidades de asfalto de los petróleos crudos con una baja gravedad API. Antes de estudiar las propiedades y los usos de los diferentes tipos de asfaltos del petróleo, se describe en primer lugar los procesos de refinación que se usan para obtenerlos.

Procesos de refinación

Los procesos de refinación que se usan para obtener los asfaltos del petróleo pueden dividirse en dos grupos principales: por destilación fraccionaria y destilación seca o destructiva (cracking).

- ❖ **Destilación fraccionaria.-** Los procesos de destilación fraccionaria incluyen la separación de los diferentes materiales en el petróleo crudo sin cambios significativos en la composición química de cada material.

En el proceso de la destilación fraccionaria se retira los diferentes materiales volátiles en el petróleo crudo, a temperaturas sucesivamente más elevadas hasta que se obtiene como residuo el asfalto del petróleo. Se usan el vapor o el vacío para aumentar la temperatura gradualmente.

En la figura 2.1. se encuentra un diagrama de flujo que muestra las interrelaciones de los diferentes materiales que pueden obtenerse de la destilación fraccionada del petróleo crudo. Inmediatamente después de aumentar la temperatura del crudo en el alambique de tubos, éste se inyecta en una torre de barbotaje, que consiste en un cilindro vertical en el cual están incorporadas varias charolas o plataformas una encima de otra. En esta torre ocurre la primera separación de los materiales. Las fracciones más ligeras de los materiales evaporados se recolectan en la charola superior y las fracciones más pesadas se recolectan en las charolas sucesivas, con el residuo de mayor peso que contiene asfalto permaneciendo en el fondo de la torre de destilación. Los productos obtenidos durante esta primera fase de separación son gasolina, destilado de keroseno, combustible diesel, aceites lubricantes y el material pesado residual que contiene asfalto (véase en la figura 2.1.).

Las diferentes fracciones recolectadas se almacenan y se refinan aún más para obtener grados específicos de productos del petróleo.

En la figura 2.1. puede verse que el proceso adicional del residuo pesado obtenido después de la primera separación, va a dar cemento asfáltico de diferentes grados de penetración- asfalto de curación lenta y de curación rápida- dependiendo del proceso adicional que se desarrolle. También pueden obtenerse asfaltos emulsificados. Posteriormente se dará una descripción de cada uno de estos tipos diferentes de materiales asfálticos.

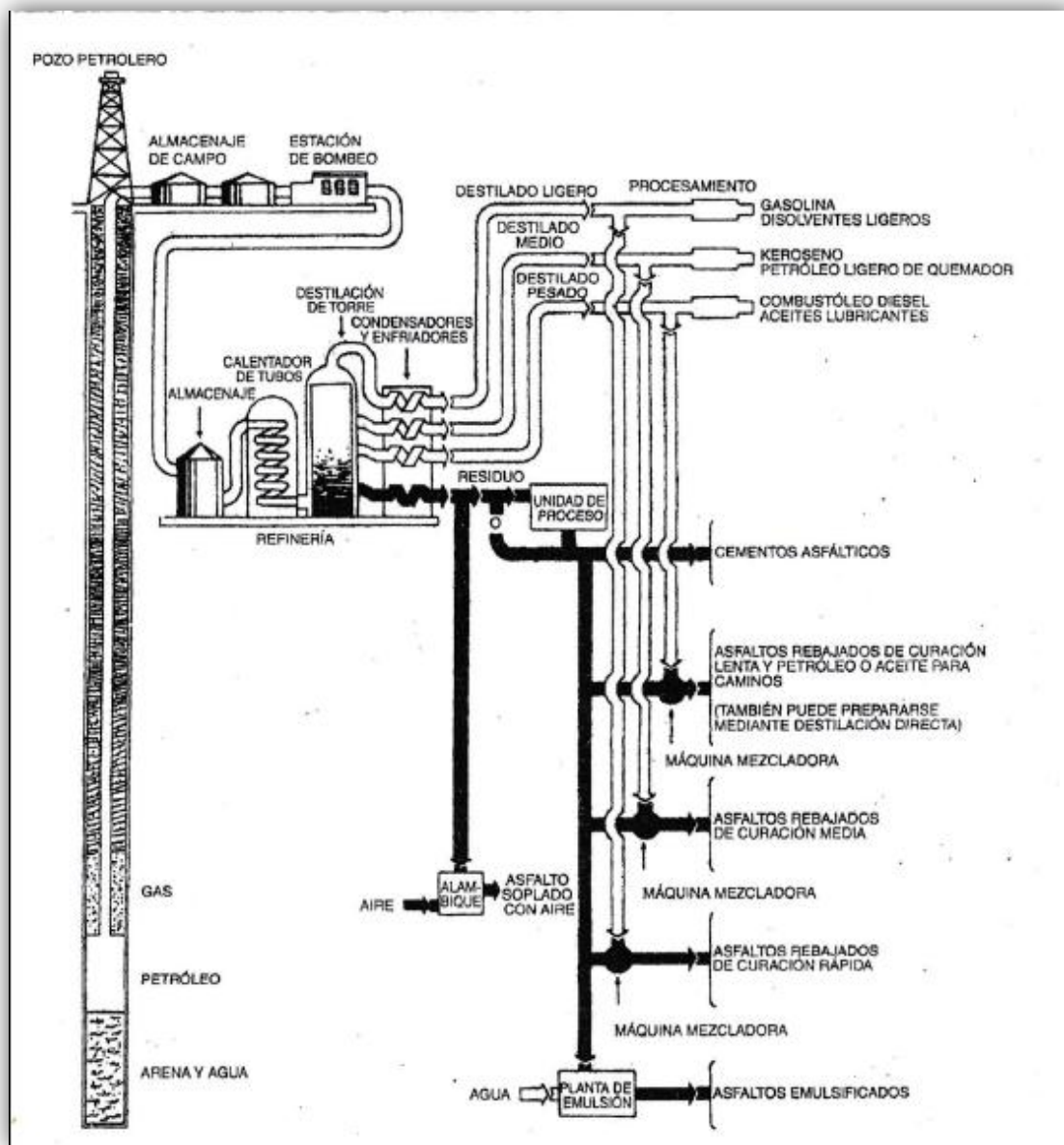


Figura N° 1. Diagrama de flujo de recuperación y refinación del asfalto de petróleo.

Fuente: Introducción al asfalto, Manual seriado N°.5, 8a. edición, Instituto del Asfalto, Lexington, Ky., 1993.

- ❖ **Destilación seca o destructiva.**- Los procesos de destilación seca o destructiva incluyen la aplicación de temperatura y presión elevadas, lo que conduce a cambios químicos.

Los procesos de craking se usan cuando se requieren cantidades mayores de las fracciones ligeras de materiales tales como combustible para motor. Se aplica calor intenso y presiones elevadas para producir cambios químicos en el material. Aunque existen varios métodos específicos para el craking, el proceso generalmente incluye la aplicación de temperaturas tan altas como 1 100°F y una presión mayor que 735 lb/pulg^2 para obtener el efecto deseado. El material asfáltico obtenido del craking no se usa ampliamente en la pavimentación porque es más susceptible a los cambios climáticos que el que se produce a partir de la destilación fraccionada.

2.1.4. Composición química de los asfaltos

Los asfaltos están compuestos principalmente por asfáltenos y máltenos. Los primeros son compuestos aromáticos polares de alto peso molecular, de color negro que contienen compuestos químicos como nitrógeno, azufre y oxígeno. Los máltenos son sustancias solubles muy polares de color marrón, sólido o semisólido con mayor cantidad de nitrógeno, oxígeno y azufre que los asfáltenos.

2.1.5. Propiedades físicas de los asfaltos

Las propiedades físicas de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos son:

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

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 debido a que el comportamiento del pavimento es 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.

- **Adhesión y cohesión.**- La adhesión se refiere a la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación.

La cohesión por otro lado, es la capacidad del asfalto de mantener firmes las partículas del agregado en el pavimento terminado.

- **Susceptibilidad a la temperatura.**- El asfalto es un material termoplástico, se vuelve más viscoso (duro) a medida que su temperatura disminuye menos viscoso (blando) conforme su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura. La susceptibilidad térmica varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aun si éstos contienen el mismo grado de consistencia.

Su importancia radica en que el asfalto debe tener suficiente fluidez a temperaturas altas para que pueda cubrir las partículas del agregado durante el mezclado y así permitir que éstas se desplacen unas con respecto de otras durante la compactación.

Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperatura ambiente normal para mantener unidas las partículas del agregado.

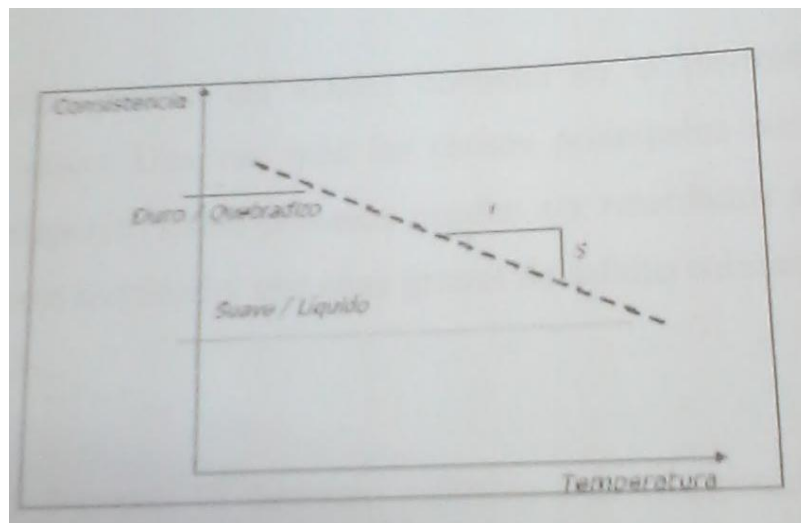


Figura N° 2. Comportamiento del asfalto (Consistencia Vs Temperatura).

La gráfica muestra como el asfalto cambia de consistencia conforme cambia de temperatura, a este cambio se le conoce como susceptibilidad térmica y es la pendiente de la recta (S).

- **Endurecimiento y envejecimiento.-** Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (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 del agregado).
El asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas, mientras está revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado, esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa.
No todos endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto deber ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento y así ajustar las técnicas constructivas para 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 capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas del agregado.
- **Pureza.-** El cemento asfáltico está constituido en su mayor parte por bitumen, el cual es por definición un material totalmente soluble en bisulfuro de carbono. Aproximadamente el 99.5% de los asfaltos refinados son solubles en bisulfuro de carbono y si contienen impurezas éstas son inertes.

Normalmente el cemento asfáltico carece de agua, ya que ésta fue perdida durante el proceso de refinación. Cuando no pierde toda el agua se vuelve espumoso al ser calentado a temperaturas superiores a 100°C (212°F). La pureza de un cemento asfáltico está definida por su carencia de humedad, así como de cualquier impureza.

2.1.6. Clasificación de los asfaltos de pavimentación

De acuerdo a la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), los asfaltos de pavimentación se clasifican en tres grupos:

2.1.6.1. Cementos asfálticos

Son hidrocarburos semisólidos con ciertas características fisicoquímicas que los hacen buenos agentes cementantes. También son muy viscosos, y cuando se usan como cementante para los agregados en la construcción de pavimentos, es necesario calentar tanto los agregados como el cemento asfáltico antes de mezclar los dos materiales. Durante varias décadas el grado específico del cemento asfáltico ha sido designado de acuerdo con su penetración y su viscosidad, las cuales dan una indicación de la consistencia del material para una temperatura dada.

El uso de una muestra dada depende de su clasificación. Los procedimientos para la determinación del grado de los cementos asfálticos son mediante las pruebas de penetración estándar y viscosidad.

a) Caracterización por penetración

Se aplica la norma ASTM D-946 (Clasificación Estándar por Grado de Penetración para Cementos Asfálticos Utilizados en Pavimentación). Ésta abarca los siguientes grados de penetración:

- 40 – 50
- 60 – 70
- 85 – 100
- 120 – 150

- 200 – 300

Este método se efectúa dejando penetrar una aguja dentro de una muestra de asfalto bajo una carga dada. La distancia que penetra la aguja en la muestra en un tiempo determinado es medida en décimas de milímetro (0.1mm). Un grado 200 - 300 indica que la aguja penetró en la muestra, bajo condiciones específicas de 200 a 300 décimas de milímetro. Ésta es una indicación de un asfalto “blando”, un grado 40 – 50 es indicación de un asfalto “duro”.

b) Caracterización por viscosidad

Se aplica la norma ASTM D – 3381 (Clasificación Estándar por Grado de Viscosidad para Cementos Asfálticos Utilizados en Pavimentación) clasifica a los asfaltos en base a su viscosidad absoluta a 60°C. El Poise (P) es la unidad normal de medida. Dependiendo de ésta, los asfaltos se clasifican en:

- **AC – 5 (500 ± 100):** Utilizado en la fabricación de emulsiones asfálticas para riego de impregnación, riego de liga, en estabilizaciones y en mezclas asfálticas en caliente.
- **AC – 10 (1000 ± 200):** Utilizado en la fabricación de emulsiones asfálticas para carpetas y morteros de mezclas en frío.
- **AC – 20 (2000 ± 400):** Utilizado en la fabricación de mezclas en caliente, emulsiones asfálticas usadas en morteros y carpetas de mezclas en frío.
- **AC – (3000 ± 600):** Utilizado en la fabricación de mezclas en caliente, emulsiones para carpetas y mezclas en frío.

2.1.6.2. Asfaltos rebajados

2.1.6.2.1. Asfalto de curado rápido (RC)

Los asfaltos rebajados de curación rápida (RC) se producen mediante la mezcla del cemento asfáltico con un destilado de petróleo que se evapora fácilmente, facilitando con ello un cambio rápido desde la forma líquida en el momento de la aplicación hasta la consistencia del cemento asfáltico original. Para esta serie de asfaltos generalmente se usa como disolvente a la gasolina o la nafta.

El grado que se quiere para el asfalto de curación rápida dicta la cantidad de disolvente que se va añadir al cemento asfáltico residual.

Las especificaciones para el uso de estos asfaltos están dadas en las *Especificaciones estándar de los materiales de transporte (Standard Specifications for Transportation Materials)* de la AASHTO.

2.1.6.2.2. Asfalto de curado medio (MC)

Los asfaltos rebajados de curación media (MC) se producen por la *fluidificación* con aceite combustible ligero o keroseno. El término *medio* se refiere a la volatilidad media del diluyente usado de tipo keroseno.

Los asfaltos rebajados de curación media endurecen más rápidamente que los asfaltos líquidos de curación lenta, aunque la consistencia de los diferentes grados es similar que la de los asfaltos de curación lenta. Sin embargo, el MC-30 es un grado único en esta serie ya que es muy fluido y no tiene contraparte en las series SC y RC.

La fluidez de los asfaltos de curación media depende de la cantidad de disolvente en el material. Estos asfaltos de curación media pueden usarse para la construcción de bases de pavimento, superficies y tratamientos superficiales.

2.1.6.2.3. Asfalto de curado lento (SC)

Los asfaltos de curación lenta (SC) pueden obtenerse directamente como asfaltos de curación lenta y de destilación directa a través de la destilación del petróleo crudo, como se muestra en la Figura 2.1. , o como *asfaltos rebajados de curación lenta* al "rebajar" el cemento asfáltico con un destilado pesado tal como el diesel. Tiene una viscosidad más baja que el cemento asfáltico y endurecen muy lentamente. Por lo general se designa a los asfaltos de curación lenta como SC-70, SC-250, SC-800 o SC-3000, en donde los números se relacionan con la viscosidad cinemática aproximada en centistokes a 60°C (140°F).

2.1.6.3. Asfaltos emulsificados

Los asfaltos emulsificados se producen mediante el rompimiento del cemento asfáltico, generalmente en el rango de penetración de 100 a 250, en pequeñas partículas tienen carga eléctrica y, por tanto, no coalicionan. Permanecen en suspensión en la fase líquida siempre que el agua no se evapore o el emulsificante no se rompa. Por tanto, las emulsiones asfálticas consisten de asfalto, que constituyen aproximadamente del 55 al 70 por ciento por peso, agua y un agente emulsificante que en algunos casos puede contener un estabilizador.

Generalmente las emulsiones asfálticas se clasifican en aniónicas, catiónicas o no iónicas. Los dos primeros tipos tienen cargas eléctricas que rodean a las partículas, mientras que el tercer tipo es neutro. La clasificación aniónica o catiónica se basa en las cargas eléctricas que rodean a las partículas del asfalto. Las emulsiones que contienen partículas de asfalto con carga negativa se clasifican como aniónicas, y aquellas que tienen partículas de asfalto con carga positiva se clasifican como catiónicas. Generalmente los asfaltos aniónicos y los catiónicos se usan para el mantenimiento y la construcción de carreteras, aunque es probable que en el futuro puedan usarse los no iónicos a medida que avanza la tecnología de las emulsiones.

2.1.7. Especificaciones sobre los cementos asfálticos

En Bolivia, la Administradora Boliviana de Carreteras “ABC” es la entidad encargada de velar porque se cumpla las especificaciones sobre asfaltos de pavimentación, incluidas en el libro *Manual de Ensayo de Suelos y Materiales * Asfaltos*. Éstas se basan en las normas de la *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* y de la *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.

2.1.7.1. Normas

Tabla N° 1. Normas AASHTO y ASTM aplicables a asfalto.

ENSAYO	AASHTO	ASTM
Viscosidad	T - 201	D - 2170
	T - 202	D - 2171
Penetración	T - 49	D - 5
Punto de Inflamación	T - 48	D - 92
Prueba de Película Delgada en Horno	T - 179	D - 1754
Prueba Giratoria de Película Delgada en Horno	T - 240	D - 2872
Ductilidad	T- 51	D - 113
Solubilidad	T - 44	D - 2042
Peso Especifico	T - 228	D - 70
Punto de Ablandamiento	T - 53	D - 3695

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, Condensado por: Dina Avellán.

2.1.7.2. Ensayos

Viscosidad ASTM D – 2171: Las especificaciones de los trabajos de pavimentación indican valores de viscosidad a temperaturas de 60°C (140°F), son utilizadas para clasificar el cemento asfáltico, representan la viscosidad de éste a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio.

La viscosidad a 135°C (275°F) corresponde aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas, ayuda a determinar si es apropiado o no para el pavimento que se está diseñando. El poise (P) es la unidad normal de medida.

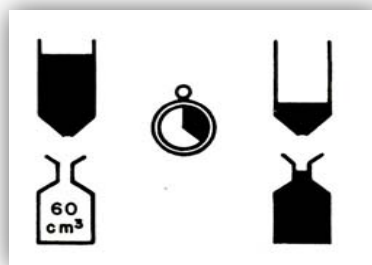


Figura N° 3. Determinación de la Viscosidad Relativa.

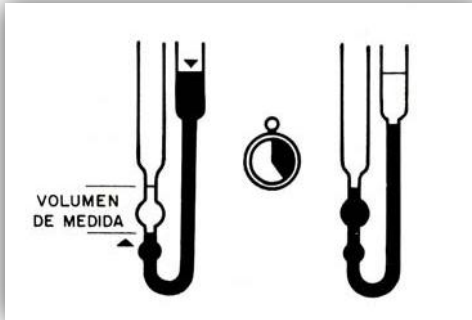


Figura N° 4. Viscosímetro Capilar.

Penetración ASTM D-5 (Penetración de materiales bituminosos): El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba está incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean utilizados los cementos asfálticos que tengan valores impropios de penetración a 25°C (77°F). Es aplicable a materiales con viscosidades dentro de un rango de 0.0036 a 20,000 Pascales por segundo (Pa*s), equivalentes a 0.036 a 200,000P.

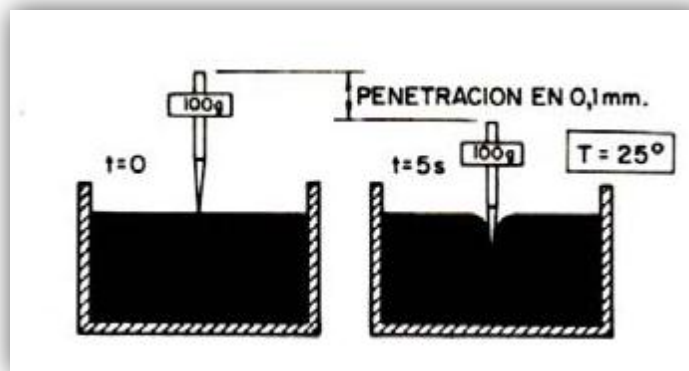


Figura N° 5. Ensayo de Penetración.

Punto de Inflamación ASTM D-92 (Punto de inflamación para materiales bituminosos): Es la temperatura más baja a la cual se separa los materiales volátiles de la muestra y crean un destello en presencia de una llama abierta. Es importante

hacer notar que punto de inflamación no es lo mismo que punto de combustión (temperatura más baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y se quema).

Se determina para identificar la temperatura máxima a la cual éste puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame. El aparato utilizado con este fin es llamado Copa Abierta de Cleveland.

Prueba de película delgada en horno (TFO) ASTM D-1754 (Efectos de calor y aire en materiales asfálticos) y Prueba de película delgada en Horno rotatorio (RTFO)

ASTM D-2872 (Efectos de calor y aire en una película en movimiento de asfalto): Son procedimientos que exponen una muestra de cemento asfáltico, a condiciones que se aproximan a las que se dan durante las operaciones en las plantas de mezclado en caliente. Las pruebas de viscosidad y penetración efectuadas sobre las muestras obtenidas después de los ensayos de TFO o RTFO, son usadas para medir el endurecimiento anticipado del material durante la construcción y servicio del pavimento.

Ductilidad ASTM D-113 (Ductilidad de materiales bituminosos): Es una medida de cuanto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. Se obtienen mediante una prueba de extensión, en donde una probeta de cemento asfáltico es extendida o estirada a una velocidad y a una temperatura específica, hasta que el hilo de cemento asfáltico se rompa. La longitud del hilo en el momento del corte se mide en centímetros y se denomina ductilidad. Las condiciones establecidas para la realización de este ensayo son: una temperatura de $25\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y a una velocidad de 5 cm. /min.

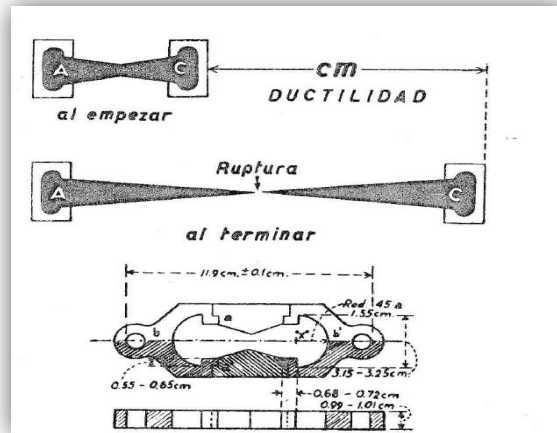


Figura N° 6. Ensayo de Ductilidad.

Solubilidad ASTM D-2042 (Solubilidad de asfaltos en tricloroetileno): Este ensayo es utilizado para medir la pureza de un cemento asfáltico. Una muestra es sumergida en un solvente. Las impurezas como sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos no se disuelven sino que se depositan en forma de partículas.

Estas impurezas insolubles son luego filtradas de la solución y medidas como un porcentaje de la muestra original.

Peso específico ASTM D-70 (Densidad de materiales bituminosos semisólidos): Es la proporción de la masa de cualquier volumen de material a la masa de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. El peso específico es determinado generalmente usando el método de picnómetro. Los resultados para el asfalto, como para el agua, se expresan normalmente en términos de peso específico a una temperatura dada. Esto se debe a que ésta varía con la expansión y la contracción del cemento asfáltico a diferentes temperaturas.

Existen dos razones importantes por las que se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

- El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando se enfría. Esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura – volumen.
- El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado.

Punto de ablandamiento ASTM D-3695 (Anillo y bola): Proporciona una relación de la dureza del asfalto (duro o blando). Para realizar este ensayo, una pelotita de acero es colocada en el centro de un anillo de acero, el cual es sumergido en un baño de agua o de glicerina. Se utiliza agua cuando el asfalto posee un punto de ablandamiento menor a 80°C y la glicerina es utilizada cuando el punto de ablandamiento es mayor a 80°C. La temperatura del baño debe estar controlada y aumentar a una tasa de 5°C por minuto. En el momento en que la pelotita toca la base (25mm por debajo del anillo) la temperatura es tomada y éste, es el punto de ablandamiento del asfalto.

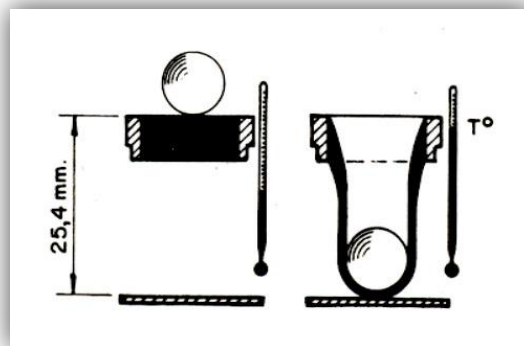


Figura N° 7. Ensayo de Punto de Reblandecimiento (Anillo y Bola).

2.1.8. Pruebas de control que se aplican a muestras asfálticas almacenadas

2.1.8.1. Control de calidad

Las pruebas de control que se mencionan a continuación son aquellas que se realizan a las muestras asfálticas almacenadas para constatar su calidad al momento de ser empleadas. Y son las siguientes:

Tabla N° 2. Pruebas de control de calidad de los cementos asfálticos.

	Un ensayo cada	Norma
Contenido de agua	50 toneladas	AASHTO T-55
Penetración	50 toneladas	AASHTO T-49
Viscosidad Saybolt - Furol	50 toneladas	AASHTO T-72
Ductilidad	50 toneladas	AASHTO T-48
Punto de inflamación	50 toneladas	AASHTO T-79
Ensayo al horno de Película delgada	50 toneladas	AASHTO T-179

- 1. Contenido de agua.-** Este método define la determinación de agua en crudos de petróleo, alquitranes y productos derivados de estos materiales.
- 2. Penetración.-** Determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones específicas de temperatura, carga y tiempo.
- 3. Viscosidad Saybolt-Furol.-** La finalidad del ensayo es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas a las que se emplean durante su aplicación.
- 4. Ductilidad.-** Es una característica importante de los asfaltos, ya que los betunes asfálticos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos que les falta esta característica.
- 5. Punto de inflamación.-** El punto de inflamación de un asfalto indica la temperatura a la que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre.

- 6. Ensayo al horno de película delgada.-** Es aquel ensayo que se emplea para prever el endurecimiento que puede esperarse que se produzca en un asfalto durante las operaciones de mezclado.

Tabla N° 3. Especificaciones que deben cumplir los cementos asfálticos.

Características	Método de Ensayo AASHTO	Método de Ensayo ASTM	Tipos				
			Industriales y Especiales	Pavimentación			
Penetración 25°C, 100gr, 5 s.	T-49	D-5	40-50	60-70	85-100	120-150	200-300
Viscosidad a 135°C. Saybolt-Furol, SSF Cinemática, centistokes.	T-72 -	E-102 D-445	120+ 240+	100+ 200+	85+ 170+	70+ 140+	50+ 100+
Punto de inflamación (Vaso abierto Cleveland), °C.	T-79	D-92	232+	232+	232+	232+	177+
Ensayo en horno en película delgada. Penetración después del ensayo, 25°C, 100gr, 5 s, % de la original.	T-179 T-49	- D-5	- 52+	- 50+	- 45+	- 42+	- 37+
Ductilidad: A 25°C, cm. A 15,6 °C, cm.	T-48 -	D-113 -	100+ -	100+ -	100+ -	60+ -	- 60+
Solubilidad en C Cl4, %	T-44	D-4	99,5+	99,5+	99,5+	99,5+	99,5+
Condiciones generales.			El asfalto se preparara por destilación del petróleo. Sera uniforme en su naturaleza y no formará espuma al calentarlo a 177°C.				

Fuente: The Asphalt Institute`s, Manual del Asfalto.

2.2. Mezclas asfálticas

2.2.1. Generalidades

Hacia 1850 algunas calles de Londres se pavimentaron utilizando unas mezclas de áridos con alquitrán realizadas *in situ*. En torno a 1870, se empezaron a aplicar en Estados Unidos mezclas fabricadas a partir de rocas asfálticas y de asfaltos naturales, si bien estos materiales ya habían sido empleados en 1810 en algunas pavimentaciones en Burdeos y el Lyon. También hacia 1870, como consecuencia del desarrollo de la industria del petróleo, se comenzaron a emplear los betunes de destilación, un subproducto de dicha industria. En la última década del siglo XIX, el norteamericano Richardson sentó las bases de la tecnología de las mezclas bituminosas para pavimentación. Sin embargo su producción industrializada no surgió hasta después de la Primera Guerra Mundial. El siguiente hito del desarrollo tecnológico de estos materiales hay que situarlos en la Segunda Guerra Mundial, propiciado principalmente por las necesidades de construcción acelerada de aeródromos militares.

Las mezclas bituminosas (o asfálticas), que también reciben usualmente la denominación de *aglomerados*, están formados por una combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquéllos queden cubiertos por una película continua de éste. Se fabrican de forma mecánica en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. Actualmente se emplea no sólo en pavimentos de carretas y de calles, sino también en otro tipo de infraestructuras con tráfico: aeropuertos, superficies industriales, pistas deportivas. Se emplean también a menudo en las capas inferiores de las carreteras para tráfico pesados intensos.

Para fabricar las mezclas bituminosas, los áridos se clasifican en unas fracciones uniformes, a partir de las cuales se compone la granulometría elegida. Se suele considerar por separado el polvo mineral (fracción que pasa el tamiz de 0.075mm). los ligantes intervienen en las mezclas en proporciones diferentes según el tipo de formulación: entre el 3 y el 10 por 100 sobre la masa de los áridos (en volumen, la proporción se sitúa entre el 8 y el 25 por 100, aproximadamente). En principio,

cualquier ligante hidrocarbonado podría emplearse para la fabricación de las mezclas bituminosas, pero los más usuales son los betunes asfálticos de penetración intermedias (40/50, 60/70 y 85/100) y las emulsiones bituminosas de roturas medias y lentas; cada vez más se emplean también los ligantes modificados con polímeros.

En las capas de rodadura, las mezclas bituminosas presentan el inconveniente de una durabilidad sensiblemente inferior a la vida útil del pavimento. Ello es debido al envejecimiento del ligante, pero ocasionan también una inadecuada formulación de la mezcla. Asimismo, como consecuencia de la naturaleza de ligante, la rigidez de una mezcla bituminosa varía apreciablemente con la temperatura, lo que también es un inconveniente.

2.2.2. Mezclas asfálticas en la construcción de pavimentos

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de carreteras, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta.

Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de una superficie de una carretera o pavimento:

1. La Función Resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción.
2. La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores de la superficie del pavimento, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores se le denomina pavimento.

2.2.3. Funcionalidad de las mezclas asfálticas en los pavimentos

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y

como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas del pavimento.

Como material simplemente estructural se pueden caracterizar de varias formas. La evaluación de parte de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno es comúnmente utilizada; o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o incluso por un valor de estabilidad y de deformación. Como en otros materiales hay que considerar también, la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

Las cualidades funcionales de un pavimento residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

1. La adherencia del neumático al pavimento.
2. Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
3. El desgaste de los neumáticos.
4. El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
5. La comodidad y estabilidad en marcha.
6. Las cargas dinámicas del tráfico.
7. La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
8. El envejecimiento de los vehículos.
9. Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales de la superficie de una carretera están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento.

Como resumen, se puede decir que en una mezcla asfáltica, en general, hay que optimizar las propiedades siguientes:

- Estabilidad.
- Durabilidad.
- Resistencia a la fatiga.

Si la mezcla se usa como capa de rodadura hay que añadir las propiedades siguientes:

- Resistencia al deslizamiento.
- Regularidad.
- Permeabilidad adecuada.
- Sonoridad.
- Color, entre otras.

Tabla N° 4. Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas.

Propiedades Funcionales de las Mezclas Asfálticas
Seguridad Resistencia al deslizamiento Regularidad transversal Visibilidad (marcas viales)
Comodidad Regularidad longitudinal Regularidad transversal Visibilidad Ruido
Durabilidad Capacidad soporte Resistencia a la desintegración superficial
Medio ambiente Ruido Capacidad de ser reciclado
Trabajabilidad

Fuente: RUIZ R. “La Calidad y la Seguridad en las Infraestructuras”.

Tabla N° 5. Propiedades técnicas de las mezclas asfálticas.

Propiedades técnicas de las mezclas asfálticas
Textura superficial
Conductividad hidráulica
Absorción de ruido
Propiedades mecánicas (en relación con el tráfico)
Resistencia a la fisuración por fatiga
Resistencias a las deformaciones plásticas permanentes
Módulo de rigidez
Resistencia a la pérdida de partículas
Durabilidad (en relación con el clima)
Resistencia al lavado por el agua
Resistencia a la fisuración térmica.
Resistencia a la fisuración por reflexión
Resistencia al envejecimiento
Trabajabilidad
Compactabilidad
Resistencia a la segregación agregado grueso/ fino
Resistencia a la segregación agregado/ligante

Fuente: RUIZ R. " La Calidad y la Seguridad en las Infraestructuras".

2.2.4. Definición de mezcla asfáltica

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

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráfico pesados intensos.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el

correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

2.2.5. Clasificación de mezclas asfálticas

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

b) Por la Temperatura de puesta en obra.

- Mezclas asfálticas en Caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 140 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.
- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica, y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica.

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas Finas: También llamadas microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

e) Por la Estructura del agregado pétreo.

- Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable.
- Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.

f) Por la Granulometría.

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.

Tabla N° 6. Clasificaciones de las mezclas asfálticas.

PARÁMETRO DE CLASIFICACIÓN	TIPO DE MEZCLAS
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frío
	En caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h < 6\%$)
	Semicerradas ($6\% < h < 12\%$)
	Abiertas ($h > 12\%$)
	Porosas ($h > 20\%$)
Tamaño máximo del agregado (t máx.)	Gruesas (t máx. $> 10\text{mm}$)
	Finas (t máx. $< 10\text{mm}$)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

Fuente: KRAEMER C. et al. (2004). "Ingeniería de Carreteras".

2.2.6. Tipología de mezclas asfálticas

2.2.6.1. Mezcla Asfáltica en Caliente ($>140^{\circ}\text{C}$)

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los pavimentos. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos aunque en ocasiones se recurre al

empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en volumen de agregados pétreos.

2.2.6.1.1. Mezclas de baja temperatura o temperatura reducida

Las mezclas de baja temperatura o temperatura reducida se describen como aquéllas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C , su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

Las mezclas asfálticas de baja temperatura son mezclas calientes en las cuales, mediante aditivos o agua, se cambian ciertas propiedades físicas del asfalto permitiendo que este se mezcle y compacte a temperaturas inferiores a las de las mezclas calientes.

Actualmente se habla de que con mezclas tibias se puede reducir la temperatura en unos 30 a 60 grados Celsius, según el aditivo a utilizarse. Los productos para mezclas tibias son en general aditivos químicos u orgánicos que además de las características mecánicas, pueden alterar la química del ligante asfáltico.

Tabla N° 7. Ventajas y desventajas de las mezclas de baja temperatura

Tipo de mezcla	Ventajas	Desventajas
De baja temperatura	_Las temperaturas de producción y colocación son significativamente menores.	_Aunque de entrada el uso de estas mezclas promete traer importante ahorros energéticos que se traducen en menor gasto, existen costos iniciales que depende del tipo de tecnología a utilizar y costos recurrentes o modificación de la planta asfáltica.
	_El envejecimiento del ligante es menor durante las operaciones de mezcla y colocación, lo que mejora la longevidad del pavimento durante su vida útil.	_Las menores temperaturas de producción usadas en las mezclas de baja temperatura pueden aumentar el daño potencial debido a la humedad. Las temperaturas más bajas de producción y compactación pueden resultar en un secado incompleto de áridos.
	_La separación térmica es reducida, así como también el consumo de combustible empleado, esto conlleva a un menor consumo energético.	
	_Los plazos para la colocación y compactación de la mezcla pueden ser más largos (es decir, la mezcla tiene mayor trabajabilidad en un tiempo más prolongado).	
	_Permite mayores distancias de acarreo de la mezcla (debido a la menor diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de la mezcla).	
	_Construcción más rápida de secciones de pavimento (por ejemplo, intersecciones, que deben abrirse lo antes posible; se requiere menos tiempo para enfriar la mezcla, para colocar la siguiente capa).	

2.2.6.2. Mezclas asfálticas en frío (0 – 30°C)

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas.

Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión. El proceso de aumento paulatino de la resistencia se le suele llamar maduración, que consiste básicamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla.

2.2.6.3. Mezcla porosa o drenante

Se emplean en capas de rodadura, principalmente en las vías de circulación rápida, se fabrican con asfaltos modificados en proporciones que varían entre el 4.5 % y 5 % de la masa de agregados pétreos, con asfaltos normales, se aplican en vías secundarias, en vías urbanas o en capas de base bajo los pavimentos de hormigón.

Utilizadas como mezclas en caliente para tráficos de elevada intensidad y como capas de rodadura en espesores de unos 4 cm., se consigue que el agua de lluvia caída sobre la calzada se evacúe rápidamente por infiltración.

2.2.6.4. Micro aglomerado

Son mezclas con un tamaño máximo de agregado pétreo limitado inferior a 10 mm., lo que permite aplicarlas en capas de pequeño espesor. Tanto los microaglomerados en Frío (se le suele llamar a las lechadas asfálticas más gruesas) como los microaglomerados en Caliente son por su pequeño espesor (que es inferior a 3 cm.) tratamientos superficiales con una gran variedad de aplicaciones.

Tradicionalmente se han considerado adecuados para las zonas urbanas, porque se evitan problemas con las alturas libres de los gálibos y la altura de los bordillos debido a que se extienden capas de pequeño espesor.

Hay microaglomerados con texturas rugosas hechas con agregados pétreos de gran calidad y asfaltos modificados, para las vías de alta velocidad de circulación.

2.2.6.5. Masillas

Son unas mezclas con elevadas proporciones de polvo mineral y de ligante, de manera que si hay agregado grueso, se haya disperso en la masilla formada por aquéllos, este tipo de mezcla no trabaja por rozamiento interno y su resistencia se debe a la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla.

Las proporciones de asfalto son altas debido a la gran superficie específica de la materia mineral. Dada la sensibilidad a los cambios de temperatura que puede tener una estructura de este tipo, es necesario rigidizar la masilla y disminuir su susceptibilidad térmica mediante el empleo de asfaltos duros, cuidando la calidad del polvo mineral y mejorando el ligante con adiciones de fibras.

2.2.6.6. Mezclas de alto modulo

Su proceso de elaboración es en caliente, citando específicamente las mezclas de alto módulo para capas de base, se fabrican con asfaltos muy duros. A veces modificados, con contenidos asfálticos próximos al 6 % de la masa de los agregados pétreos, la proporción del polvo mineral también es alta, entre el 8% - 10%. Son mezclas con un

elevado módulo de elasticidad, del orden de los 13,000 Mpa. a 20 grados centígrados y una resistencia a la fatiga relativamente elevada. Se utilizan en capas de espesores de entre 8 y 15 cm., tanto para rehabilitaciones como para la construcción de pavimentos nuevos con tráficos pesados de intensidad media o alta. Su principal ventaja frente a las bases de grava-cemento es la ausencia de agrietamiento debido a la retracción o como las mezclas convencionales en gran espesor la ventaja es una mayor capacidad de absorción de tensiones y en general una mayor resistencia a la fatiga, permitiendo ahorrar espesor.

2.2.7. Diseño de mezclas asfálticas

El objetivo principal del diseño de mezclas asfálticas de pavimentación, consiste en determinar una combinación y graduación económica de asfalto y agregados (dentro de los límites de las especificaciones del proyecto) que produzcan una mezcla con:

- Suficiente asfalto para proporcionar un pavimento durable.
- Buena estabilidad para satisfacer las demandas de tránsito sin producir deformaciones o desplazamientos.
- Suficiente trabajabilidad para evitar la segregación al momento de la colocación.
- Un contenido de vacíos lo suficientemente alto, para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas producidas por el paso de los vehículos sin que se produzca exudación.

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

De acuerdo a la normativa AASHTO Y ASTM existen dos tipos de diseños de mezclas asfálticas:

- *Marshall*
- *Hveem*

2.2.7.1. Método Marshall

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

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25mm (1") o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38mm (1.5"). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados, en términos de estimar el comportamiento en campo, se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64mm (2 1/2") y 102mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto – agregado. Los dos aspectos principales del método de diseño son: la densidad - análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

- Una vez fijada una granulometría de los áridos y el tipo de lirante, se fabrican las probetas con diferentes contenidos de ligante dentro de unos intervalos sancionados por la experiencia(al menos, cuatro probetas por cada contenido): por ejemplo, 3.5;4;4,5;5 y 5,5 por 100 sobre la masa de los áridos. A continuación se procede a su comparación en un molde mediante la denominada maza Marshall, características normalizadas, aplicando unos golpes en cada una de las dos caras planas de la probeta y cuyo número (generalmente, 50 o 75 por cara) depende las características de tráfico.

- Desmoldadas las probetas tras su enfriamiento, determina su **densidad aparente** con una balanza hidrostática. Este dato, junto con los pesos específicos del conjunto de áridos y del ligante. Permite el cálculo de las proporciones de los huecos de las mezclas (porosidad) y de los huecos en árido (suma de la porosidad y del volumen relativo ocupado por el ligante).
- Después de mantener las probetas en agua o en una estufa el tiempo necesario para que la mezcla alcance una temperatura de 60°C, se ensayan hasta la rotura de la manera ya descrita. Se define como estabilidad Marshall la carga de rotura (kN) y como deformación de Marshall el acortamiento perimetral (mm.) hasta el momento de la rotura.



Figura N° 8. Esquema del ensayo Marshall.

Los parámetros con los que se trabaja en el método Marshall son los que se ha citado: la densidad, la estabilidad, la deformación, la proporción de huecos de la mezcla y la proporción de huecos en los áridos. Su variación con el contenido de ligante (expresado normalmente en proporción sobre la masa seca de los áridos) se representa en unas gráficas como las del ejemplo de la **Fig. 2.9**.

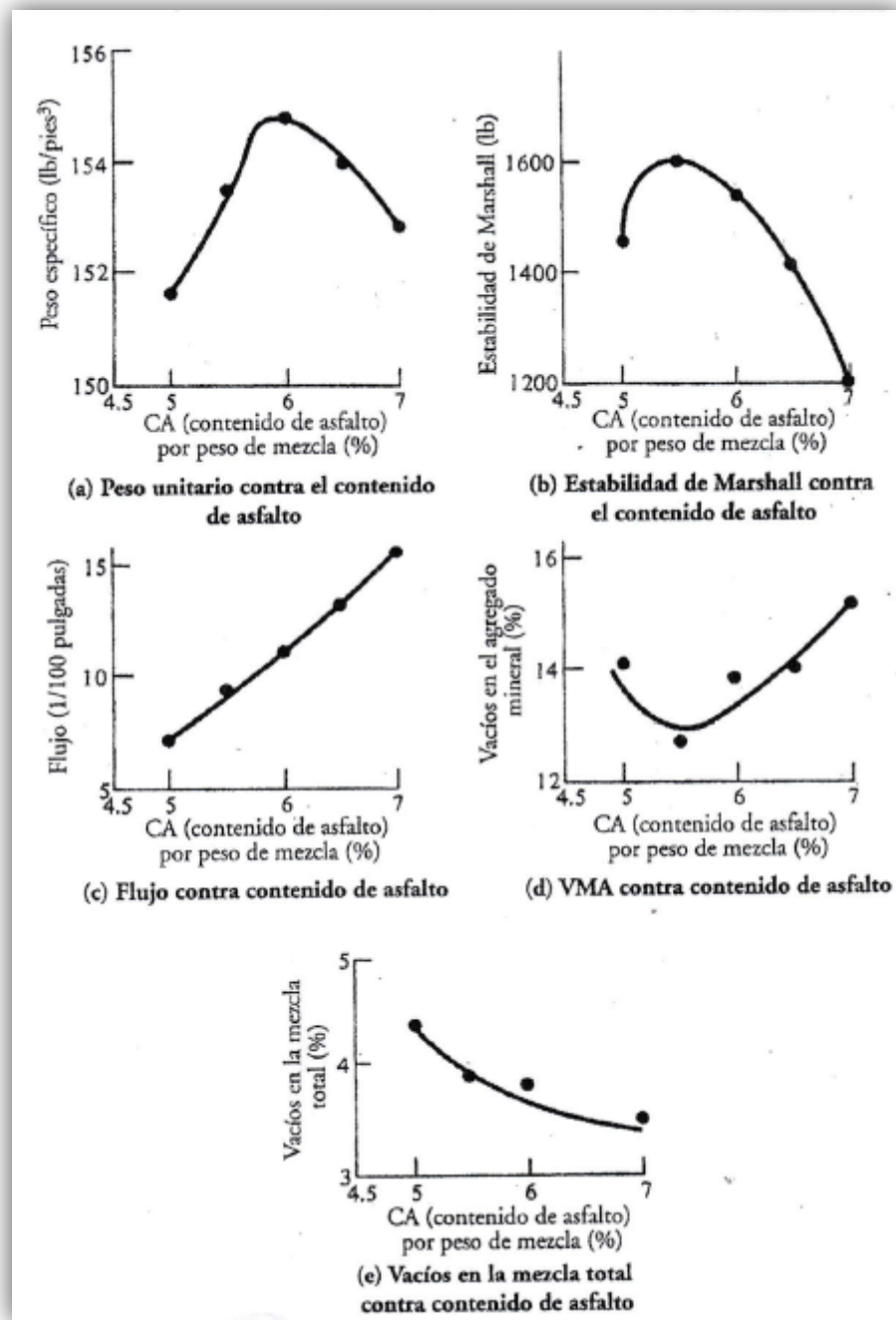


Figura N° 9. Curvas de las propiedades de la prueba Marshall.

2.2.7.2. Control de mezclas

En el control de calidad de mezclas bituminosas se puede distinguir cuatro fases:

- Control de componentes
- Control de proceso de fabricación
- Control de prueba en obra
- Control de capa terminada

En la primera fase hay que realizar unos ensayos, tanto en su origen como en los acopios (que deben estar hechos en una proporción elevada antes del comienzo de las obras), para garantizar que los materiales básicos cumplen con lo especificado. En la central de fabricación se debe controlar, en primer lugar, el buen funcionamiento de sus diversos elementos, poniendo especial atención en la calibración de los sistemas de dosificación, y en las centrales de fabricación de mezclas en caliente también los indicadores de temperaturas. Asimismo, requieren especial vigilancia en dichas centrales, el funcionamiento de los ciclones y las emisiones de la chimenea.

Sobre la mezcla fabricada se deben realizar periódicamente unos controles del contenido de ligante y de la granulometría de los áridos, realizando ensayos de extracción. Con una frecuencia menor, hay que fabricar probetas y comprobar que se satisfacen las características mecánicas y de contenido de huecos que fueron fijadas en el proceso de dosificación.

En la puesta en obra es fundamental, si se trata de una mezcla bituminosa en caliente, controlar las temperaturas del material y que el proceso en su conjunto, empezando por la preparación de la superficie existente, se ajusta a lo especificado, a las indicaciones del ingeniero director de las obras y las normas de buena práctica. Hay que atender también a las condiciones meteorológicas, de manera que se debe suspender la extensión de la mezcla si la temperatura ambiente es inferior a 5°C o si hay una lluvia apreciable. En el caso de las mezclas en caliente, un viento intenso constituye también un factor negativo.

Al salir la mezcla de la central de fabricación se deben tomar unas muestras con las que se elaboran unas probetas cuya densidad se toma como referencia para el control

de la compactación. Terminada ésta, hay que comprobar que se ha alcanzado la densidad especificada (proporción mínima de esa densidad de referencia).

Los métodos de control de densidad que tiene un mayor rendimiento son los basados en las técnicas nucleares, similares a las que se utilizan para el control de la compactación de los suelos. Aunque con ellos no se obtiene una medida precisa de la densidad de la capa, proporcionan unos valores relativos suficientemente significativos no sólo del grado de compacidad, sino también de la homogeneidad de la capa. Al final de la jornada hay que extraer testigos con sonda rotativa, lo que sirve también como comprobación de los espesores y para poder contrastar en el laboratorio las características mecánicas de la mezcla.

Finalmente ha de controlarse la regularidad de la superficie terminada comprobando si se ajusta a los planos del proyecto y las exigencias de las especificaciones.

Para conseguir que el pavimento tenga una buena regularidad final, que ha de adaptarse a las velocidades de circulación, es imprescindible que desde la explanada se hayan ido consiguiendo una buena regularidad en todas las capas. En todo caso, debe considerarse que la falta de regularidad en una capa se suele deber a alteraciones en el ritmo de extensión y en el paso de los compactadores. En las capas de rodadura, el control de calidad termina con la medida de la macro textura y de la resistencia al deslizamiento.

2.3. Ligantes para mezclas de baja temperatura

2.3.1. Modificadores de asfalto

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de una sustancia estable en el tiempo y a cambios de temperatura, que se añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y mecánicas, y disminuir también 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.

2.3.2. Aditivos de mezclas de baja temperatura

Los aditivos para mezclas de baja temperatura son modificadores químicos u orgánicos que se incorporan al asfalto buscando reducir su viscosidad a altas temperaturas de manera que se pueda mezclar y compactar a temperaturas más bajas.

Actualmente existen una gama de productos para mezclas de baja temperatura, de diversas características y en la búsqueda de acaparar un mercado regido por la técnica y la búsqueda de lo más durable; las compañías productoras de estos químicos les han incorporado mejoradores de adherencia y agentes rejuvenecedores para que además de los beneficios ambientales, el desempeño de la mezcla sea mejor y con menor envejecimiento del ligante.

Los aditivos modificadores de mezclas de baja temperatura según su origen pueden ser:

- Aditivos Orgánicos
- Aditivos Químicos

2.3.2.1. Aditivos orgánicos

Estas tecnologías se basan en la adición a la mezcla de distintos tipos de cera. Por encima del punto de fusión de las ceras, se produce generalmente un decrecimiento en la viscosidad.

Las ceras usadas por estos productos son moléculas formadas por cadenas hidrocarbonadas que se funden a temperaturas entre los 80 y los 120°C, modificando por lo consiguiente las propiedades originales del ligante. El punto de fusión depende en gran medida de la longitud de la cadena de carbonos (C45 o más). Entre un 2 y un 4% de cera del total de la masa del ligante es la dosificación habitual. Los aditivos orgánicos suelen conseguir una reducción de temperatura de entre 20-30°C, mientras

que también mejoran la resistencia a deformación de los asfaltos tratados con estos productos.

2.3.2.2. Aditivos químicos

El último tipo de tecnologías WMA que se va a considerar son los aditivos químicos. Estos productos no dependen de ningún proceso de espumación o de reducción de la viscosidad para reducir las temperaturas de mezclado y compactación. En lugar de eso, estos productos generalmente incluyen una combinación de agente emulsificantes, surfactantes, polímeros y aditivos para mejorar la envuelta, la trabajabilidad de la mezcla, y la compactación, así como promotores de adhesión (agentes cohesivos). La cantidad añadida y la reducción de temperatura conseguida por estas tecnologías dependen del producto específico utilizado. Los aditivos generalmente se mezclan con el ligante antes de que éste sea introducido en el tambor de mezclado.

2.3.3. Propiedades de los ligantes para mezclas de baja temperatura

2.3.3.1. Viscosidad

El cambio en la viscosidad (reducción a altas temperaturas y para algunos productos aumento a bajas) del ligante es el principio más importante que hace posible producir mezclas asfálticas a menores temperaturas con una correcta envuelta y sin pérdida de trabajabilidad a la hora de la extensión. La relación temperatura-viscosidad del ligante es por lo tanto determinante a la hora de decidir los rangos de temperatura a los que se producirá estas mezclas de baja temperatura.

2.3.3.2. Durabilidad y resistencia al endurecimiento

En el betún el endurecimiento es causado mayoritariamente por la presencia de oxígeno, radiaciones ultravioleta y por los cambios de temperatura. Estas influencias externas causan que el betún endurezca, dando lugar a un decrecimiento de la

penetración, un incremento en el punto de ablandamiento y, generalmente, un aumento del índice de penetración. Éste es un factor muy importante que debe ser tomado en cuenta de cara a las mezclas de baja temperatura, dado que se produce un menor endurecimiento en el proceso de producción debido a las menores temperaturas y a una mejor compactación que da lugar a menores huecos de aire en el pavimento.

2.3.3.3. Penetración y punto de ablandamiento

La diferencia más importante entre las mezclas de baja temperatura y las mezclas convencionales es la reducción de temperatura, que afecta a los valores de la penetración y del punto de ablandamiento.

La penetración y el aumento en el punto de ablandamiento para ligantes envejecidos en el corto plazo puede ser un buen método para comparar los cambios en las propiedades del ligante entre las mezclas de baja temperatura y las mezclas convencionales después de su producción. Esto permitiría determinar la necesidad o no de usar un betún más duro para evitar problemas de deformaciones permanentes.

2.3.4. Algunos beneficios que se busca en ligantes empleados para mezclas de baja temperatura

Los beneficios que debe proporcionar un ligante asfáltico para una mezcla de baja temperatura son los siguientes:

Aspectos ambientales

- Reducción de energía en la elaboración de mezclas.
- Reducción en la emisión de gases invernaderos.

Aspectos constructivos

- Mayor flexibilidad en la colocación y compactación de las mezclas.

Aspectos de la salud

- Reducción de las emisiones de gases.

Aspectos de durabilidad

- Reducción de la transformación (rigidización) del ligante durante las etapas de elaboración, transporte y colocación.

CAPÍTULO III
APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPÍTULO III

3. APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1. Análisis del cemento asfáltico 85-100

Para iniciar con la investigación fue necesario efectuar ensayos de calidad al cemento asfáltico 85-100, para conocer características y propiedades, y de este modo, tener información básica que nos indique el cumplimiento de las especificaciones y normativas.

Con los datos obtenidos de los ensayos de calidad al material se podrá proceder a la elaboración de los nuevos ligantes asfálticos formados a partir de cemento asfáltico 85-100 más fluidificante, que serán posteriormente evaluados con la finalidad de ver si pueden ser empleados en mezclas de baja temperatura.

3.1.1. Proceso de caracterización del cemento asfáltico 85-100

Para la caracterización del cemento asfáltico 85-100, se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

- Viscosidad Saybolt Furol.
- Penetración.
- Punto de Ablandamiento.
- Ductilidad.

3.1.1.1. Pruebas en laboratorio

PENETRACIÓN

Procedimiento en laboratorio:

- Calentamiento de la muestra asfáltica hasta una temperatura en la que se encuentre totalmente fluida.



Foto N° 1.Calentamiento de la muestra asfáltica.

- Hacer pasar la muestra a través del tamiz N°20, con la finalidad de extraer residuos o basuras que pudiera contener debidas al almacenamiento.



Foto N° 2.Tamizado de la muestra asfáltica.

- Vaciar el asfalto en las cápsulas metálicas, en un número de tres muestras y dejar enfriar durante una hora a temperatura ambiente.



Foto N° 3. Muestras a temperatura ambiente.

- Someter las muestras a un baño de agua a 25°C de temperatura durante una hora en un recipiente herméticamente cerrado.



Foto N° 4. Baño de agua de las muestras a 25°C.

- Preparación del equipo y materiales necesarios para la prueba de penetración los cuales son: penetrómetro, aguja de penetración, transportador de cápsulas, termómetro y cronómetro.
- Con el equipo listo se ensaya la muestra para determinar la penetración del cemento asfáltico 85 - 100 a una temperatura de 25°C, una carga de 100 gr y un tiempo de 5 seg.



Foto N° 5. Prueba de Penetración.

- Realizar tres lecturas por cada muestra de asfalto para luego obtener un promedio de penetraciones.



Foto N° 6. Lectura de penetración de la muestra asfáltica.

VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

Procedimiento en laboratorio:

- Calentamiento de la muestra con cuidado para prevenir sobrecalentamientos locales hasta que llegue a estar suficientemente fluida.

- Pasar la muestra a través del tamiz N°20, con la finalidad de extraer residuos o basuras que pudiera contener debido al almacenamiento.
- Transferencia de un mínimo 60 ml al contenedor de asfaltos del Viscosímetro Saybolt Furol.
- Encender el equipo de viscosidad y esperar que alcance a la temperatura de ensaye.



Foto N° 7. Control de temperatura de la muestra.

- Cuando el termómetro ubicado en el contenedor de asfalto alcance la temperatura de ensaye y la misma se conserve constante, entonces se realiza el ensaye.



Foto N° 8. Realización de la Prueba de Viscosidad.

- Se realiza el ensayo midiendo el tiempo de flujo en segundos de 60 ml de muestra que fluye a través del orificio Furol.



Foto N° 9. Medición en segundos de muestra que fluye en el orificio Furol.

PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Procedimiento en laboratorio:

- Calentamiento con cuidado de la muestra, agitándola continuamente para prevenir sobrecalentamientos, hasta que esté suficientemente fluida para verterla.
- Pasar la muestra a través del tamiz N°20, con la finalidad de extraer residuos o basuras que pudiera contener debido al almacenamiento.
- El equipo necesario para la prueba de punto de ablandamiento estará dado por una placa metálica, anillo de bronce, guías, bolas de acero, soporte de anillo, un vaso de vidrio resistente al calor y un termómetro.



Foto N° 10. Equipo para la prueba de Punto de Ablandamiento.

- Sumergimos todo el aparato ensamblado para el punto de ablandamiento en un vaso de 800 ml de volumen, que contendrá agua destilada a una temperatura de 5°C.



Foto N° 13. Baño de agua de las muestras a 5°C.

- Dejamos reposar la muestra asfáltica durante un tiempo de 15 min a una temperatura constante de 5°C.
- Aplicamos calor de tal manera que la temperatura del líquido aumente a una velocidad uniforme.



Foto N° 14. Aplicación de calor a la muestra.

- Finalmente se lectura y anota para cada anillo y bola la temperatura indicada en el termómetro; en el instante que la muestra que rodea la bola, toque la placa inferior.



Foto N° 15. Lectura de temperatura de cada bola.

DUCTILIDAD

Procedimiento en laboratorio:

- Calentamiento con cuidado de la muestra, agitándola continuamente para prevenir sobrecalentamientos, hasta que esté suficientemente fluida para verterla.
- Pasar la muestra a través del tamiz N°20, con la finalidad de extraer residuos o basuras que pudiera contener debido al almacenamiento.
- Cubrir los moldes con una película delgada de desmoldante para evitar que el material se adhiera y luego proceder al armado.



Foto N° 16. Moldes para prueba de Ductilidad.

- Verter la muestra caliente en el molde con un chorro delgado que vaya hacia atrás y hacia adelante, para que de esta manera tenga un llenado prolijo.



Foto N° 17. Vaciado de muestra en los moldes.

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



Foto N° 18. Muestras a temperatura ambiente.

- Colocar la muestra en baño de agua mantenido a la temperatura de ensaye especificada por 30 min.
- Retirar la briqueta de la placa y enganchar los anillos de cada extremo de la briqueta a las clavijas del ductilímetro.



Foto N° 19. Briquetas en el ductilímetro.

- Ensayar las muestras del ductilímetro que serán elongadas a una velocidad de 5 cm/min y una temperatura de 25°C especificadas.



Foto N° 20. Prueba de Ductilidad.

- Lectura de la longitud medida en cm de cada muestra en el punto donde el hilo no tiene prácticamente sección transversal y donde ocurre la ruptura.

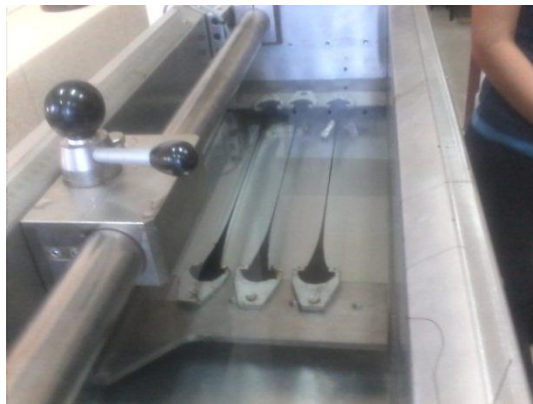


Foto N° 21. Lectura de elongación de la muestra en cm.

3.1.1.2. Procesamiento de datos

Tabla N° 1. Resultados obtenidos de la caracterización del cemento asfáltico 85 – 100.

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones		AASHTO
			Mínimo	Máximo	ASTM
Peso específico	gr/cm ³	-	1,000	1,005	T - 228
					D - 70
Punto de inflamación	° C	-	> 232		T - 48
					D - 92
Penetración a 25°C, 100 grs, 5 seg	Dmm.	87	85	100	T - 49
					D - 5
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	seg.	104	85		T - 72
Punto de ablandamiento	° C	45	43	53	T - 53
					D - 3695
Ductilidad	cm	137	100		T - 51
					D - 113

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Análisis de ligantes asfálticos formados de cemento más fluidificante

3.2.1. Descripción de las características de los fluidificantes

Los fluidificantes que se utilizarán en la conformación de ligantes asfálticos para el estudio son:

- Gasolina
- Kerosene
- Diesel

3.2.2. Proceso de caracterización de los ligantes

El tratamiento que recibirán en laboratorio los ligantes asfálticos formados a partir de cemento asfáltico 85 – 100 y fluidificante estará dado por los siguientes ensayos:

- Viscosidad Saybolt Furol.
- Destilación.
- Penetración.
- Punto de Ablandamiento.

3.2.2.1. Formación de los ligantes asfálticos

El procedimiento que se llevó a cabo en laboratorio para la formación de los ligantes asfálticos estudiados en el presente trabajo investigativo es el siguiente:

- Primeramente se determinó la cantidad de cemento asfáltico 85 – 100 y fluidificante que tendrá cada ligante. En este caso se determinó en porcentaje, un 70% de cemento asfáltico 85 – 100 y un 30% de fluidificante.
- Con los porcentajes de cemento asfáltico y fluidificante establecidos, las cantidades empleadas para el mezclado se obtuvieron en unidades de volumen.
- El procedimiento de fluidificación se lo realizó a partir de que el cemento asfáltico 85 – 100 se encontraba en un estado maso menos líquido.
- El mezclado se realizó de forma manual hasta que se forme una sustancia homogénea.
- El número de ligantes formados en laboratorio es de tres y cada uno de ellos corresponde a los fluidificantes gasolina, kerosene y diesel.
- Finalmente decimos que los ligantes asfálticos utilizados en la investigación estarán constituidos de la siguiente forma:

1. *Ligante asfáltico 1 (cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante gasolina).*
2. *Ligante asfáltico 2 (cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante keroseno).*
3. *Ligante asfáltico 3 (cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante diesel).*

3.2.2.2. Pruebas de laboratorio en condiciones de baja temperatura

VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

Procedimiento en laboratorio:

- Con los ligantes formados en laboratorio a partir de cemento asfáltico 85 – 100 y fluidificantes gasolina, keroseno y diesel, en un porcentaje de 70 % de asfalto y 30% de fluidificante. Se cuenta con tres ligantes asfálticos que corresponde a cada fluidificante.
- Como el ligante asfáltico obtenido en laboratorio de cemento asfáltico 85 – 100 y fluidificante se encuentra líquido, se realiza directamente la prueba de viscosidad.

- Se vierte el ligante asfáltico en una cantidad mínima de 60 ml en el contenedor de asfaltos del Viscosímetro Saybolt Furol.
- Se enciende el equipo de viscosidad y se controla el incremento de temperatura al cual está expuesto la muestra.
- Cuando el termómetro del contenedor de asfalto alcanza la temperatura de ensaye deseada y la misma permanece constante, se realiza el ensayo.



Foto N° 22. Realización de la Prueba de Viscosidad.

- Las temperaturas de ensaye para cada ligante estará dada de la siguiente manera: 60°C, 70°C, 80°C, 90°C y 100°C. Para cada temperatura se realizará tres ensayes por ligante asfáltico. Las variaciones de temperatura serán de 60 a 100°C debido que la investigación hace referencia a la variación de su comportamiento de los ligantes asfálticos en condiciones de baja temperatura.
- Con la cantidad de ensayes definido por cada incremento de temperatura, se mide el tiempo de flujo en segundos de 60 ml de muestra que fluye a través del orificio Furol, bajo condiciones específicas.



Foto N° 23. Medición en segundos de muestra que fluye en el orificio Furool.

DESTILACIÓN

Procedimiento en laboratorio:

- Primeramente se determinará el peso específico del asfalto y agua.
- Para la determinación del peso específico de asfalto se pesa la probeta de vidrio de 100 ml de volumen vacía, posteriormente se vierte asfalto a una temperatura de $15,5^{\circ}\text{C}$ y nuevamente se pesa la probeta más asfalto.



Foto N° 24. Determinación del peso de probeta más asfalto.

- Para la determinación del peso específico de agua se pesa la probeta de vidrio de 100 ml de volumen vacía, posteriormente se vierte agua y nuevamente se pesa la probeta más agua.



Foto N° 25. Determinación del peso de probeta más agua.

- Con los pesos específicos del asfalto y el agua calculamos la masa en gramos del volumen que se ensayara en la destilación.
- Luego se pesa la masa en gramos del volumen a ensayar más el matraz.



Foto N° 26. Determinación de peso de matraz más asfalto.

- Con la cantidad definida de muestra que se encuentra en el matraz de destilación se inicia el armado del equipo.



Foto N° 27. Muestra asfáltica en el matraz de destilación.

- El equipo de destilación estará conformado por una fuente de calor, soporte de matraz, camisa protectora, matraz de destilación de 500 ml, adaptador, condensador, receptor y contenedor del residuo.



Foto N° 28. Equipo para la Prueba de Destilación.

- Con el equipo armado y en funcionamiento se inicia el control de temperaturas y volúmenes de destilación.



Foto N° 29. Control de temperaturas y volúmenes de destilación.

- Por último se informará los volúmenes de destilación de las siguientes temperaturas 190°C, 225°C, 260°C, 316°C y 360°C. Obteniendo así también en porcentaje el residuo asfáltico y el destilado total.



Foto N° 30. Registro de los volúmenes de destilación.

PENETRACIÓN

- Para la prueba de penetración se utilizará el residuo obtenido de la destilación de los ligantes asfálticos uno, dos y tres respectivamente.



Foto N° 31. Residuo de destilación.

- Se vaciará el residuo asfáltico en las cápsulas metálicas en un número de tres muestras por cada ligante.



Foto N° 32. Vaciado de muestra en las capsulas.

- Se dejará enfriar durante una hora las muestras a temperatura ambiente para luego ser expuestas a un baño de agua a 25°C de temperatura durante una hora en un recipiente herméticamente cerrado.



Foto N° 33. Muestras a temperatura ambiente.



Foto N° 34. Baño de agua de las muestras.

- Luego se procederá a preparar equipos y materiales necesarios para la prueba de penetración como ser: penetrómetro ubicado en una superficie plana, la aguja de penetración, transportador de cápsula donde se realiza la prueba con la muestra sumergida en baño de agua a 25°C, termómetro para controlar la temperatura de ensaye y el cronómetro para medir el tiempo.

- Con el equipo listo se ensaya la muestra para determinar la penetración del ligante asfáltico a una temperatura de 25°C, una carga de 100 gr y un tiempo de 5 seg.



Foto N° 35. Prueba de Penetración.

- Se realizará tres lecturas por cada muestra de asfalto para luego obtener un promedio de penetraciones.



Foto N° 36. Lectura de la muestra asfáltica.

PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Procedimiento en laboratorio:

- Para la prueba de punto de ablandamiento se utilizará el residuo obtenido de la destilación del ligante asfáltico formado en laboratorio.
- El equipo necesario para la prueba de punto de ablandamiento estará dado por una placa metálica, anillo de bronce, guías, bolas de acero, soporte de anillo, un vaso de vidrio resistente al calor y un termómetro.



Foto N° 37. Equipo de punto de ablandamiento.

- Se cubrirá cuidadosamente la superficie de la placa, anillo, guías y bolas de acero con una película delgada de desmoldante para prevenir que el material se adhiera.
- Se vierte la muestra obtenida de la destilación en los anillos y se deja enfriar durante una media hora a temperatura ambiente.



Foto N° 38. Muestras a temperatura ambiente.

- Si existiera exceso de material bituminoso en los anillos se enrasará con una espátula o cuchillo caliente hasta que la superficie esté horizontal.
- Se procede al armado del equipo conformado por los anillos, las guías, bolas de acero, soporte de anillo y termómetro.
- Sumergimos el equipo armado para la prueba de punto de ablandamiento en un vaso de vidrio de 800 ml de volumen resistente a altas temperaturas. Y dejamos reposar la muestra durante un tiempo de 15 min a una temperatura constante de 5°C.



Foto N° 39. Baño de agua de las muestras a 5°C.

- Aplicamos calor de tal manera que la temperatura del líquido (agua destilada) aumente a una velocidad uniforme.
- Se lectura y anota para cada anillo y bola la temperatura indicada en el termómetro al instante que la muestra que rodea la bola toque la placa inferior.



Foto N° 40. Lectura de temperatura de cada bola.

3.2.3. Ligante asfáltico N°1 (Cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante gasolina)

3.2.3.1. Procesamiento de datos

Con la información recolectada de las pruebas en laboratorio de viscosidad, destilación, penetración y punto de ablandamiento realizadas al ligante asfáltico N°1 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante Gasolina se inicia el procesamiento o tratamiento de datos a partir de medidas de tendencia aritmética, máxima y mínimas.

LIGANTE ASFÁLTICO N°1

(CEMENTO ASFÁLTICO 85 – 100 MÁS FLUIDIFICANTE GASOLINA)

1) VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

Tabla N° 2. Datos y Resultados obtenidos de la prueba de Viscosidad Saybolt Furol (ligante N°1).

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ensayo 1	seg.	71	45	30	27	15
Ensayo 2	seg.	75	48	34	23	17
Ensayo 3	seg.	73	46	33	25	13
Promedio	seg.	73	46	32	25	15
Mínima	seg.	71	45	30	23	13
Máxima	seg.	75	48	34	27	17

Fuente: Elaboración propia.

2) DESTILACIÓN

Tabla N° 3. Volúmenes de Destilación.

Temperatura	Destilado
°C	ml
190	0
225	36
260	43
316	84
360	95
TOTAL	95

Fuente: Elaboración propia.

— RESIDUO ASFÁLTICO

$$R = \left[\frac{200 - DT}{200} \right] \times 100$$

Donde:

R=Contenido de residuo (% en volumen).

DT=Destilado total recuperado a 360°C (ml).

$$R = \left[\frac{200 - 95}{200} \right] \times 100$$

$$R = 52,5\%$$

— DESTILADO TOTAL

$$DT\% = \left(\frac{DT}{200} \right) \times 100$$

Donde:

DT=Destilado total recuperado a 360°C (ml).

$$DT\% = \left(\frac{95}{200} \right) \times 100$$

$$DT\% = 47,5\%$$

3) PENETRACIÓN

Tabla N° 4. Datos y Resultados de la prueba de Penetración (ligante N°1).

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Temperatura	°C	25	25	25
Carga	grs.	100	100	100
Tiempo	seg.	5	5	5
Ensayo 1	Dmm.	199	200	206
Ensayo 2	Dmm.	196	203	199
Ensayo 3	Dmm.	195	205	203
Promedio	Dmm.	197	203	203

Fuente: Elaboración propia.

Penetración	Dmm.	201
--------------------	-------------	-----

4) PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Tabla N° 5. Datos y Resultados de la prueba de Punto de Ablandamiento (ligante N°1).

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Temperatura	°C	40	41	40

Fuente: Elaboración propia.

Ablandamiento	°C	40
----------------------	-----------	----

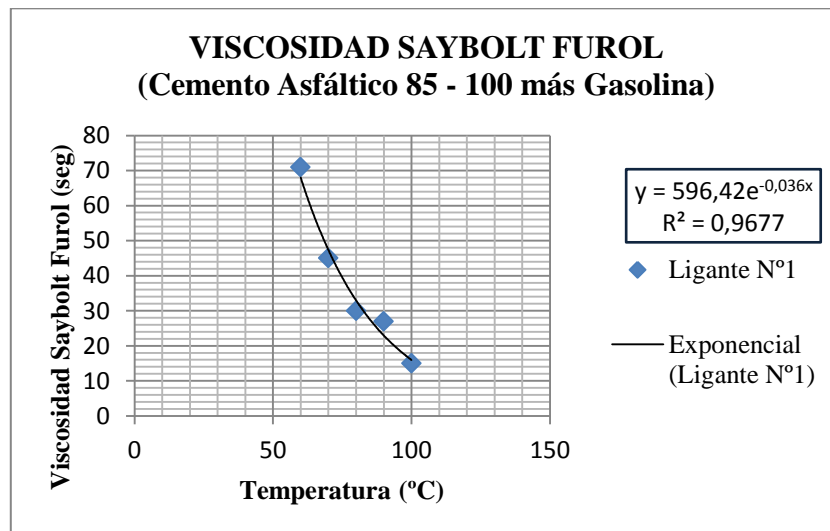
3.2.3.2. Análisis de resultados

VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL
LIGANTE ASFALTICO N°1
(CEMENTO ASFÁLTICO 85 – 100 MÁS FLUIDIFICANTE GASOLINA)

1) Tabla de datos del ligante asfáltico N°1.

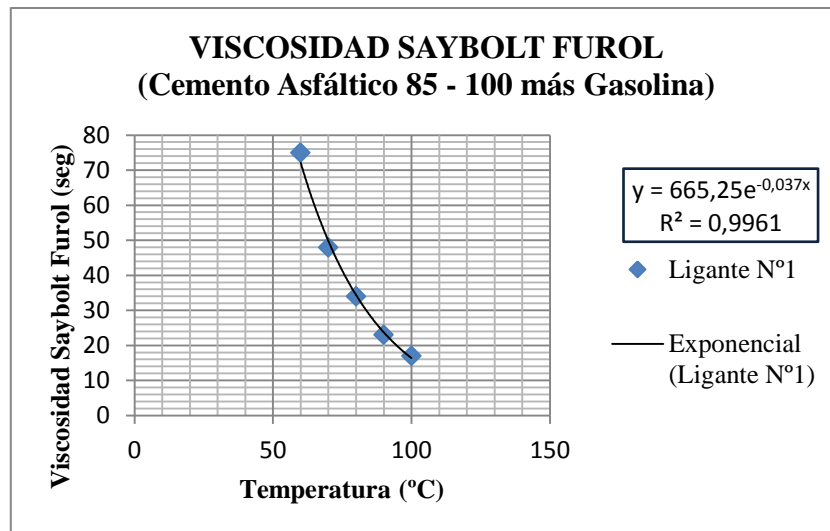
Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ensayo 1	seg.	71	45	30	27	15
Ensayo 2	seg.	75	48	34	23	17
Ensayo 3	seg.	73	46	33	25	13

a) Ensayo 1



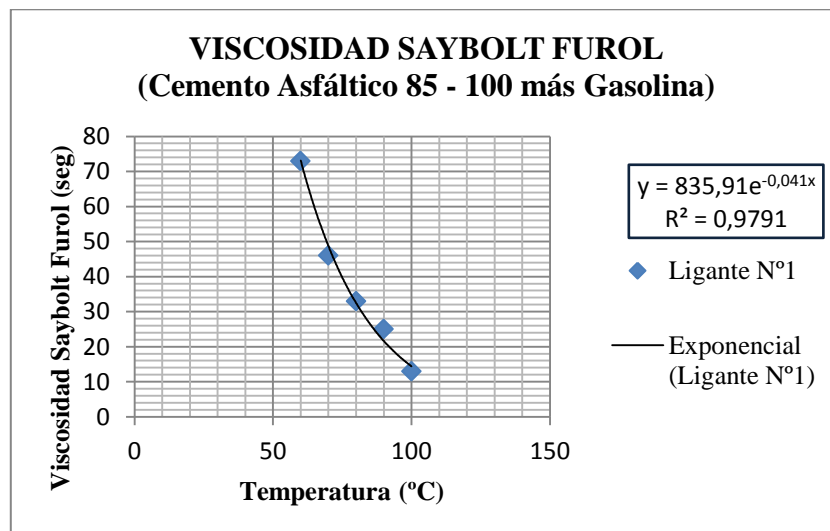
Gráfica N° 1. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°1 (ensayo 1).

b) Ensayo 2



Gráfica N° 2. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°1 (ensayo 2).

c) Ensayo 3



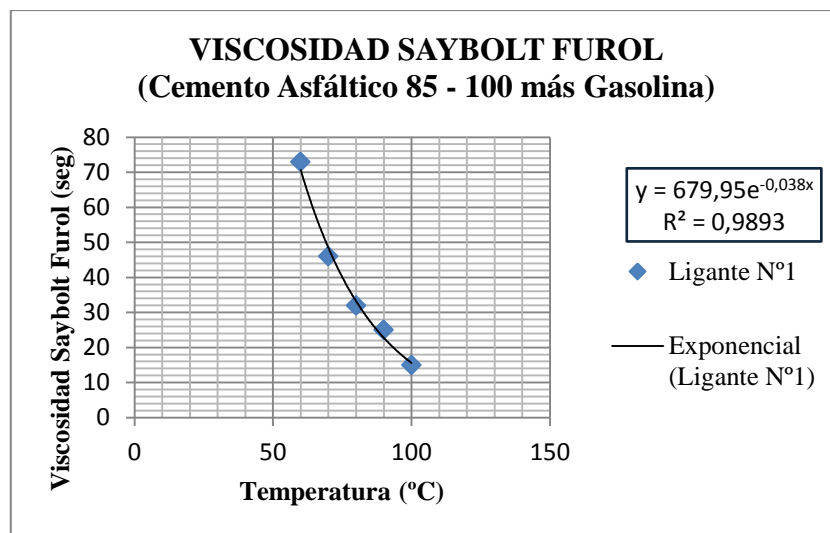
Gráfica N° 3. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°1 (ensayo 3).

En las gráficas de viscosidad vs temperatura de cada ensayo realizado al ligante asfáltico N°1 compuesto de cemento asfáltico 85 – 100 y fluidificante gasolina, se observa en las curvas que describen su comportamiento una variación en la viscosidad en cada incremento de temperatura. Proporcionándonos valores de

viscosidad superiores a menor temperatura de ensaye y valores inferiores de viscosidad a mayor temperatura. Los tiempos que se determinaron para cada variación de temperatura son menores a medida que la misma incrementa, existiendo una disminución notoria de la resistencia a fluir del ligante asfáltico N°1.

2) Tabla de resultados promedios del ligante asfáltico N°1.

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Promedio	seg.	73	46	32	25	15

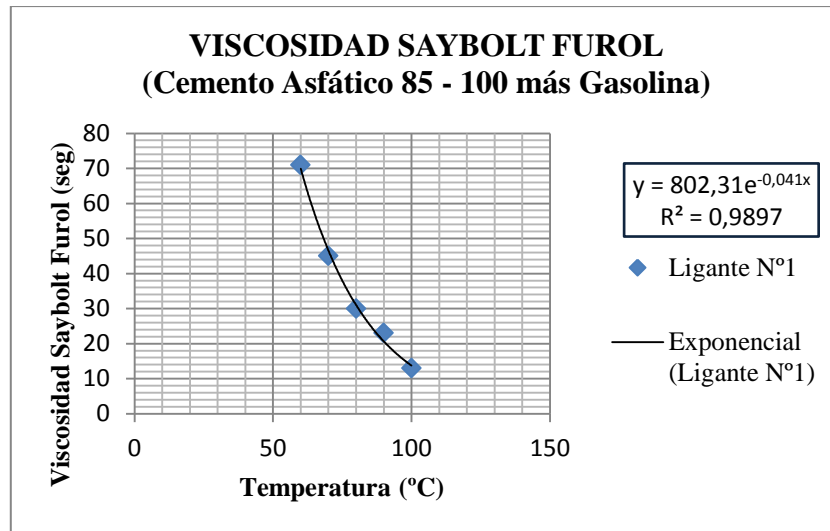


Gráfica N° 4. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°1 (promedio).

En la gráfica de viscosidad vs temperatura de los valores promedios se observa que la curva decrece a medida que aumenta la temperatura. Lo que nos da un comportamiento del ligante que muestra que a temperaturas bajas se tiene mayor viscosidad y a temperaturas altas menor viscosidad. Lo que nos indica que su resistencia a fluir disminuye a partir de cada aumento de temperatura.

3) Tabla de resultados mínimos del ligante asfáltico N°1.

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Mínima	seg.	71	45	30	23	13

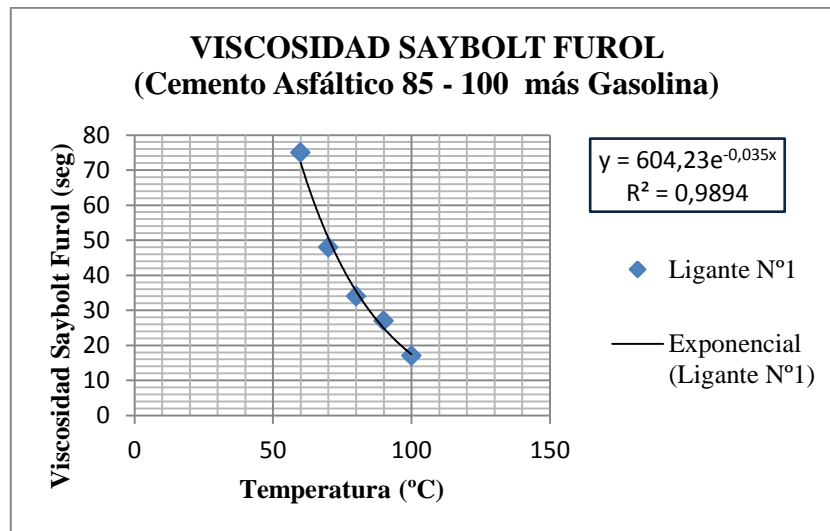


Gráfica N° 5. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°1 (mínima).

En la gráfica conformada por valores mínimos de viscosidad y temperaturas establecidas, se observa en la curva que describe el comportamiento del ligante asfáltico una pequeña disminución de su pendiente respecto a las demás. La curva es descendente a medida que se incrementa la temperatura y está relacionada a la disminución de viscosidad del ligante.

4) Tabla de resultados máximos del ligante asfáltico N°1.

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Máxima	seg.	75	48	34	27	17



Gráfica N° 6. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°1 (máxima).

En la gráfica conformada por valores máximos de viscosidad y temperaturas establecidas de ensaye, se observa en la curva que describe el comportamiento del ligante asfáltico un aumento de su pendiente respecto a las demás.

Debido que para la gráfica se utilizó los valores máximos de viscosidad de cada temperatura de ensayo se observa que la misma va descendiendo a partir de valores un poco superiores. El comportamiento en sí del ligante es descendente a medida que se incrementa la temperatura, sigue existiendo la relación a menor temperatura mayor viscosidad y mayor temperatura menor viscosidad. Los intervalos de tiempo medidos para cada temperatura son cada vez menores demostrando que la resistencia a fluir del líquido es cada vez menor.

3.2.4. Ligante asfáltico N°2 (Cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante keroseno)

3.2.4.1. Procesamiento de datos

Con la información recolectada de las pruebas en laboratorio de viscosidad, destilación, penetración y punto de ablandamiento realizadas al ligante asfáltico N°2 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante Keroseno se inicia el procesamiento o tratamiento de datos a partir de medidas de tendencia aritmética, mínimas y máximas.

LIGANTE ASFÁLTICO N°2
(CEMENTO ASFÁLTICO 85 – 100 MÁS FLUIDIFICANTE KEROSENO)

1) VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

Tabla N° 6. Datos y Resultados obtenidos de la prueba de Viscosidad Saybolt Furol (ligante N°2).

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ensayo 1	seg.	108	60	34	24	19
Ensayo 2	seg.	100	66	36	27	17
Ensayo 3	seg.	104	63	33	25	19
Promedio	seg.	104	63	34	25	18
Mínima	seg.	100	60	33	24	17
Máxima	seg.	108	66	36	27	19

Fuente: Elaboración propia.

2) DESTILACIÓN

Tabla N° 7. Volúmenes de Destilación (ligante N°2).

Temperatura	Destilado
°C	ml
190	0
225	29
260	52
315	87
316	87
360	102
TOTAL	102

Fuente: Elaboración propia.

— RESIDUO ASFÁLTICO

$$R = \left[\frac{200 - DT}{200} \right] \times 100$$

Donde:

R=Contenido de residuo (% en volumen).

DT=Destilado total recuperado a 360°C (ml).

$$R = \left[\frac{200 - 102}{200} \right] \times 100$$

$$R = 49\%$$

— *DESTILADO TOTAL*

$$DT\% = \left(\frac{DT}{200} \right) \times 100$$

Donde:

DT=Destilado total recuperado a 360°C (ml).

$$DT\% = \left(\frac{102}{200} \right) \times 100$$

$$DT\% = 51\%$$

3) PENETRACIÓN

Tabla N° 8. Datos y Resultados de la prueba de Penetración (ligante N°2).

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Temperatura	°C	25	25	25
Carga	grs.	100	100	100
Tiempo	seg.	5	5	5
Ensayo 1	Dmm.	218	213	220
Ensayo 2	Dmm.	217	219	217
Ensayo 3	Dmm.	213	215	213
Promedio	Dmm.	216	216	217
Penetración	Dmm.	216		

Fuente: Elaboración propia.

4) PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Tabla N° 9. Datos y Resultados de la prueba de Punto de Ablandamiento (ligante N°2).

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Temperatura	°C	34	35	36
Ablandamiento	°C	35		

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4.2. Análisis de resultados

VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

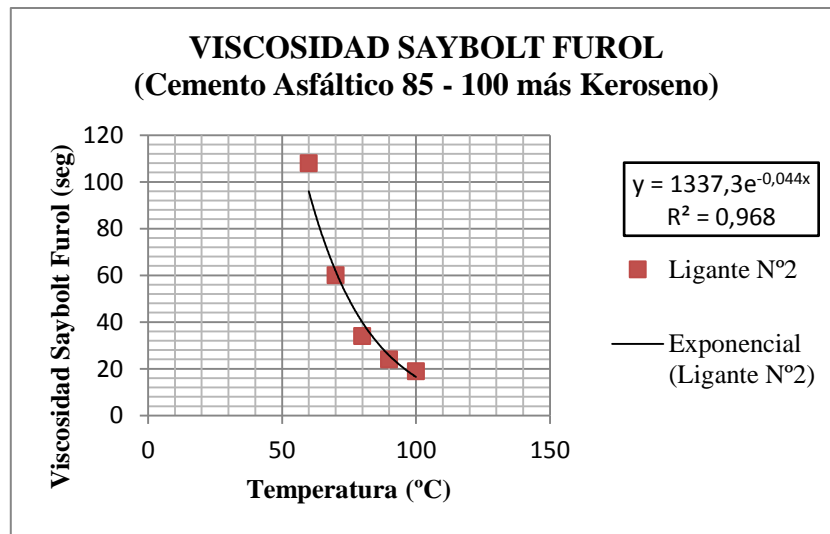
LIGANTE ASFÁLTICO N°2

(CEMENTO ASFALTICO 85 – 100 MAS FLUIDIFICANTE KEROSENO)

1) Tabla de datos del ligante asfáltico N°2.

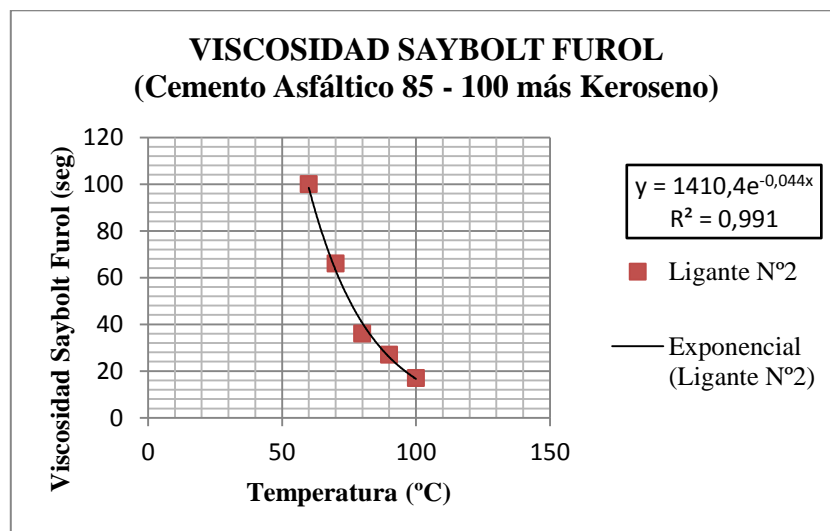
Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ensayo 1	seg.	108	60	34	24	19
Ensayo 2	seg.	100	66	36	27	17
Ensayo 3	seg.	104	63	33	25	19

a) Ensayo 1



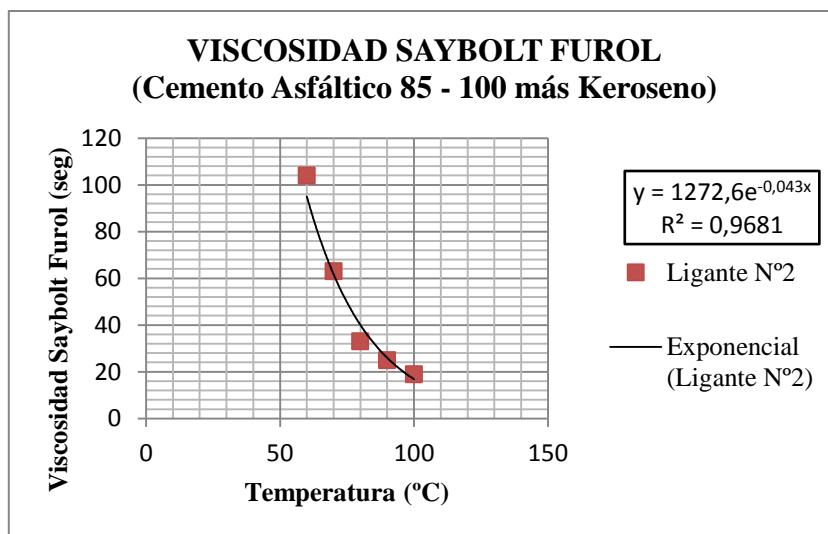
Gráfica N° 7. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°2 (ensayo 1).

b) Ensayo 2



Gráfica N° 8. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°2 (ensayo2).

c) Ensayo 3

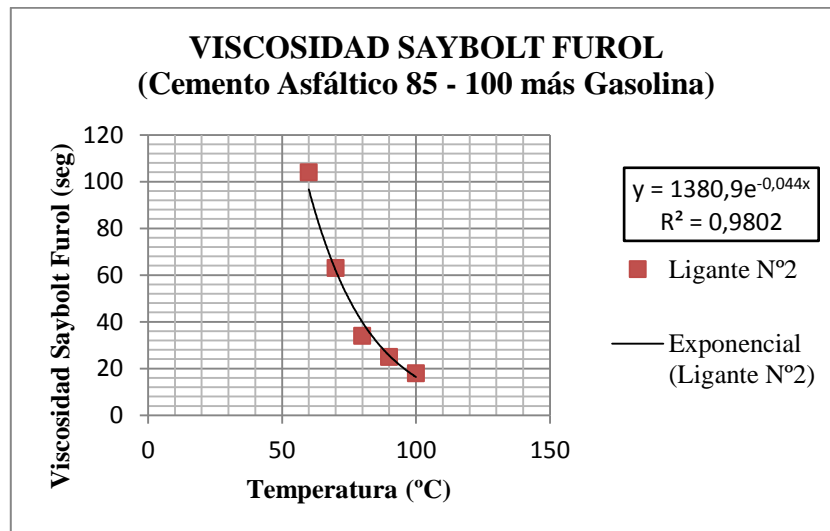


Gráfica N° 9. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°2 (ensaye 3).

En las gráficas de viscosidad vs temperatura de cada ensayo realizado al ligante asfáltico N°2 compuesto de cemento asfáltico 85 – 100 y fluidificante keroseno, se observa en las curvas que describen su comportamiento una variación en la viscosidad en cada incremento de temperatura. Proporcionándonos valores de viscosidad superiores a menor temperatura de ensaye y valores inferiores de viscosidad a mayor temperatura. Los tiempos que se determinaron para cada variación de temperatura son menores a medida que la misma incrementa, existiendo una disminución notoria de la resistencia a fluir del ligante asfáltico N°2.

2) Tabla de resultados promedios del ligante asfáltico N°2.

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Promedio	seg.	104	63	34	25	18

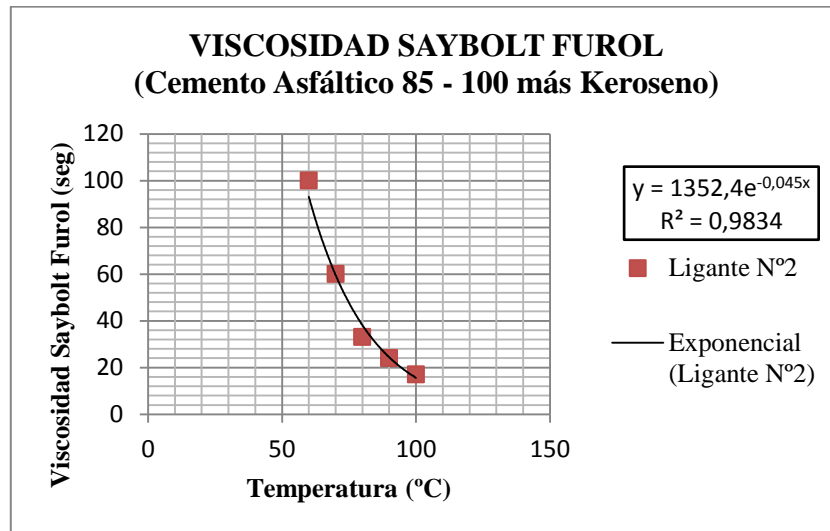


Gráfica N° 10. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°2 (promedio).

En la gráfica de viscosidad vs temperatura de los valores promedios se observa que la curva decrece a medida que aumenta la temperatura. Lo que nos da un comportamiento del ligante que muestra que a temperaturas bajas se tiene mayor viscosidad y a temperaturas altas menor viscosidad. Lo que nos indica que su resistencia a fluir disminuye a partir de cada aumento de temperatura.

3) Tabla de resultados mínimos del ligante asfáltico N°2.

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Mínima	seg.	100	60	33	24	17

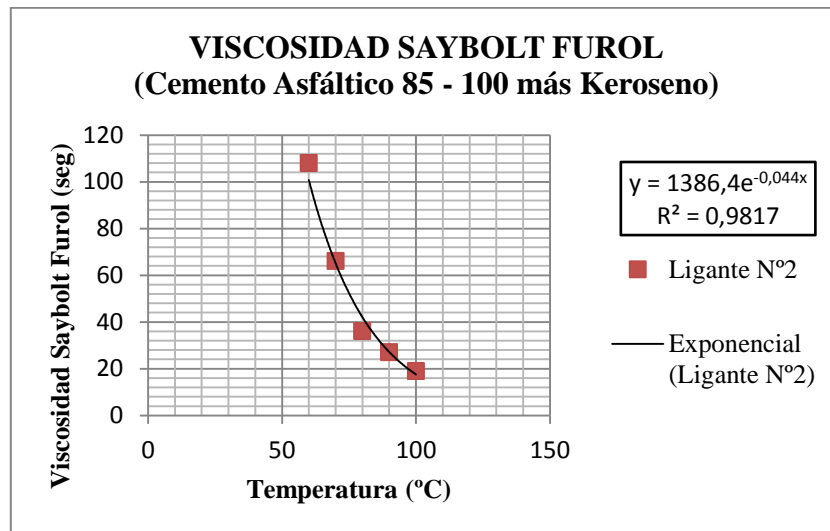


Gráfica N° 11. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°2 (mínima).

En la gráfica conformada por valores mínimos de viscosidad y temperaturas establecidas, se observa en la curva que describe el comportamiento del ligante asfáltico una pequeña disminución de su pendiente respecto a las demás. La curva es descendente a medida que se incrementa la temperatura y está relacionada a la disminución de viscosidad del ligante.

4) Tabla de resultados máximos del ligante asfáltico N°2.

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Máxima	seg.	108	66	36	27	19



Gráfica N° 12. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°2 (máxima).

En la gráfica conformada por valores máximos de viscosidad y temperaturas establecidas de ensaye, se observa en la curva que describe el comportamiento del ligante asfáltico un aumento de su pendiente respecto a las demás.

Debido que para la gráfica se utilizó los valores máximos de viscosidad de cada temperatura de ensayo se observa que la misma va descendiendo a partir de valores un poco superiores. El comportamiento en sí del ligante es descendente a medida que se incrementa la temperatura, sigue existiendo la relación a menor temperatura mayor viscosidad y mayor temperatura menor viscosidad. Los intervalos de tiempo medidos para cada temperatura son cada vez menores demostrando que la resistencia a fluir del líquido es cada vez menor.

3.2.5. Ligante asfáltico N°3 (Cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante diesel)

3.2.5.1. Procesamiento de datos

Con la información recolectada de las pruebas en laboratorio de viscosidad, destilación, penetración y punto de ablandamiento realizadas al ligante asfáltico N°3 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante Diesel se inicia el procesamiento o tratamiento de datos a partir de medidas de tendencia aritmética, máxima y mínimas.

LIGANTE ASFÁLTICO N°3
(CEMENTO ASFÁLTICO 85 – 100 MÁS FLUIDIFICANTE DIESEL)

1) VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

Tabla N° 10. Datos y Resultados obtenidos de la prueba de Viscosidad Saybolt Furol (ligante N°3).

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ensayo 1	seg.	103	65	40	27	21
Ensayo 2	seg.	104	67	43	27	20
Ensayo 3	seg.	102	64	42	25	20
Promedio	seg.	103	65	42	26	20
Mínima	seg.	102	64	40	25	20
Máxima	seg.	104	67	43	27	21

Fuente: Elaboración propia.

2) DESTILACIÓN

Tabla N° 11. Volúmenes de Destilación (ligante N°3).

Temperatura	Destilado
°C	ml
190	0
225	16
260	41
315	68
316	68
360	86
TOTAL	89

Fuente: Elaboración propia.

— **RESIDUO ASFÁLTICO**

$$R = \left[\frac{200 - DT}{200} \right] \times 100$$

Donde:

R=Contenido de residuo (% en volumen).

DT=Destilado total recuperado a 360°C (ml).

$$R = \left[\frac{200 - 89}{200} \right] \times 100$$

$$R = 55,5\%$$

— *DESTILADO TOTAL*

$$DT\% = \left(\frac{DT}{200} \right) \times 100$$

Donde:

DT=Destilado total recuperado a 360°C (ml).

$$DT\% = \left(\frac{89}{200} \right) \times 100$$

$$DT\% = 44,5\%$$

3) PENETRACIÓN

Tabla N° 12. Datos y Resultados de la prueba de Penetración (ligante N°3).

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Temperatura	°C	25	25	25
Carga	grs.	100	100	100
Tiempo	seg.	5	5	5
Ensayo 1	Dmm.	224	226	225
Ensayo 2	Dmm.	227	227	223
Ensayo 3	Dmm.	228	230	229
Promedio	Dmm.	226	228	226
Penetración	Dmm.	227		

Fuente: Elaboración propia.

4) PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Tabla N° 13. Datos y Resultados de la prueba de Punto de Ablandamiento (ligante N°3).

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Temperatura	°C	30	31	31
Ablandamiento	°C	31		

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5.2. Análisis de resultados

VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

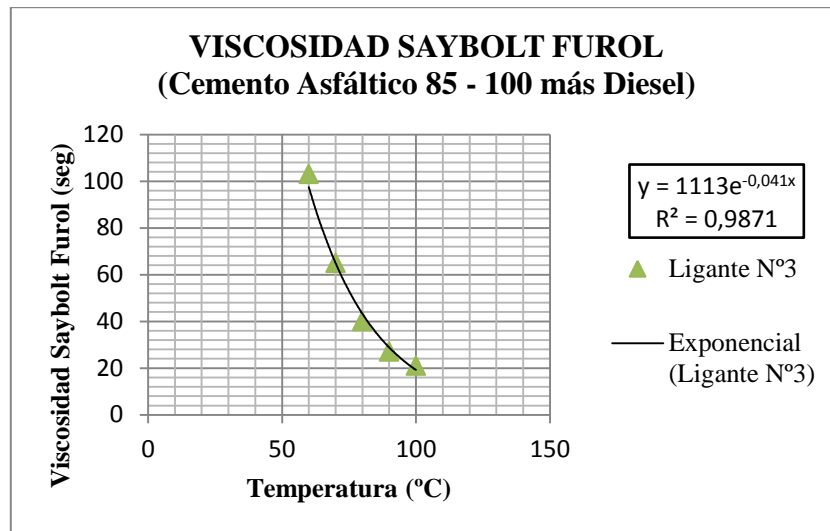
LIGANTE ASFÁLTICO N°3

(CEMENTO ASFÁLTICO 85 – 100 MÁS FLUIDIFICANTE DIESEL)

1) Tabla de datos del ligante asfáltico N°3.

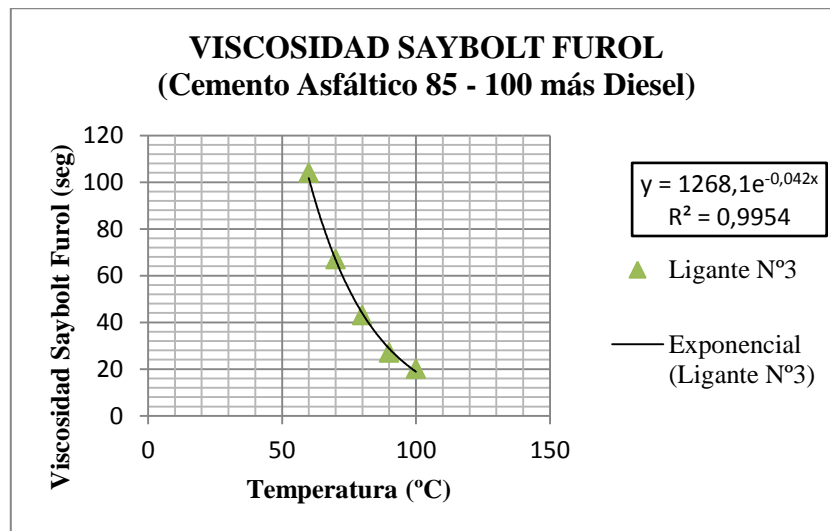
Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ensayo 1	seg.	103	65	40	27	21
Ensayo 2	seg.	104	67	43	27	20
Ensayo 3	seg.	102	64	42	25	20

a) Ensayo 1



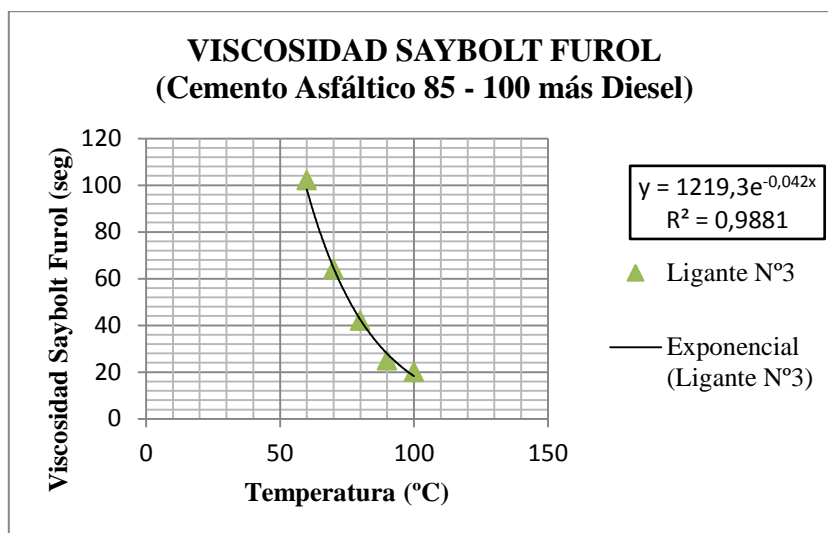
Gráfica N° 13. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°3 (ensayo 1).

b) Ensayo 2



Gráfica N° 14. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°3 (ensayo 2).

c) Ensayo 3

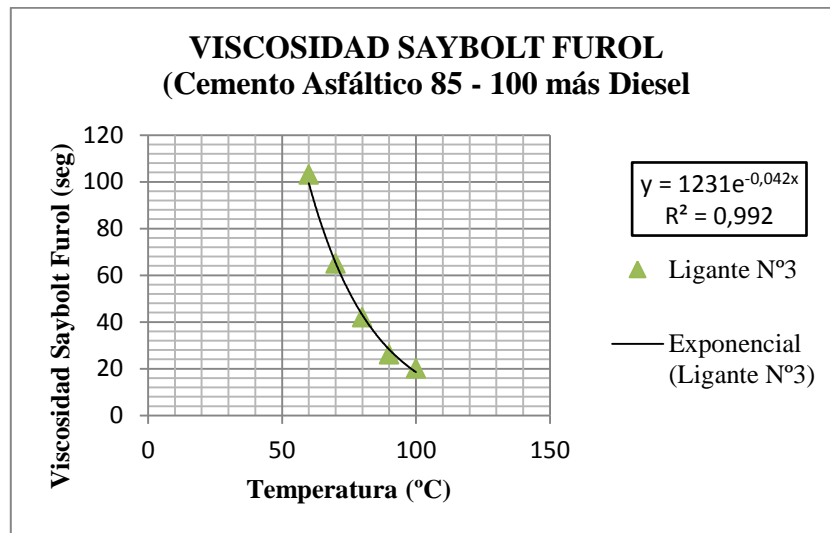


Gráfica N° 15. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°3 (ensaye 3).

En las gráficas de viscosidad vs temperatura de cada ensayo realizado al ligante asfáltico N°3 compuesto de cemento asfáltico 85 – 100 y fluidificante diesel, se observa en las curvas que describen su comportamiento una variación en la viscosidad en cada incremento de temperatura. Proporcionándonos valores de viscosidad superiores a menor temperatura de ensaye y valores inferiores de viscosidad a mayor temperatura. Los tiempos que se determinaron para cada variación de temperatura son menores a medida que la misma incrementa, existiendo una disminución notoria de la resistencia a fluir del ligante asfáltico N°3.

2) Tabla de resultados promedios del ligante asfáltico N°3.

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Promedio	seg.	103	65	42	26	20

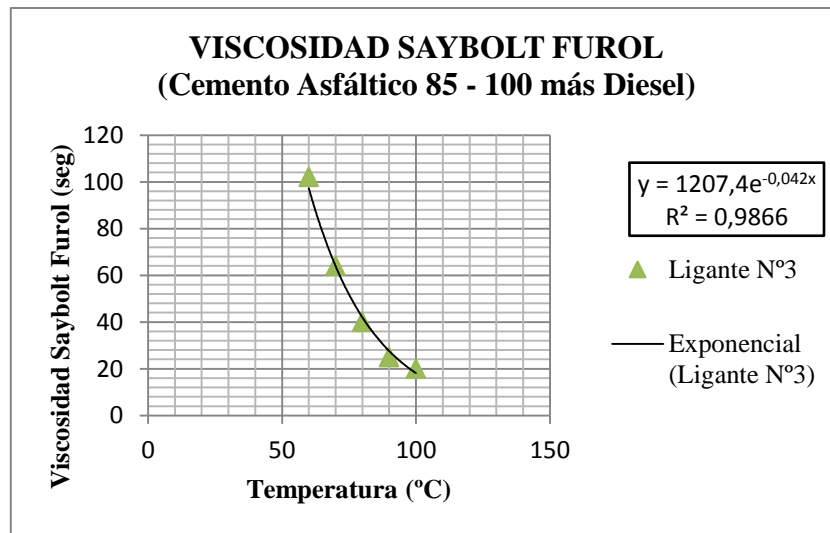


Gráfica N° 16. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°3 (promedio).

En la gráfica de viscosidad vs temperatura de los valores promedios se observa que la curva decrece a medida que aumenta la temperatura. Lo que nos da un comportamiento del ligante que muestra que a temperaturas bajas se tiene mayor viscosidad y a temperaturas altas menor viscosidad. Lo que nos indica que su resistencia a fluir disminuye a partir de cada aumento de temperatura.

3) Tabla de resultados mínimos del ligante asfáltico N°3.

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Mínima	seg.	102	64	40	25	20

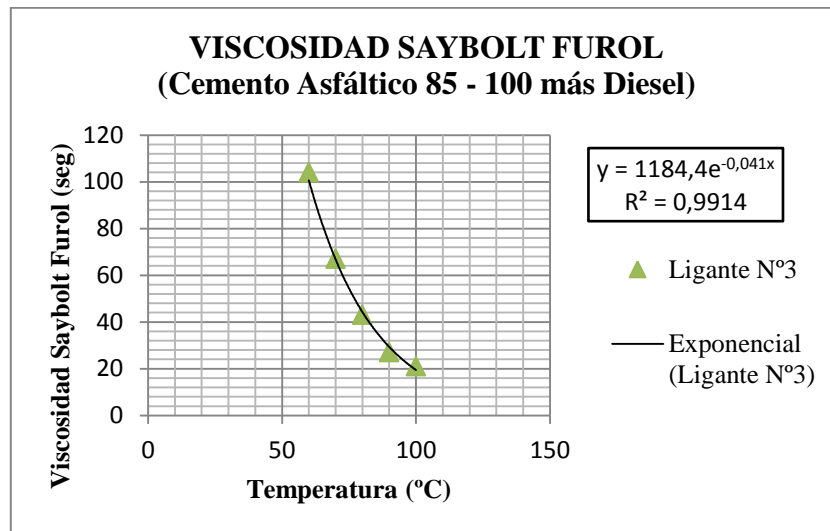


Gráfica N° 17. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°3 (mínima).

En la gráfica conformada por valores mínimos de viscosidad y temperaturas establecidas, se observa en la curva que describe el comportamiento del ligante asfáltico una pequeña disminución de su pendiente respecto a las demás. La curva es descendente a medida que se incrementa la temperatura y está relacionada a la disminución de viscosidad del ligante.

4) Tabla de resultados máximos del ligante asfáltico N°3.

Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Máxima	seg.	104	67	43	27	21



Gráfica N° 18. Relación viscosidad vs temperatura del ligante asfáltico N°2 (máxima).

En la gráfica conformada por valores máximos de viscosidad y temperaturas establecidas de ensaye, se observa en la curva que describe el comportamiento del ligante asfáltico un aumento de su pendiente respecto a las demás.

Debido que para la gráfica se utilizó los valores máximos de viscosidad de cada temperatura de ensayo se observa que la misma va descendiendo a partir de valores un poco superiores. El comportamiento en sí del ligante es descendente a medida que se incrementa la temperatura, sigue existiendo la relación a menor temperatura mayor viscosidad y mayor temperatura menor viscosidad. Los intervalos de tiempo medidos para cada temperatura son cada vez menores demostrando que la resistencia a fluir del líquido es cada vez menor.

3.2.6. Evaluación de ligantes para mezclas de baja temperatura

3.2.6.1. Procesamiento de datos

1) VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

Tabla N° 14. Resultados promedios de la prueba de Viscosidad Saybolt Furol.

Descripción	Unidad	1	2	3	4	5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ligante N°1	seg.	73	46	32	25	15
Ligante N°2	seg.	104	63	34	25	18
Ligante N°3	seg.	103	65	42	26	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 15. Resultados mínimos de la prueba Viscosidad Saybolt Furol.

Descripción	Unidad	1	2	3	4	5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ligante N°1	seg.	71	45	30	23	13
Ligante N°2	seg.	100	60	33	24	17
Ligante N°3	seg.	102	64	40	25	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 16. Resultados máximos de la prueba de Viscosidad Saybolt Furol.

Descripción	Unidad	1	2	3	4	5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ligante N°1	seg.	75	48	34	27	17
Ligante N°2	seg.	108	66	36	27	19
Ligante N°3	seg.	104	67	43	27	21

Fuente: Elaboración propia.

2) PENETRACIÓN

Tabla N° 17. Resultados promedios de la prueba de Penetración.

Descripción	Unidad	Ligante N°1	Ligante N°2	Ligante N°3
Temperatura	°C	25	25	25
Carga	grs.	100	100	100
Tiempo	seg.	5	5	5
Penetración	Dmm.	201	216	227

Fuente: Elaboración propia.

3) PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Tabla N° 18. Resultados promedios de la prueba de Punto de Ablandamiento.

Descripción	Unidad	Ligante N°1	Ligante N°2	Ligante N°3
Ablandamiento	°C	45	40	35

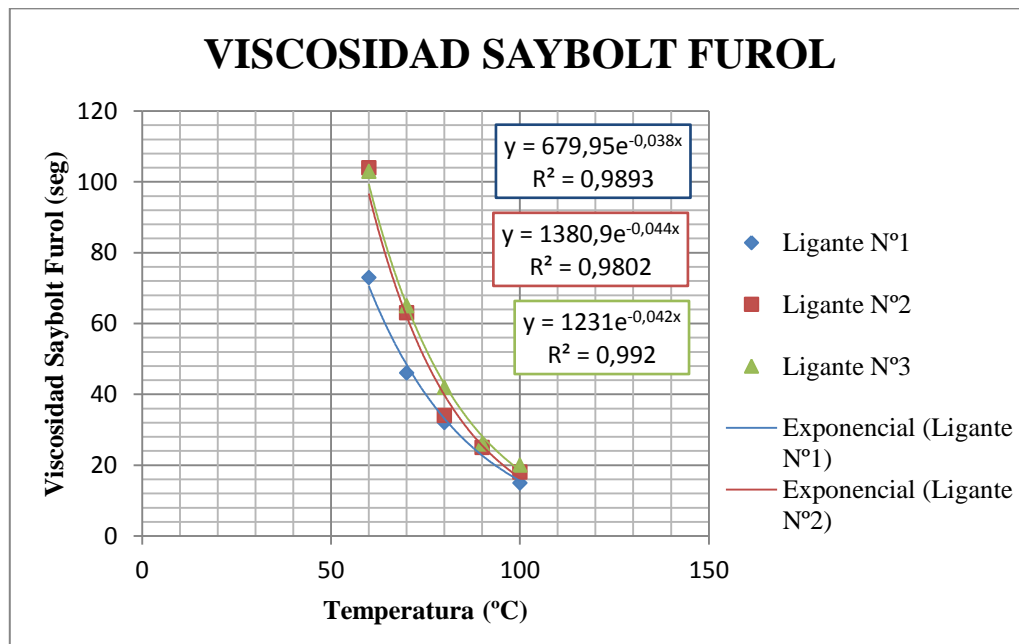
Fuente: Elaboración propia.

3.2.6.2. Análisis de resultados

VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL LIGANTES PARA MEZCLAS DE BAJA TEMPERATURA

1) Tabla de resultados promedios de los ligantes asfálticos.

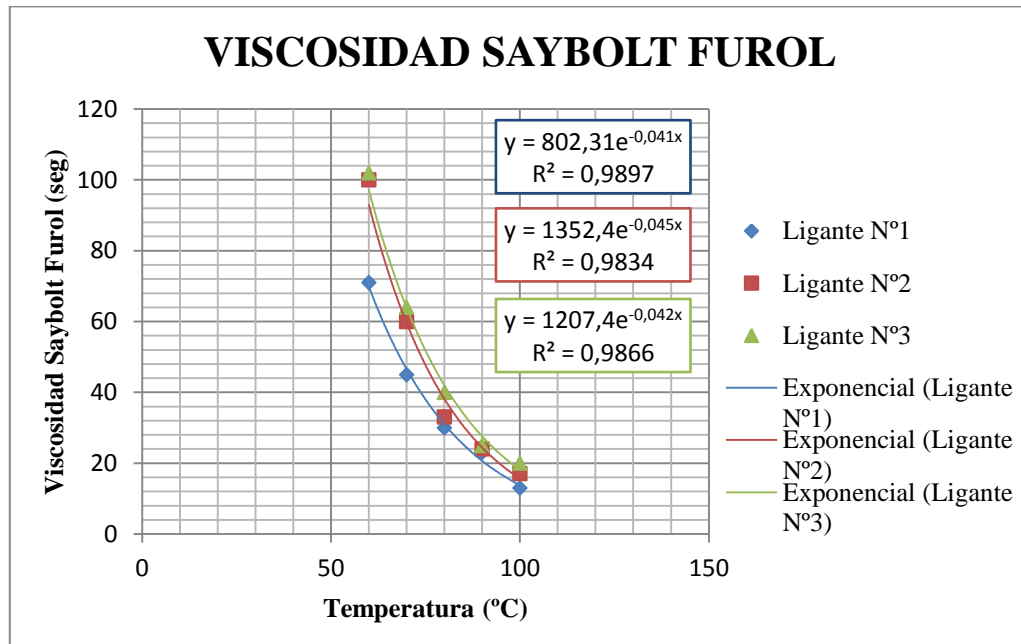
Descripción	Unidad	1	2	3	4	5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ligante N°1	seg.	73	46	32	25	15
Ligante N°2	seg.	104	63	34	25	18
Ligante N°3	seg.	103	65	42	26	20



Gráfica N° 19. Relación viscosidad vs temperatura de los ligantes asfálticos (promedio).

2) Tabla de resultados mínimos de los ligantes asfálticos.

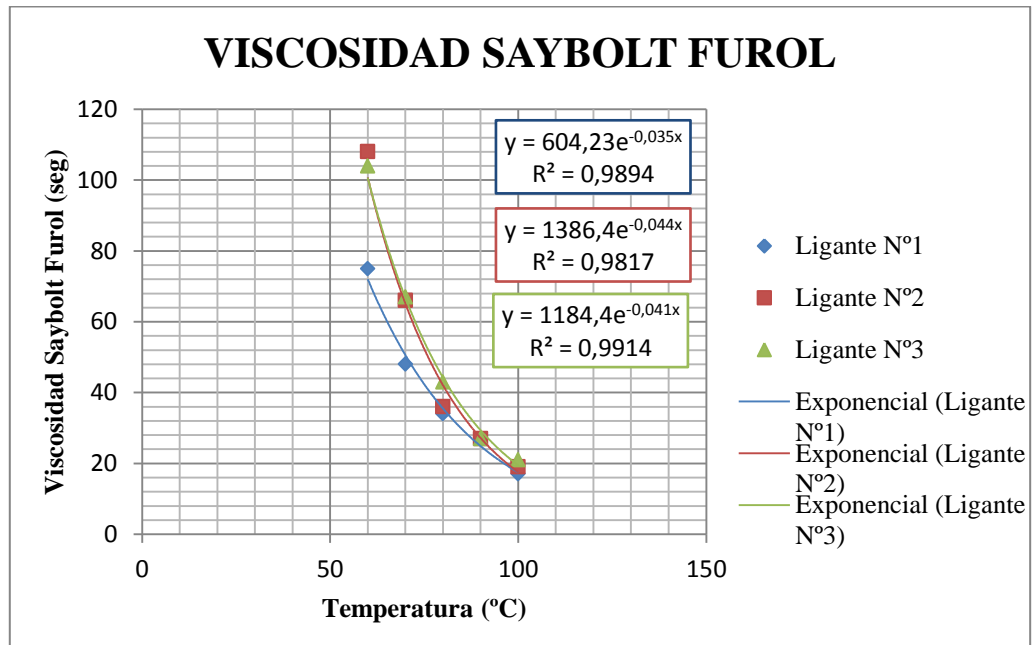
Descripción	Unidad	1	2	3	4	5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ligante N°1	seg.	71	45	30	23	13
Ligante N°2	seg.	100	60	33	24	17
Ligante N°3	seg.	102	64	40	25	20



Gráfica N° 20. Relación viscosidad vs temperatura de los ligantes asfálticos (mínima).

3) Tabla de resultados máximos de los ligantes asfálticos.

Descripción	Unidad	1	2	3	4	5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ligante N°1	seg.	75	48	34	27	17
Ligante N°2	seg.	108	66	36	27	19
Ligante N°3	seg.	104	67	43	27	21



Gráfica Nº 21. Relación viscosidad vs temperatura de los ligantes asfálticos (máxima).

En la gráfica de viscosidad vs temperatura de los ligantes asfálticos formados por cemento asfáltico 85 – 100 y fluidificantes gasolina, keroseno y diesel, se observa que las tres curvas van decreciendo a partir del incremento de la temperatura, es decir, a menor temperatura mayor viscosidad y a mayor temperatura menor viscosidad.

También se indica que la resistencia a fluir de los ligantes asfálticos uno, dos y tres disminuye a medida que incrementa la temperatura de ensaye los que nos da cada vez tiempos menores de viscosidad.

Si realizamos un análisis en conjunto del comportamiento que presentan las curvas de los ligantes asfálticos uno, dos y tres podemos llegar a las siguientes conjeturas:

- Como la curva del ligante asfáltico Nº1 tiene una pendiente e inclinación menor respecto a las demás, decimos que el ligante asfáltico Nº1 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante gasolina cuenta con una menor viscosidad y una mejor fluidez del asfalto.

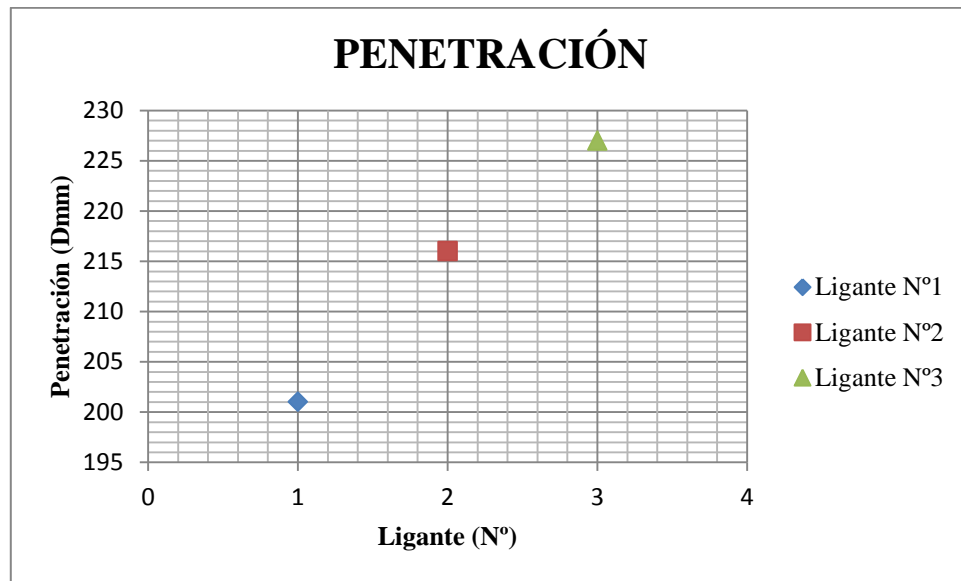
- Las curvas del ligante asfáltico N°2 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante keroseno y ligante asfáltico N°3 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante diesel, tienen un comportamiento similar debido a que las magnitudes de sus viscosidades son en algunos casos las mismas. Podemos concluir que su diferencia respecto a su viscosidad y resistencia a fluir es mínima.
- Debido a que el comportamiento de los ligantes asfálticos N°2 y N°3 son casi iguales podemos decir que cuentan con una viscosidad mayor y una resistencia del asfalto a fluir superior al ligante asfáltico N°1.
- El comportamiento que describe la curva del ligante asfáltico N°1 nos indica que la presencia del fluidificante gasolina lo hace más susceptible a bajas temperaturas, dándonos un asfalto más fluido a menores temperatura en comparación al resto de ligantes.
- Como el comportamiento del ligante asfáltico N°2 y N°3 son similares podemos decir que la propiedades que le otorga sus respectivos fluidificantes keroseno y diesel, hacen que su viscosidad sea mayor al igual que su resistencia a fluir en comparación del ligante asfáltico N°1.

PENETRACIÓN

LIGANTES PARA MEZCLAS DE BAJA TEMPERATURA

1) Tabla de resultados promedios de los ligantes asfálticos.

Descripción	Unidad	Ligante N°1	Ligante N°2	Ligante N°3
Temperatura	°C	25	25	25
Carga	grs.	100	100	100
Tiempo	seg.	5	5	5
Penetración	Dmm.	201	216	227

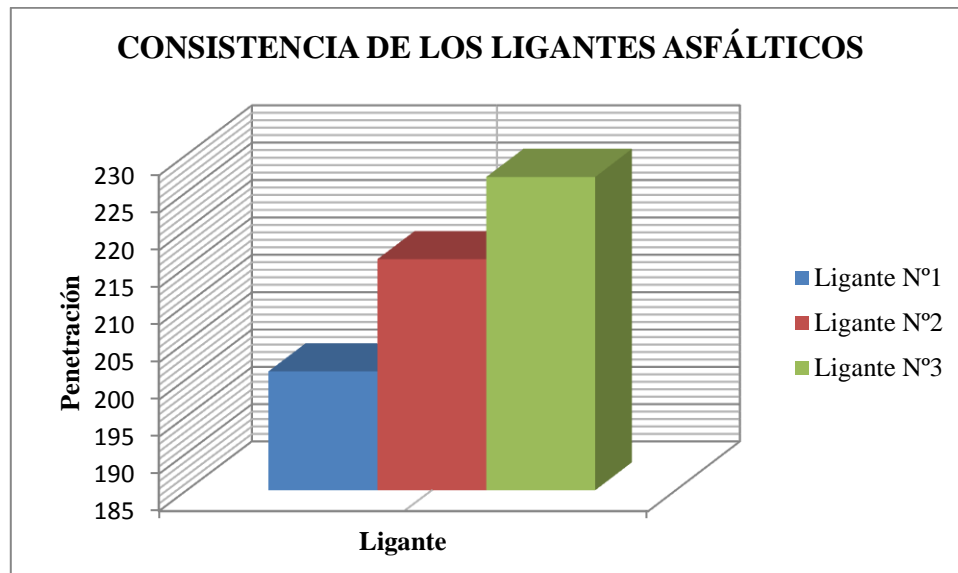


Gráfica N° 22. Relación de penetración vs ligantes (promedio).

En la gráfica de penetración vs ligante se observa que la dureza de los ligantes asfálticos N°1, N°2 y N°3 tienen un ascenso casi lineal.

Se percibe con claridad cómo varía la consistencia de los ligantes asfálticos a partir del tipo de fluidificante añadido. Y se puede llegar a las siguientes afirmaciones:

- 1) Como el ligante asfáltico N°1 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante gasolina tiene un solvente más ligero y que se evapora con mayor rapidez permite que asfalto obtenga una consistencia más dura.
- 2) Para el ligante asfáltico N°2 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante keroseno que cuenta con un solvente de evaporación media se puede percibir una consistencia media del ligante asfáltico N°2 en estudio.
- 3) El ligante asfáltico N°3 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante diesel es aquél que presenta la consistencia más blanda de los tres ligantes estudiados y esto se debe a que el mismo cuenta con un solvente más pesado que le otorga una consistencia blanda durante mayor tiempo.
- 4) Si realizamos un análisis del comportamiento de los tres ligantes en conjunto podemos decir que según el tipo de disolvente y sus características de volatilidad, se ven afectadas las características del ligante.



Gráfica N° 23. Gráfica de barras de la consistencia de los ligantes asfálticos.

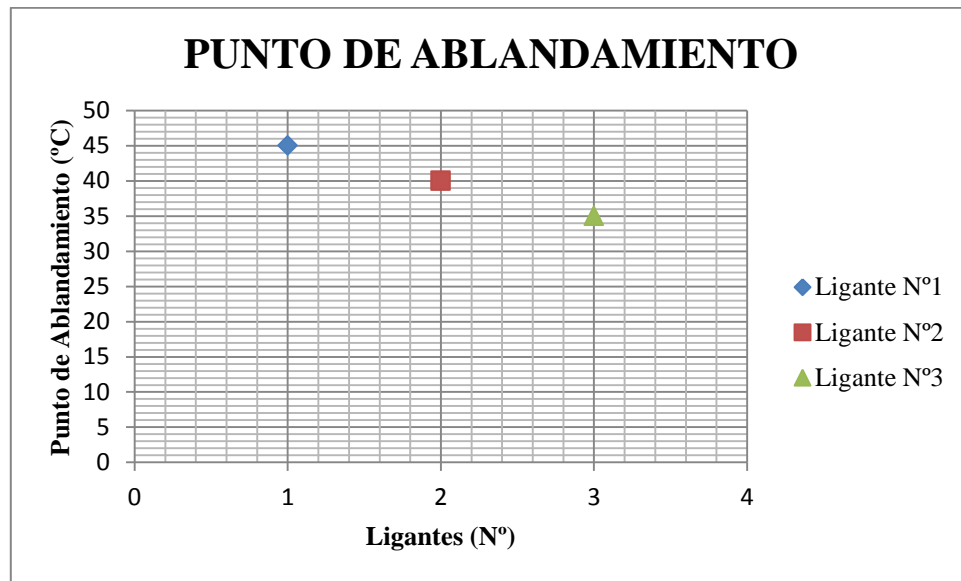
En la siguiente gráfica de barras de los ligantes asfálticos N°1, N°2 y N°3 se denota un aumento gradual de la consistencia de cada ligante que va de forma creciente desde una consistencia dura a una más blanda. Lo cual se adjudica al tipo de solvente utilizado para fluidificar.

PUNTO DE ABLANDAMIENTO

LIGANTES PARA MEZCLAS DE BAJA TEMPERATURA

1) Tabla de resultados promedios de los ligantes asfálticos.

Descripción	Unidad	Ligante N°1	Ligante N°2	Ligante N°3
Ablandamiento	°C	45	40	35



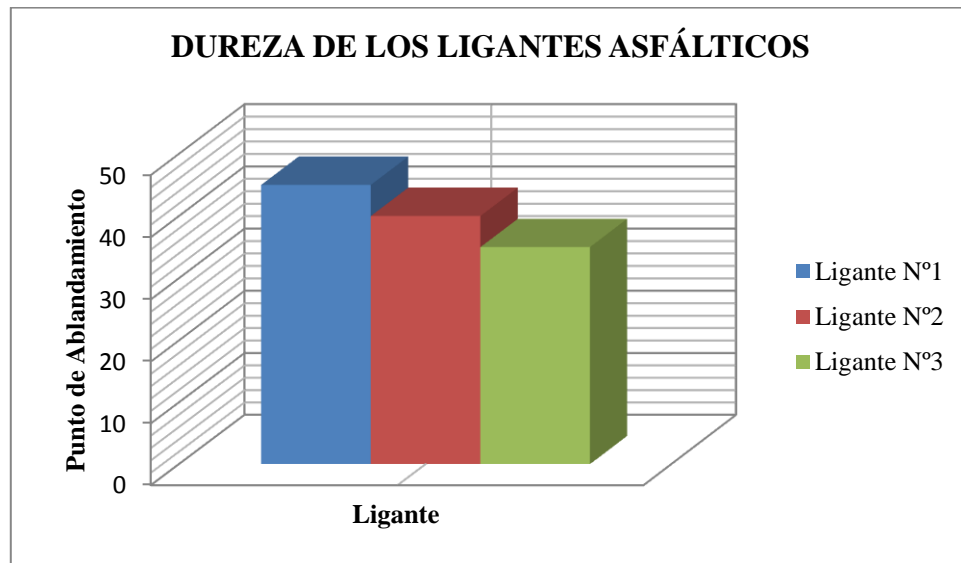
Gráfica N° 24. Relación punto de ablandamiento vs ligantes.

En la gráfica de punto de ablandamiento vs ligante se observa que el reblandecimiento de los ligantes asfálticos N°1, N°2 y N°3 tienen un decrecimiento casi lineal.

Se percibe con claridad cómo varía la dureza según el tipo de ligante. Llegando a las siguientes afirmaciones:

- 1) Debido que el ligante asfáltico N°1 (cemento asfáltico 85 - 100 más fluidificante gasolina) que cuenta con un solvente liviano y de fácil evaporación presenta una dureza notable respecto a los demás ligantes podemos decir que el punto o temperatura reblandecimiento será superior respecto a la de los demás ligantes.
- 2) Para el ligante asfáltico N°2 (cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante keroseno) que cuenta con un solvente de evaporación media, se percibe un punto de ablandamiento medio.
- 3) El ligante asfáltico N°3 (cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante diesel) es aquél que presenta el punto de reblandecimiento más blando de los tres ligantes estudiados y esto se debe a que el mismo cuenta con un solvente más pesado que le otorga una dureza inferior a la de los demás ligantes.

- 4) Si realizamos un análisis del comportamiento de los tres ligantes en conjunto podemos decir que según el tipo de disolvente y sus características de volatilidad, son afectadas las características del ligante.



Gráfica N° 25. Gráfica de barras de la dureza de los ligantes asfálticos.

En la siguiente gráfica de barras de los ligantes asfálticos N°1, N°2 y N°3 se denota una disminución gradual del punto de reblandecimiento de cada ligante que va de forma descendente desde una temperatura de reblandecimiento más dura a una blanda. Lo cual se adjudica al tipo de solvente utilizado para fluidificar.

3.2.6.3. Cuadro comparativo de asfaltos en caliente y de baja temperatura

Características	Unidad	Asfalto en caliente	Asfalto de baja temperatura		
			Ligante N°1	Ligante N°2	Ligante N°3
PENETRACIÓN					
Penetración (100gr, 5s, 25°C)	Dmm	85-100	201	216	227
VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL					
a 60°C	s	-	73	104	103
a 70°C	s	-	46	63	65
a 80°C	s	-	32	34	42
a 90°C	s	-	25	25	26
a 100°C	s	-	15	18	20
a 135°C	s	85	-	-	-
PUNTO DE ABLANDAMIENTO					
Punto de Ablandamiento	°C	43-53	40	35	31

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se desarrolló un marco teórico sólido a partir de la consulta bibliográfica realizada a libros enfocados a las vías de comunicación, a trabajos realizados en otras universidades internacionales, publicaciones, etc; todas relacionadas con el tema en estudio. Que permita la evaluación de los ligantes de uso más frecuente en nuestra región con el fin de ser empleados en mezclas de baja temperatura.
- El método que se utilizó para determinar las muestras con las que se desarrollará el trabajo de investigación, es el no probabilístico debido que todos los elementos de una población no tienen las mismas posibilidades de ser escogidos para el estudio. Por tanto la muestras estarán dadas de la siguiente manera:
 - *Ligante 1 (cemento asfáltico 85-100 + fluidificante gasolina).*
 - *Ligante 2 (cemento asfáltico 85-100 + fluidificante keroseno).*
 - *Ligante 3 (cemento asfáltico 85-100 + fluidificante diesel).*
- La caracterización del cemento asfáltico 85 – 100 llevada a cabo en los laboratorios de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (U.A.J.M.S.) y el Servicio Departamental de Caminos (SEDECA), nos proporcionó resultados de penetración, viscosidad, punto de ablandamiento y ductilidad acorde a las especificaciones; confirmándose la buena calidad del cemento.

Tabla N° 1. Resultados obtenidos de la caracterización del cemento asfáltico 85 – 100.

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones		AASHTO
			Mínimo	Máximo	ASTM
Peso específico	gr/cm ³	-	1,000	1,005	T - 228
					D - 70
Punto de inflamación	° C	-	> 232		T - 48
					D - 92
Penetración a 25°C, 100 grs, 5 seg	Dmm.	87	85	100	T - 49
					D - 5
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	seg.	104	85		T - 72
Punto de ablandamiento	° C	45	43	53	T - 53
					D - 3695
Ductilidad	cm	137	100		T - 51
					D - 113

Fuente: Elaboración propia.

- Con los ligantes asfálticos uno, dos y tres formados en laboratorio se procedió a estimar las variaciones en su comportamiento en condiciones de baja temperatura a través de ensayos físicos realizados en laboratorio de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento, dándonos resultados distintos para cada ligante y temperatura de ensaye, con lo cual se ve de manifiesto un distinto comportamiento según la variación de temperatura.

Tabla N° 2. Resultados promedios de la prueba de Penetración.

Descripción	Unidad	Ligante N°1	Ligante N°2	Ligante N°3
Temperatura	°C	25	25	25
Carga	grs.	100	100	100
Tiempo	seg.	5	5	5
Penetración	Dmm.	201	216	227

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3. Resultados promedios de la prueba de Viscosidad Saybolt Furol.

Descripción	Unidad	1	2	3	4	5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ligante N°1	seg.	73	46	32	25	15
Ligante N°2	seg.	104	63	34	25	18
Ligante N°3	seg.	103	65	42	26	20

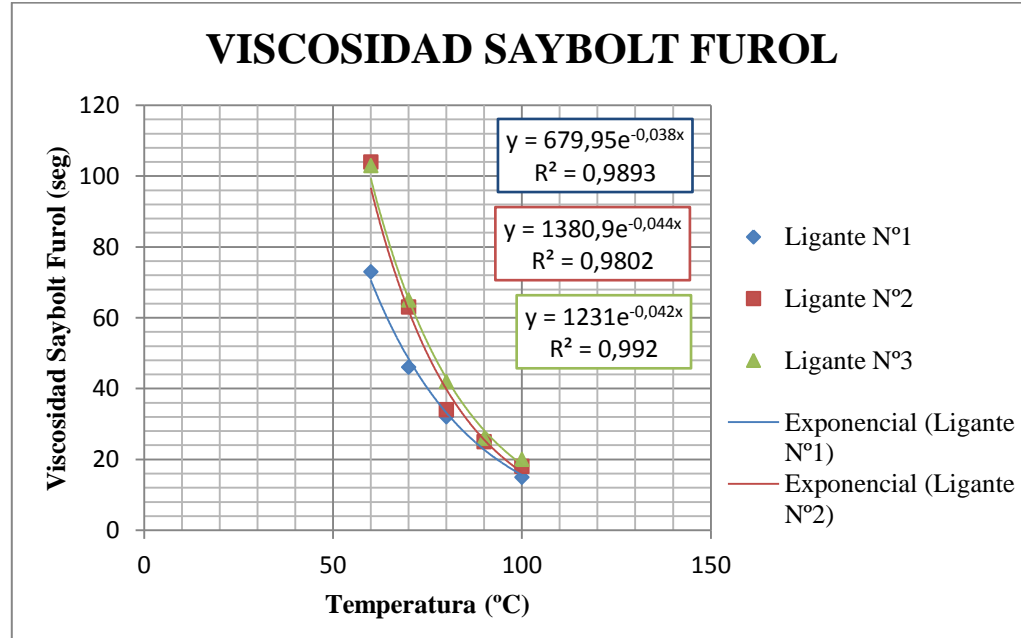
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4. Resultados promedios de la prueba de Punto de Ablandamiento.

Descripción	Unidad	Ligante N°1	Ligante N°2	Ligante N°3
Ablandamiento	°C	45	40	35

Fuente: Elaboración propia.

- Con los datos obtenidos de las pruebas de viscosidad ejecutada en condiciones de baja temperatura de los ligantes asfálticos N°1, N°2 y N°3, se puede realizar el siguiente análisis de resultados de la siguiente gráfica:



Gráfica N° 1. Relación viscosidad vs temperatura de los ligantes asfálticos (promedio).

- 1) Las curvas de los ligantes N°1, N°2 y N°3 respectivamente tiene un comportamiento decreciente, debido que a menores temperaturas presentan valores de viscosidades mayores y a mayores temperaturas menores valores de viscosidad. Estas características que describen los ligantes se le conoce como susceptibilidad a la temperatura o susceptibilidad térmica.

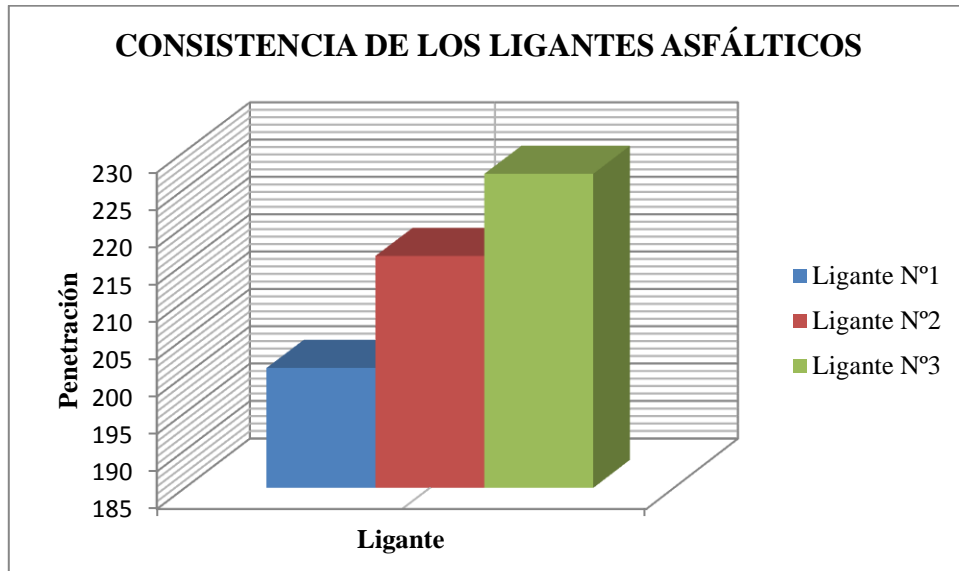
Tabla N° 5. Resultados promedios de la prueba de Viscosidad Saybolt Furol.

Descripción	Unidad	1	2	3	4	5
Temperatura	°C	60	70	80	90	100
Ligante N°1	seg.	73	46	32	25	15
Ligante N°2	seg.	104	63	34	25	18
Ligante N°3	seg.	103	65	42	26	20

Fuente: Elaboración propia.

- 2) En las curvas de los ligantes asfálticos uno, dos y tres se percibe que a medida que incrementa la temperatura de ensaye los tiempos de las viscosidades medidos son cada vez menores, lo que evidencia una disminución de su resistencia a fluir característico de fluidos viscosos.
- 3) En la gráfica de viscosidad vs temperatura de los ligantes estudiados se observa que el ligante asfáltico N°1 presenta una mayor susceptibilidad térmica respecto al ligante asfáltico N°2 y el ligante asfáltico N°3 en condiciones de baja temperatura. y esto se debe a que la curva del ligante asfáltico N°1 presenta una menor pendiente, valores de viscosidades inferiores lo que nos da a su vez una mayor fluidez del asfalto.
- 4) En la gráfica de resultados se observa que las curvas de los ligantes asfálticos N°2 y N°3 describen el mismo comportamiento y esto se debe a que algunos de sus valores de viscosidad son coincidentes dándonos un comportamiento similar. Llegando a concluir que la susceptibilidad térmica de los ligantes asfálticos dos y tres es menor en condiciones de baja temperatura con una menor fluidez del asfalto.

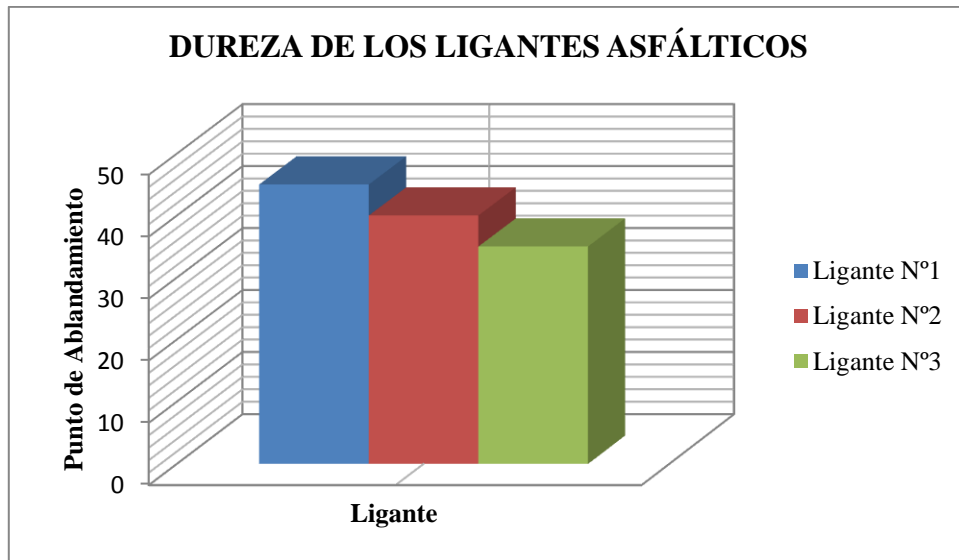
- En la gráfica de penetración vs ligante se observa que la dureza de los ligantes asfálticos tienen un ascenso casi lineal. Llegando a las siguientes afirmaciones:



Gráfica N° 2. Gráfica de barras de la consistencia de los ligantes asfálticos.

- 1) Como el ligante asfáltico N°1 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante gasolina tiene un solvente más ligero y que se evapora con mayor rapidez permite que asfalto obtenga una consistencia más dura.
- 2) Para el ligante asfáltico N°2 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante keroseno que cuenta con un solvente de evaporación media se puede percibir una consistencia media del ligante asfáltico N°2 en estudio.
- 3) El ligante asfáltico N°3 formado de cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante diesel es aquél que presenta la consistencia más blanda de los tres ligantes estudiados y esto se debe a que el mismo cuenta con un solvente más pesado que le otorga una consistencia blanda durante mayor tiempo.
- 4) Si realizamos un análisis del comportamiento de los tres ligantes en conjunto podemos decir que según las características de volatilidad del fluidificante, se ven afectadas las características de dureza del ligante asfáltico.

- En la gráfica de punto de ablandamiento vs ligante se observa que el reblandecimiento de los ligantes asfálticos N°1, N°2 y N°3 tienen un decrecimiento casi lineal. Llegando a las siguientes afirmaciones:



Gráfica N° 3. Gráfica de barras de la dureza de los ligantes asfálticos.

- 1) Debido que el ligante asfáltico N°1 (cemento asfáltico 85 - 100 más fluidificante gasolina) que cuenta con un solvente liviano y de fácil evaporación presenta una dureza notable respecto a los demás ligantes, podemos decir que el punto o temperatura reblandecimiento será superior respecto a la de los demás ligantes.
- 2) Para el ligante asfáltico N°2 (cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante keroseno) que cuenta con un solvente de evaporación media, se percibe un punto de ablandamiento medio.
- 3) El ligante asfáltico N°3 (cemento asfáltico 85 – 100 más fluidificante diesel) es aquél que presenta el punto de reblandecimiento más blando de los tres ligantes estudiados y esto se debe a que el mismo cuenta con un solvente más pesado que le otorga una dureza inferior a la de los demás ligantes.

- 4) Si realizamos un análisis del comportamiento de los tres ligantes en conjunto podemos decir que según el tipo de fluidificante y sus características de volatilidad, se ven afectadas las características del ligante.

4.2. Recomendaciones

- Verificar que toda la información recopilada de la problemática a estudiar sea confiable, permitiendo de esta manera tener aseveraciones más fidedignas.
- Se debe contar con un conocimiento claro del procedimiento en laboratorio de las pruebas necesarias para el desarrollo de la investigación, para obtener datos precisos de la variación en su comportamiento según las condiciones de ensaye especificadas.
- En la elaboración de los ligantes asfálticos formados de cemento asfáltico 85 – 100 y fluidificante gasolina, keroseno y diesel en laboratorio, se recomienda evitar sobrecalentamientos en la muestra asfáltica para que al momento de ser mezclado con el fluidificante no exista una pérdida excesiva de solvente, para evitar este fenómeno se contará con recipientes cerrados para el enfriamiento de la muestra a temperatura ambiente.
- Para la elaboración de los ligantes asfálticos se debe tomar en cuenta las siguientes medidas de seguridad: el mezclado debe realizarse en un lugar apartado del fuego debido a que se está trabajando con solventes altamente inflamables, contar con extinguidores para sofocar un posible incendio, guantes de cuero para el manipuleo de las muestras calientes, etc. Todo esto con la finalidad de resguardar la integridad física del laboratorista.
- Es necesario que para cada temperatura de ensaye se tenga buena precisión del laboratorista para que los resultados sean lo más fidedignos al comportamiento que pueda presentar el ligante.
- Al momento de procesamiento de datos se debe mantener un orden secuencial para la mejor comprensión de los datos obtenidos en laboratorio.
- En la realización de las gráficas de resultados se recomienda ajustar los valores a una línea de tendencia en la que se ajuste mejor los datos, lo cual nos

permitirá tener una mejor valoración de los resultados para llegar a las conclusiones más pertinentes respecto al trabajo investigativo.