

## **1.1.INTRODUCCIÓN**

La calidad de una carretera depende del diseño estructural, de los procesos constructivos y de los materiales que son empleados para su construcción estos tres factores son de suma importancia, pero la calidad de los componentes de la mezcla son factores preponderantes al momento de realizar el control de calidad, se debe tener mucho cuidado en este aspecto ya que de los mismos depende la calidad y durabilidad de las vías.

El deterioro de un pavimento es un proceso que comienza durante la elaboración de la mezcla en planta y progresivamente durante todo el proceso de construcción. Durante la etapa de servicio el deterioro continuo a tasas significativamente menores siendo el tráfico y los factores climáticos las causas del deterioro. Sin embargo, la tasa y tipo de deterioro que experimente un pavimento dependen de la intensidad en que se manifiestan esas solicitaciones y de algunos otros factores de proyecto, entre cuales los más importantes son: calidad del diseño de la mezcla original, calidad de los materiales y especificaciones técnicas, calidad del proceso constructivo y calidad del control del proceso.

En algunos proyectos, se ha observado un deterioro prematuro o acelerado de las carpetas construidas con mezclas asfálticas en caliente. Entre las causas posibles de tal situación, se asocia al manejo térmico inapropiado del cemento asfáltico, al someterlo a excesivo de calentamiento durante la etapa de producción en las plantas asfálticas. En otros casos, los problemas se originan por la baja calidad de los materiales utilizados, también es usual que el origen de las fallas está relacionado directamente con la capa de rodadura, debido a que los materiales utilizados para producir la mezcla asfáltica en caliente han sido manejados de manera inapropiada, en otros casos el proceso de producción de la mezcla se ha llevado a cabo a temperaturas o períodos de mezclado mayores a los especificados o también debido a deficiencias en el proceso constructivo.

La ocurrencia de alguna de estas situaciones o la combinación de las mismas, afecta negativamente al comportamiento de la mezcla asfáltica, que originan un envejecimiento prematuro de la carpeta y por consiguiente se reduce la vida útil de la vía.

Se ha observado que en algunas plantas asfálticas, el asfalto es sometido a ciclos de calentamiento-enfriamiento durante la etapa de almacenamiento, sin atender a sus características y procedencia. Por otra parte la provisión de áridos pétreos no incluye controles sistemáticos en cuanto a posibles contaminantes que alteren las propiedades del ligante en la etapa de elaboración de la mezcla.

En vista de lo anterior, el presente Trabajo de investigación, se ha enfocado hacia la investigación si afecta o no los ciclos de calentamiento-enfriamiento del cemento asfáltico en las propiedades del mismo, determinando si existe incidencia de las propiedades del asfalto en el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente. Los materiales considerados son cementos asfálticos CA 85-100 y áridos procedentes ambos de la Alcaldía Municipal ubicada en la comunidad de “la Pintada”.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN.**

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

En nuestro país y en particular en la ciudad de Tarija, no existe una noción clara o una norma en la cual basarse para el correcto manejo del cemento asfáltico en la producción de mezclas asfálticas, ya que un mal manejo del mismo puede causar diferentes tipos de fallas, menor durabilidad, incomodidad al usuario, más mantenimiento y mayor costo de las obras. Al analizar el efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, se contribuirá con un aporte para orientar a estudiantes, docentes y a personas que se desempeñan en el área de diseño y construcción de carreteras de pavimentos flexibles, en lo fundamental y

básico que respecta a esta área de la ingeniería, determinando si afecta el recalentamiento del asfalto en la vida útil de la carpeta asfáltica.

### **1.3. DISEÑO TEÓRICO**

#### **1.3.1. Determinación del Problema**

##### **1.3.1.1. Situación problemática**

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la meteorología, estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que la carpeta asfáltica sufra un proceso progresivo de deterioro, haciendo que muchas veces estas no cumplan con la vida útil para la cual fueron diseñadas, presentando diferentes tipos de fallas tempranas ocasionando disminución paulatina de los niveles de seguridad, comodidad y confort del tráfico.

A este se suma el manejo inapropiado del asfalto que es de operatividad, cuya problemática también se ve reflejada en el deterioro de las carpetas asfálticas.

El envejecimiento del cemento asfáltico altera de forma significativa sus propiedades reológicas (viscosidad, peso específico, punto de ablandamiento, penetración, ductilidad, punto de inflamación) y como consecuencia de ello, la respuesta del pavimento frente a las sollicitaciones. Este se produce en dos fases o etapas claramente distinguibles en cuanto a la magnitud y velocidad de los cambios que se manifiestan en sus propiedades físicas y químicas. La primera de ellas corresponde a cambios que se generan en el proceso de construcción, y la segunda a cambios físico-químicos que se producen en la vida de servicio.

En el proceso de construcción siempre se generaran problemas inevitables es el caso del envejecimiento de un asfalto, que ocurre primordialmente por dos factores principales, la pérdida de volátiles y la oxidación.

Existen durante la manipulación del asfalto varios procesos que promueven estas condiciones, muchas veces por falta de control o por problemas secundarios, el cemento asfáltico se ve sometido a ciclos de calentamiento y enfriamiento, calentamientos excesivos y calentamientos a temperaturas mayores a las especificadas

en norma, situaciones que se dan en las plantas de elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

Por esta razón, considerar las propiedades del cemento asfáltico en diferentes instancias de la producción de mezcla asfáltica, permitirá observar cuáles serán los cambios en la composición.

Este trabajo de investigación nace del interés de averiguar qué es lo que pasa cuando se usa un asfalto recalentado para una mezcla asfáltica en caliente. Que muchas veces se genera en nuestro medio, usando asfalto recalentado debido a la presencia de problemas como ser lluvias, cortes de energía eléctrica, mal estado de la maquinaria, etc. que obligan a parar con el trabajo de la obra en construcción por horas, días, o semanas y por ende el asfalto se enfría bajando de temperatura y entrando en contacto con el aire, para volver a reanudar el trabajo este asfalto es recalentado y usado en la producción de la mezcla asfáltica en caliente.

#### **1.3.1.2. Problema**

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

**¿CUÁL SERÁ EL EFECTO DEL RECALENTAMIENTO DEL CEMENTO ASFÁLTICO SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE?**

#### **1.3.2. Objetivos**

##### **1.3.2.1. Objetivo general**

Realizar la simulación del envejecimiento del cemento asfáltico, mediante la implementación de ciclos de calentamiento y enfriamiento, de tal manera se pueda

elaborar especímenes que se sometan a pruebas de estabilidad, fluencia con la finalidad de analizar su comportamiento.

#### **1.3.2.2. Objetivos específicos.**

- Realizar los ensayos de laboratorio tanto al cemento asfáltico como al agregado grueso y fino para garantizar la calidad de los materiales usados.
- Establecer mediante el ensayo de Marshall el contenido óptimo de asfalto en base del mismo se trabajara con los ciclos de calentamiento y enfriamiento del asfalto.
- Realizar los recalentamientos a dos temperaturas 150 y 180°C en función del tiempo y determinar las propiedades del asfalto después de cada recalentamiento, para posteriormente confeccionar briquetas con asfalto recalentado.
- Efectuar un análisis y una comparación entre las propiedades del cemento asfáltico normal y el asfalto recalentado, observar si cambian, si disminuyen o aumentan, es decir conocer cuál de ellas es más susceptible a este fenómeno y como afecta esto en el comportamiento de las mezclas asfálticas.
- Con resultados obtenidos elaborar conclusiones y recomendaciones sobre el trabajo realizado.

#### **1.3.3. Hipótesis.**

Si se experimenta en cementos asfálticos variaciones de temperaturas y ciclos de recalentamiento en tiempos determinados, entonces se podrá elaborar briquetas y someterlas a ensayos de estabilidad, fluencia para analizar el comportamiento de sus propiedades y su potencial aplicabilidad a las obras civiles.

#### **1.3.4. Definición de Variables Independientes y Dependientes**

##### **1.3.4.1. Variable Independiente**

- Temperatura
- Tiempos de cada ciclo

#### **1.3.4.2. Variable Dependiente**

Son los cambios que presentaran las propiedades del cemento asfaltico como ser: Penetración, Ductilidad, Viscosidad, Peso específico, Punto de ablandamiento, Punto de inflación y el comportamiento de las propiedades de las mezclas asfálticas, la estabilidad, la fluencia y el porcentaje de vacíos.

#### **1.3.4.3. Unidad de Observación (UO):**

La resistencia técnica de las briquetas frente al uso de cemento asfáltico recalentado.

### **1.4.DISEÑO METODOLÓGICO**

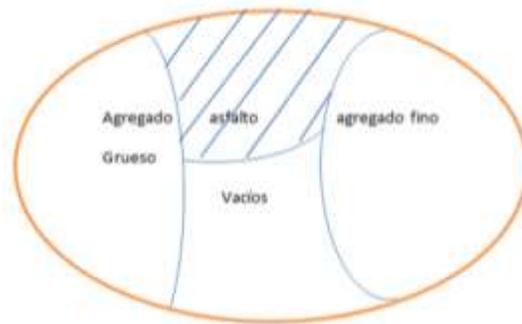
#### **1.4.1. Unidad de Estudio y Decisión Muestral**

##### **1.4.1.1.Unidad de estudio**

La unidad de estudio en este trabajo de investigación es “la incidencia del asfalto recalentado sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas en los pavimentos flexibles” por qué se analizará cómo afecta el recalentamiento del cemento asfáltico, tanto en sus propiedades como al comportamiento de las mezclas asfálticas y cómo influye esto en la durabilidad de los pavimentos flexibles.

##### **1.4.1.2. Población**

La población usada dentro de la unidad de estudio es la mezcla asfáltica, es decir será todos los elementos que lo componen, es decir el agregado grueso, agregado fino, el cemento asfaltico y vacíos existentes.



### 1.4.1.3. Muestra

Será el cemento asfáltico o asfalto el mismo que será manipulado como asfalto normal y como asfalto recalentado. Utilizados ambos para hacer especímenes de mezcla asfáltica y ver su comportamiento de las mismas debido al efecto del recalentamiento.

### 1.4.1.4. Muestreo

Para la obtención de cemento asfáltico realizara un muestreo no probabilístico debido a que sólo se tomará en cuenta la muestra que en este caso será sólo el asfalto utilizado en nuestro medio C.A 85-100 con el que se trabajará para hacer los ensayos de laboratorio y obtener datos. Dentro del muestreo no probabilístico se usará el muestreo aleatorio simple lo que quiere decir es que de la población "N" se tomara una muestra "n"

## 1.4.2. Métodos y Técnicas Empleadas

### 1.4.2.1. Experimentales

La realización del siguiente trabajo de investigación se plantea como:

Experimental; puesto que se realizan netamente ensayos de laboratorio para caracterizar y lograr valorar el efecto del cemento asfáltico recalentado en el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.

### 1.4.2.2. Experimento

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

- Ensayo para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T 51)
- Ensayo de penetración (ASTM D 5 AASHTO T 49)
- Ensayo para determinar la densidad (ASTM D 71 AASHTO T229)
- Ensayo para determinar el punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310 AASHTO T 79)
- Ensayo para determinar la viscosidad (ASTM D 217 AASHTO T202)
- Ensayo para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53)
- Ensayo de película delgada rotatorio (ASTM D 2872 AASHTO T240)
- Ensayo de destilación (ASTM D6997 AASHTO T 59-97)

Ensayos realizados para los agregados

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

Todo esto con el fin de ver las características que presenta el cemento asfáltico después de cada ciclo de recalentamiento- enfriamiento.

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

### 1.4.2.3. Plan de trabajo

El método o técnica que se realiza para obtener los datos suficientes en este trabajo de investigación consiste en someter al cemento asfáltico en un proceso de ciclos de calentamiento-enfriamiento. En este trabajo se tienen dos panoramas. En el primero se realiza a una temperatura de 150 °C con el tiempo de recalentamiento variable, es decir se calienta el asfalto a una temperatura de 150 °C por determinado tiempo que en este caso será variable de 6, 15, 24 y 48 horas en una primera instancia; cumplido el tiempo determinado se lo extrae las muestras del horno y se procede a realizar su respectiva caracterización con el objetivo de conocer cómo se van comportando las propiedades del asfalto a medida que se lo recalienta. El resto de la muestra se deja enfriar al contacto de la atmósfera por un tiempo de 24 horas. En el segundo escenario se mantendrá el mismo procedimiento, sólo que se trabajara con una temperatura mayor de 180 °C. Una vez obtenidas las características de cada uno de los ciclos se cuantifica un grado de envejecimiento en términos de porcentaje retenido de la penetración o mediante un índice de consistencia que viene dado por las siguientes expresiones:

$$\% \text{ retenido de penetración} = \frac{\text{penetración del asfalto envejecido}}{\text{penetración del asfalto original}} * 100$$

$$\text{Índice de envejecimiento} = \frac{\text{viscosidad del asfalto envejecido}}{\text{viscosidad del asfalto original}}$$

El mismo que permite conocer un índice de envejecimiento y ver si el mismo influye en el comportamiento de las mezclas en sí.

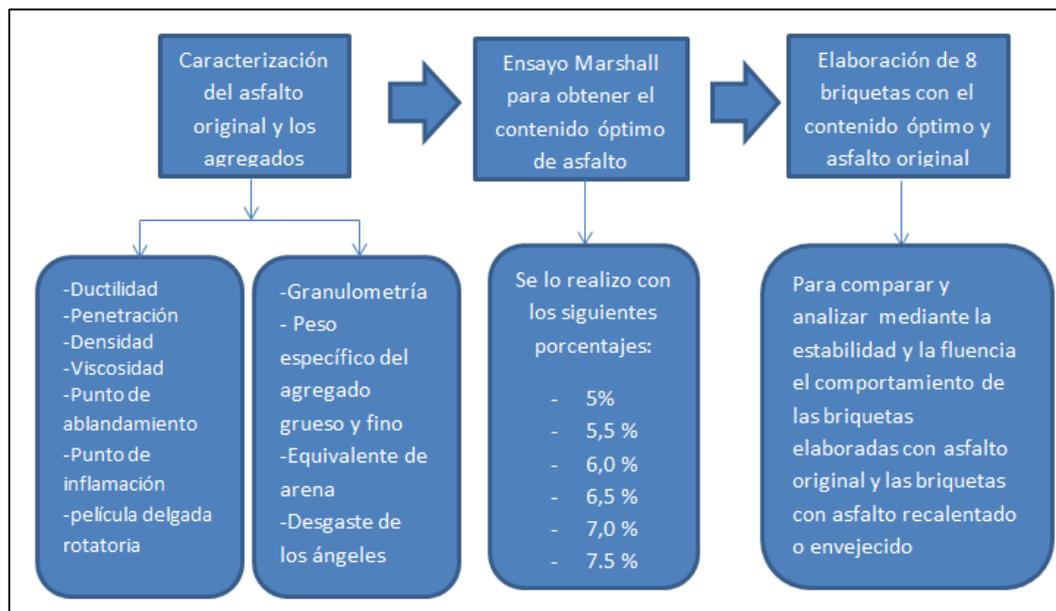
Por otro lado se observan y comparan cómo varían las propiedades, del asfalto recalentado con respecto del cemento asfáltico original.

### **Criterio tomado en cuenta para la definición de los ciclos experimentales**

En el siguiente trabajo de investigación los criterios tomados en cuenta para la definición de los ciclos experimentales se basaron en características del asfalto que será

manipulado en laboratorio, es decir cómo se está tratando con un cemento asfáltico que se clasifica según su penetración (85-100), entonces esta propiedad será de mayor importancia siendo una limitante para poder conocer hasta cuantas horas podrá ser recalentado el cemento asfáltico sin que pierda sus propiedades adecuadas para ser empleado en la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente y las mismas que garanticen una buena calidad de la carpeta de rodadura. También se tomó en cuenta los horarios de trabajo establecidos para los trabajadores públicos en las plantas de producción de mezclas en nuestro medio.

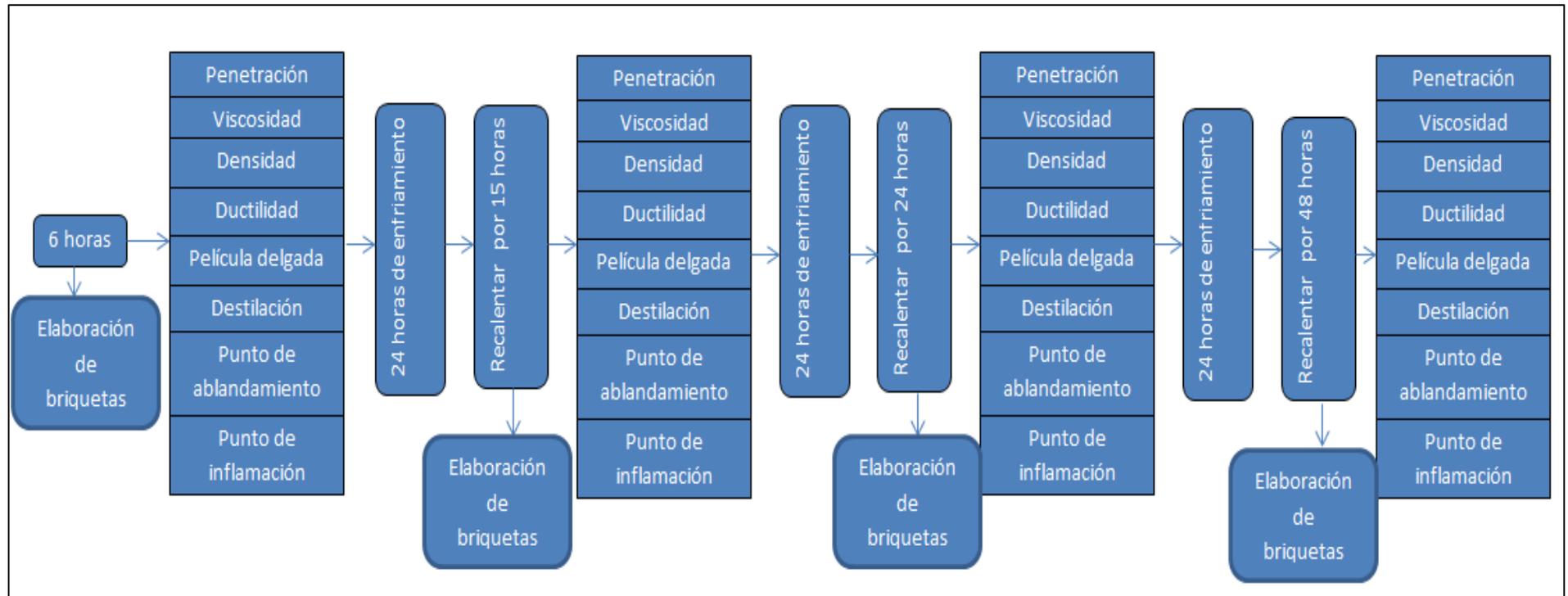
*Esquema 1.1: Análisis de plan de trabajo inicial para la obtención de datos*



*Fuente: Elaboración Propia*

Posteriormente se realizan los ciclos de recalentamiento-enfriamiento trabajando con dos temperaturas 150 °C y 180 °C, esto se realiza de la siguiente manera.

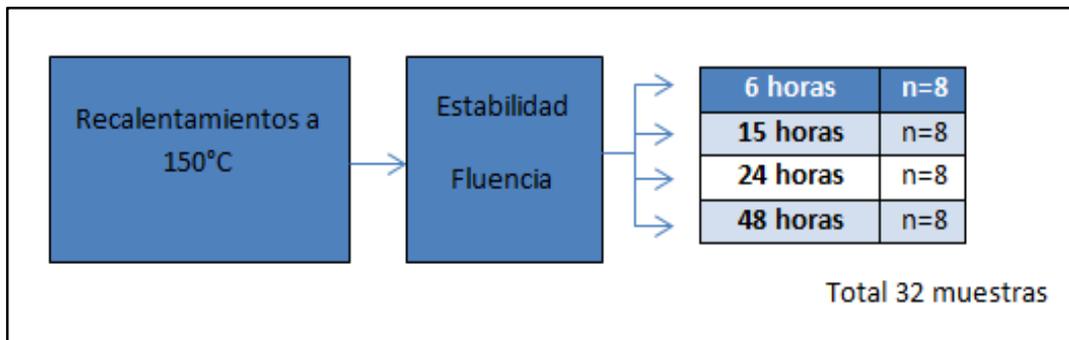
Esquema 1.2: Obtención de datos de los ciclos de calentamiento-enfriamiento.



Fuente: Elaboración Propia

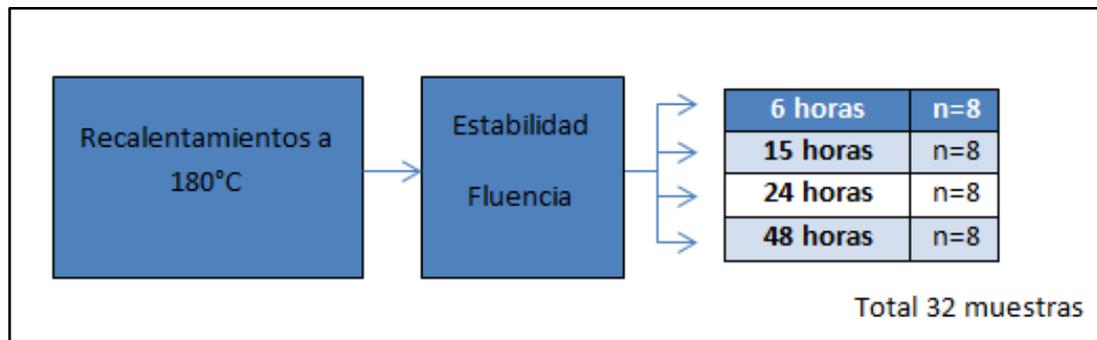
Para obtener los datos del comportamiento de las mezclas es necesario determinar la cantidad de ensayos que se deben realizar, como se propone en los siguientes esquemas.

*Esquema 1.3: Obtención de muestras para ensayos de Resistencia y fluencia para los recalentamientos a 150°C*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Esquema 1.4: Obtención de muestras para ensayos de Resistencia y fluencia para los recalentamientos 180°C*



*Fuente: Elaboración Propia*

Según el esquema anterior se denota que se obtendrá un total de 64 briquetas para someterlas a las pruebas de resistencia, fluencia y poder comparar y observar el comportamiento de las mismas con respecto a las briquetas elaboradas con asfalto original que son otras ocho haciendo un total de 72 briquetas.

#### **1.4.2.4. Técnicas de muestreo**

- **Técnica de muestreo No Probabilística**

Las técnicas de muestreo que se realizan en este trabajo de investigación será de carácter no probabilístico, ya que estos materiales tanto los agregados como el cemento asfáltico son seleccionados intencionalmente. Ambos se obtienen del acopio de la planta de asfaltos de la Alcaldía Municipal de la Ciudad de Tarija, ubicada en la comunidad de La Pintada, que éste a su vez tiene como banco a la chancadora Garzón de la comunidad de Rancho Sur.

El cemento asfáltico tiene procedencia del país vecino Brasil.

- **Descripción de Equipos e Instrumentos**

- A. Para la caracterización de los agregados**

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

- B. Para la caracterización del cemento asfáltico**

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

h. horno y material necesario para realizar el ensayo de película delgada.

### **C. Para la dosificación y diseño de briquetas**

a. Moldes de compactación.- En estos moldes se vaciará la mezcla asfáltica creando briquetas para luego ser analizadas.

b. Martillo compactador.- Este compactador sirve para compactar las briquetas según especificaciones técnicas.

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

### **D. Para los ensayos de resistencia técnica**

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

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

- **Procedimiento de aplicación**

#### **a. Caracterización de los agregados**

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

#### **b. Caracterización del cemento asfáltico**

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

#### **c. Dosificación y diseño de briquetas**

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

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

#### **d. Ensayos de resistencia técnica**

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

- **Preparación previa**

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

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

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

Se realiza la interpretación a los resultados obtenidos del análisis estadístico en los ensayos: fluencia, estabilidad y % de vacíos; se presentan gráficos necesarios para obtener conclusiones claras.

### **1.5. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

El alcance de investigación para esta tesis se refleja en un trabajo netamente de laboratorio ya que se procura valorar la variación de las propiedades de un cemento asfáltico cuando es sometido a un proceso de ciclos de calentamiento-enfriamiento y si este fenómeno afecta al comportamiento de mezclas asfálticas en caliente.

Este fenómeno se analiza, realizando recalentamientos del cemento asfáltico con lo cual se produce una oxidación debido a que se lo calienta y se lo deja por varias horas, éste

entra en contacto con aire y por ende se oxida presentando un índice de envejecimiento, el mismo que se obtiene de las características del asfalto original y del asfalto recalentado o envejecido por oxidación. Es decir que en el siguiente trabajo de investigación lo que se pretende es medir y analizar que propiedades cambian, aumentan o disminuyen del cemento asfáltico original con el recalentamiento del asfalto y ver cómo afectan esos cambios de las propiedades sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.

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

## CAPITULO II

### **2.1. ORIGEN, NATURALEZA Y COMPOSICIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO**

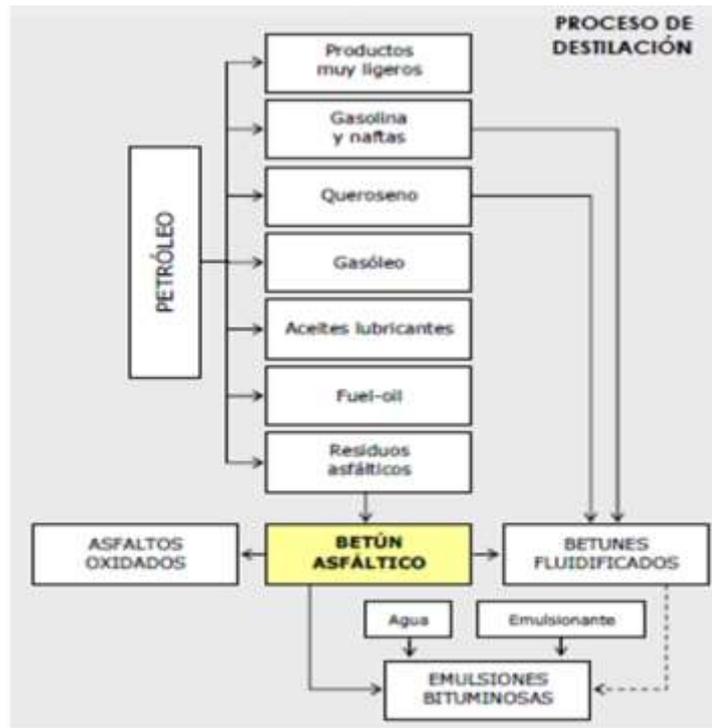
El asfalto es un material de color oscuro, que presenta propiedades ligantes y aglutinantes, conformado por una serie muy compleja de elementos y compuestos en los que sobresalen los hidrocarburos; soluble en gran parte en disulfuro de carbono, presenta consistencia semisólida a las temperaturas ambientes ordinarias pero tiende rápidamente a la liquidez al incrementarse la temperatura. Esta última propiedad ha permitido adecuarlo a muchos usos en la construcción de distintas obras civiles.<sup>1</sup>

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

*Figura 2.1: proceso de destilación del petróleo*

---

<sup>1</sup> *The Asphalt Institute (Manual del asfalto) College Park – Maryland U.S.A*



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

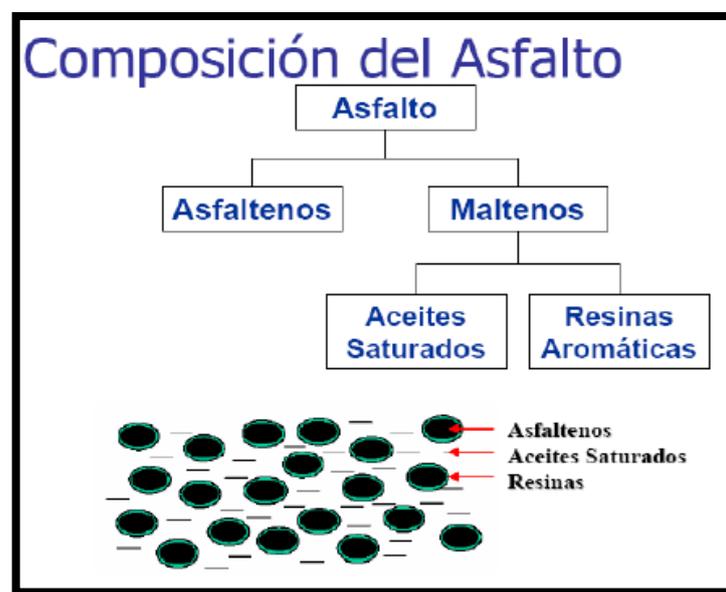
Casi todo el asfalto que se produce y utiliza actualmente en el mundo procede de la refinación de petróleo.

### 2.1.1. Composición Química del Cemento Asfáltico

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

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

*Figura 2.2. Composición química del cemento asfáltico*



*Fuente: Manual de Ensayos Para Pavimentos*

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

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

Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas (pegajosidad) en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas. La proporción de asfaltenos y maltenos en el asfalto puede variar debido a un sin número de factores partiendo por el origen del crudo incluyendo las altas temperaturas, exposición a

la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla asfáltica, y espesor de la película de asfalto que recubre las partículas de agregado. Las reacciones y cambios que pueden ocurrir en el proceso de mezclado incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o más moléculas para formar una sola molécula más pesada), y otros cambios químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto. Las resinas se convierten gradualmente en asfaltenos, ocasionando así un aumento en la viscosidad del asfalto.<sup>2</sup>

## **2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL CEMENTO ASFALTICO<sup>3</sup>**

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

### **2.2.1. Durabilidad**

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

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

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

### **2.2.2. Adhesión y Cohesión.**

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

---

<sup>2</sup> *Tecnología del cemento asfáltico Hugo León Arenas*

<sup>3</sup> *Asfalto-introducción. México. Véase: [http://www.elprisma.com/apuntos/ingenieria\\_civil/asfalto/](http://www.elprisma.com/apuntos/ingenieria_civil/asfalto/)*

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

### **2.2.3. Susceptibilidad a la Temperatura**

Los asfaltos son termoplásticos; se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura o tasa de variación de viscosidad con la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

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

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

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

### **2.2.4. Endurecimiento y Envejecimiento.**

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

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

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

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción.

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

### **2.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS<sup>4</sup>**

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

#### **2.3.1. Ensayos para medir consistencia de los cementos asfálticos**

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

##### **2.3.1.1. La viscosidad**

Una de las propiedades que más interesan desde el punto de vista ingenieril es la viscosidad de los asfaltos.

---

<sup>4</sup> *Tecnología del Cemento Asfáltico de Hugo León Arenas*

La viscosidad se define como la resistencia que ofrece un fluido a la deformación, debida básicamente al razonamiento interno de las moléculas. Cuanto más eleva su viscosidad, mucho más lento será su movimiento.

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

#### **2.3.1.2. La penetración.**

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

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

#### **2.3.1.3. Punto de Ablandamiento**

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

Se determina colocando en un recipiente con agua, a una determinada altura sobre el fondo, un anillo de latón de dimensiones establecidas, el cual se rellena previamente con el asfalto fundido y se deja enfriar a temperatura ambiente luego se coloca una esfera de 9,51 mm de diámetro, y se calienta el baño, de tal manera que la temperatura del agua suba a velocidad constante. Debido al calor, el asfalto se ablanda y la esfera desciende gradualmente envuelta en una bolsa de asfalto hasta tocar el fondo del baño. La temperatura del baño en ese instante es lo que se denomina el punto de ablandamiento de anillo y bola del cemento asfáltico ensayado.

#### **2.3.1.4. Ductilidad**

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

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

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

### **2.3.2. Ensayos para Determinar la Durabilidad del Cemento Asfáltico**

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

#### **2.3.2.1. El ensayo de película delgada**

Este ensayo se utiliza para simular en el laboratorio las condiciones que producen un aumento de la consistencia del asfalto durante las operaciones de mezclado en la planta, lo cual significa poder medir el envejecimiento del cemento asfáltico durante esa operación. El ensayo consiste en colocar una película de asfalto de 3 mm de espesor en una cacerola y en un horno giratorio que se encuentra a una temperatura de 163 °C durante un tiempo de 5 horas. El asfalto envejecido se somete a los ensayos de penetración, viscosidad o punto de ablandamiento, con el fin de calcular el porcentaje de pérdida o ganancia de peso, penetración retenida, aumento del punto de ablandamiento y el incremento de la viscosidad o relación de envejecimiento.

Durante muchos años se ha venido utilizando de película fina rotativa (RTOF) para simular el envejecimiento durante el proceso de mezclado en planta, transporte y posterior colocación en obra de la mezcla asfáltica en caliente. Consiste en colocar asfalto

dentro de un recipiente cilíndrico sobre una superficie que gira alrededor de un eje horizontal, manteniéndose una temperatura constante de 163 ° C y sometida de manera continua a la acción del aire, durante 75 minutos, una vez terminado el ensayo se saca la muestra se deja 24 horas y se realizan los ensayos de penetración viscosidad y ductilidad y otros.

### **2.3.3. Ensayos para Determinar la Pureza del Cemento Asfáltico**

Los cementos asfálticos están constituidos casi siempre por bitumen puro, el cual por definición es complemento soluble en disulfuro de carbono. Sólo un porcentaje muy pequeño de impurezas está presente en el cemento asfáltico obtenido de refinería para determinar el grado de pureza del asfalto se utiliza el ensayo de solubilidad. Los maltenos, los constituyentes cementantes (resinas) y los asfaltenos, son solubles en disulfuro de carbono, tricloroetileno, tetracloruro de carbono y otros solventes orgánicos de bajo punto de ebullición, mientras que la materia inerte (no cementante) como sales, carbón libre o impurezas orgánicas son insolubles en estos solventes.

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

### **2.3.4. Ensayos de Seguridad**

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

#### **2.3.4.1. Punto de Inflamación**

Conocido también como punto de chispa es la temperatura a la cual el cemento asfáltico puede ser calentado sin peligro de incendio en presencia de una chispa. Esta temperatura es más baja que la correspondiente al punto de llama, la cual es la temperatura a la que el asfalto se enciende aunque el punto de chispa es mucho más alto que la temperatura de manejo del cemento asfáltico en una planta, es necesario conocerla y controlarla por razones de seguridad, ya que es muy posible que el producto sufra alguna contaminación durante el transporte de la refinería a la obra, lo cual produce un descenso en la

temperatura correspondiente al punto de inflamación (por ejemplo un carro tanque mal lavado con residuos de gasolina u otros solventes livianos).

El método de la Copa de Cleveland es utilizado para determinar el punto de flash o punto de inflamación. La copa de bronce se llena con un volumen especificado de cemento asfáltico y se calienta a una velocidad prefijada. Se pasa sobre la superficie del asfalto una llama auxiliar a intervalos de tiempos definidos. La temperatura a la cual el asfalto libera suficientes vapores para producir chispa o destellos instantáneos al paso de una pequeña llama, se define como punto de inflamación o punto de flash.

### **2.3.5. Otros Ensayos**

#### **2.3.5.1. Ensayo del Peso Específico**

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

La determinación del peso específico del cemento asfáltico a diversas temperaturas es de gran interés práctico por sus numerosas aplicaciones en las que es preciso emplear una cantidad determinada del material caliente, siendo más fácil medir volúmenes que pesos.

El peso específico del cemento asfáltico varía según su origen y proceso de obtención, manteniéndose siempre sensiblemente igual a la unidad. En asfaltos del mismo origen, el peso específico aumenta cuando la penetración disminuye. El método del picnómetro es el más utilizado para su determinación. Generalmente se expresa en términos de peso específico a una temperatura dada para ambos materiales: agua y cemento asfáltico. Un peso específico de 1.030 a 25 ° C significa que el cemento asfáltico tiene un peso específico de 1.030 cuando el agua y el cemento asfáltico están a una temperatura de 25 ° C.

Tabla 2.1: Ensayos de laboratorio Normalizados para Asfaltos

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

Fuente: The Asphalt Institute.

#### 2.4. INFLUENCIA DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DEL ASFALTO EN SUS PROPIEDADES

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

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

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

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

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

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

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

esta composición, siendo lo ideal un asfalto poco deformable y durable o poco sensible al envejecimiento.<sup>5</sup>

## **2.5. CONTROL DE LAS TEMPERATURAS DE APLICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO**

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

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

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

1. Tipo de aplicación (mezcla o riego)
2. Características granulométricas de los áridos.
3. Condiciones atmosféricas (importantes en la aplicación por riego).

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

La temperatura más adecuada para mezclado en instalación mezcladora es aquella a que la viscosidad del asfalto está comprendida entre 75 y 150 s Saybolt Furol. Las temperaturas más elevadas de este campo de variación son normalmente más adecuadas para mezclas con áridos gruesos, y las más bajas para mezclas con áridos finos. No hay que olvidar que la temperatura de los áridos regula en medida importante la temperatura de la mezcla.

En la siguiente tabla se muestra las diferentes especificaciones para determinar la temperatura de aplicación.<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> *Tecnología del Cemento Asfáltico de Hugo León Arenas*

<sup>6</sup> *The Asphalt Institute Manual del asfalto COLLEGE PARK – MARYLAND U.S.A*

*Tabla 2.2: Temperaturas de aplicación del cemento asfáltico*

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

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

<sup>2</sup> Rara vez se emplea en riego

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

<sup>4</sup> No se emplea en las mezclas.

Fuente: The Asphalt Institute

## 2.6. OXIDACIÓN DEL ASFALTO

La oxidación, en cuanto a la industria de mezcla caliente se refiere, es un fenómeno presente e inevitable en todo el proceso de mezclado en caliente al que no se da la importancia que corresponde. Sin embargo, la oxidación del asfalto, junto con los factores

que gobiernan su tasa de evolución y su efecto en la mezcla y en la durabilidad de la obras.

Para poder describir la oxidación del asfalto de modo apropiado, es necesario recurrir a lo ya visto sobre la naturaleza del asfalto. Básicamente es un material hidrocarburado compuesto por micro moléculas de hidrógeno y carbono. Desafortunadamente, no es posible dar la fórmula exacta del asfalto puesto que el mismo es un residuo complejo que se produce al refinar petróleo crudo. Si se determina la fórmula química de un tipo específico de asfalto que se tiene disponible, la misma indudablemente variará cuando se utilice un petróleo crudo diferente, por lo cual la misma no será válida para todas las situaciones.

Por lo tanto, no es posible escribir ecuaciones químicas que describan la reacción del asfalto con el oxígeno de modo preciso.

La oxidación es el proceso de combinar o de causar la combinación de una sustancia dada con oxígeno. Un ejemplo interesante es el fenómeno de corrosión que afecta al hierro producida por la combinación del hierro con el oxígeno, así de forma similar el envejecimiento del asfalto con la reducción simultánea en los niveles de penetración es resultado de la combinación del asfalto con oxígeno.

La combinación de asfalto y oxígeno produce resultados que generalmente pueden predecirse usando las reacciones conocidas del oxígeno con moléculas pequeñas de hidrocarburos. Las conclusiones siguientes se basan en tal tipo de conocimiento químico, al igual que el conocimiento práctico y la experiencia en la industria de mezcla caliente.

1. Cuando el asfalto se expone al oxígeno, reacciona químicamente (se oxida) a prácticamente todas las temperaturas.
2. La tasa de reacción es extremadamente sensible a la temperatura, doblándose por cada 14 °C que la temperatura suba por encima de los 93 °C. Por ejemplo, la reacción entre el asfalto y el oxígeno se produce dos veces más rápidamente a 149 °C que a 135 °C. La reacción se produce cuatro veces más rápidamente a 163 °C que a 135 °C
3. Puesto que el oxígeno es un gas y el asfalto un líquido, cuanto mayor sea la superficie de asfalto expuesta al aire, tanto mayor será la cantidad de reacción química. Básicamente, la reacción se produce en la frontera de la superficie
4. La reacción química se ve afectada por el tiempo de exposición al oxígeno.

5. La radiación solar junto con la presencia de partículas metálicas también causa el deterioro acelerado del asfalto.

La industria de mezcla caliente se preocupa por la oxidación del asfalto en cuatro puntos: en el sistema de manejo de líquido de la planta; en el proceso de mezclado; en la superficie de la carretera y del pavimento; y en las tolvas de mezcla caliente.<sup>7</sup>

### **2.6.1. Oxidación en el Sistema de Manejo de Líquido**

Cuando se produce oxidación en el sistema de manejo de asfalto líquido, la misma recibe el nombre de coquización. La coquización en algunos casos representa un problema grave y en otros una molestia menor.

La oxidación (o coquización) se produce cuando se permite que el nivel de asfalto líquido descienda por debajo de la superficie calentadora de los serpentines o elementos térmicos.

Cuando el serpentín sobresale del nivel de líquido, el mismo está cubierto por una capa delgada de asfalto. El asfalto queda en contacto con el aire. El oxígeno presente en el aire se combina con el asfalto y se produce oxidación. Además, la oxidación se produce rápidamente. Los serpentines de aceite caliente trabajan a una temperatura más elevada que la del asfalto líquido. La película de asfalto que cubre la parte expuesta del serpentín se calienta a una temperatura más alta que lo normal. Esto acelera la oxidación. A medida que el asfalto que cubre el serpentín reacciona químicamente con el oxígeno, el mismo se endurece.

La masa endurecida de asfalto oxidado recibe el nombre de coque. Cada vez que el nivel de líquido en el tanque cubre el serpentín y luego vuelve a dejarlo descubierto, una película adicional de asfalto se pega al serpentín, aumentando el espesor del coque acumulado.<sup>8</sup>

### **2.6.2. Oxidación Durante el Proceso de Mezclado**

---

<sup>7</sup> Véase: [http://www.salamanca\\_ga.pdf/apuntes/ingenieria\\_civil/oxidaciondelasfalto](http://www.salamanca_ga.pdf/apuntes/ingenieria_civil/oxidaciondelasfalto)

<sup>8</sup> Véase: [http://www.salamanca\\_ga.pdf/apuntes/ingenieria\\_civil/oxidaciondelasfalto](http://www.salamanca_ga.pdf/apuntes/ingenieria_civil/oxidaciondelasfalto)

Durante el proceso de mezclado en una planta dosificadora, el asfalto se bombea o se rocía en el interior del mezclador, en donde se mezcla con el agregado caliente.

Las superficies de todas las rocas y partículas del agregado se recubren con una película delgada de asfalto. Si fuera posible distribuir cada superficie recubierta para formar una superficie plana continua, la misma formaría una zona enorme recubierta por una película de asfalto de aproximadamente 10 micrones de espesor. Por ejemplo, en una tonelada de mezcla caliente con 6 % de asfalto líquido, la superficie del líquido que forma una película de 10 micrones de espesor cubriría 5330 m<sup>2</sup> ó 0,53 hectáreas. Obviamente, sobre esta gran superficie expuesta, el asfalto líquido se oxida rápidamente. En un mezclador se producen condiciones similares, lo cual resulta en una oxidación rápida, de hecho, es mucho más rápida que cuando el asfalto se guarda en un tanque. En un mezclador, se crea una superficie de tamaño enorme.

La exposición al oxígeno por volumen del asfalto se multiplica por un factor de mil o más. Durante el proceso de mezclado, el grado de penetración del asfalto normalmente cae de 86 a aproximadamente 65 (normalmente se usa asfalto con penetración de grado 85 a 100 en la parte central de los EE.UU.).

La reacción no necesariamente continúa hasta que se agote el oxígeno en los espacios vacíos. Si las muestras (tomadas de la caja del camión directamente después del mezclado) se enfrían rápidamente, el proceso de oxidación se detiene y se observan caídas en el grado de penetración de aproximadamente 10 puntos. Sin embargo, si las muestras se toman después que la mezcla ha sido transportada y vaciada en el pavimento (aproximadamente 1/2 a 1 hora después), se observa una reducción adicional de 10 puntos en el grado de penetración. La cantidad exacta de la reducción depende de muchos factores, tales como las temperaturas de mezclado, el tipo de mezcla, el tipo de asfalto, el tipo de agregado y el tiempo de mezclado.

El mezclado a temperaturas altas (177°C y superiores) y los tiempos de mezclado prolongados pueden perjudicar el producto final.<sup>9</sup>

### **2.6.3. Oxidación de la Mezcla en Caliente en la Carretera**

El asfalto vaciado en el pavimento generalmente se compacta a una densidad superior al 97 %. La reducción de la tasa de oxidación es uno de los motivos por los cuales el diseño

---

<sup>9</sup>Véase: [http://www.salamanca\\_ga.pdf/apuntes/ingenieria\\_civil/oxidaciondelasfalto](http://www.salamanca_ga.pdf/apuntes/ingenieria_civil/oxidaciondelasfalto)

de la mezcla específica una densidad alta y una cantidad baja de espacios vacíos. Aún en este caso, con el paso del tiempo y la exposición a los elementos del clima, el asfalto del pavimento lentamente empieza a reaccionar químicamente con el oxígeno presente en el aire.

Cuando se vacía con un grado de penetración inicial de 60 – 65 mm, el asfalto se oxida en un lapso de diez a quince años, hasta que su nivel de penetración llegue a 10 – 15 mm. Al llegar a este punto, el pavimento se torna muy quebradizo, se agrieta gradualmente y se deteriora. La oxidación del asfalto de un pavimento ciertamente es muy lenta. Esta lentitud se explica por qué el asfalto queda protegido contra la exposición al oxígeno y usualmente se encuentra a temperaturas bajas. Las mezclas densas ayudan a prolongar la vida útil del asfalto porque impiden que el oxígeno penetre la mezcla y la deteriore por debajo de su superficie.<sup>10</sup>

#### **2.6.4. Oxidación en las Tolvas de Almacenamiento de Mezcla en Caliente**

Hay dos tipos de tolvas de mezcla caliente que se han aceptado en la industria de mezcla de asfalto. La tolva de compensación, el tipo más antiguo, se utilizó por muchos años antes del desarrollo de la tolva de almacenamiento actual, desarrollada en 1966 para permitir almacenar la mezcla por más tiempo. El almacenamiento de la mezcla por tiempo prolongado se intentó en los primeros días de las tolvas de compensación (y desafortunadamente muchos operadores lo intentarían hoy día). La mezcla almacenada en estas tolvas se deteriora rápidamente debido a la oxidación. Los factores que causan oxidación durante el manejo del asfalto, el mezclado y en el pavimento están presentes continuamente en las tolvas de mezcla caliente. Estos factores son temperaturas altas, superficies grandes expuestas del material y el tiempo.

El “tiempo” es el lapso durante el cual la mezcla queda expuesta a un entorno que contiene oxígeno. Cuanto más largo sea el tiempo, tanto mayor será la oxidación. La tasa de oxidación se ve afectada principalmente por la temperatura y la exposición al oxígeno.

Muchos operadores suponen que es necesario colocar la mezcla en la tolva a temperaturas elevadas para compensar el enfriamiento de la misma. Esta suposición es incorrecta

---

<sup>10</sup>Véase: [http://www.salamanca\\_ga.pdf/apuntes/ingenieria\\_civil/oxidacion](http://www.salamanca_ga.pdf/apuntes/ingenieria_civil/oxidacion)

debido al bajo grado de conductividad térmica de la roca y el asfalto. Las temperaturas altas no sólo brindan poca ayuda para mantener caliente la mezcla, sino que también propician la oxidación. La mezcla que se coloca en una tolva a 177 °C se oxida ocho veces más rápido que si la misma se coloca a 135 °C

Obviamente, se debe almacenar la mezcla a la temperatura más baja posible para reducir la tasa de oxidación.

Un agente de oxidación posiblemente más sutil que el tiempo o la temperatura es la “exposición al oxígeno”. Decimos sutil por las muchas maneras en que puede producirse la exposición. El oxígeno penetra en la tolva por agrietaciones en sus paredes, por la abertura superior de la misma y por la compuerta de descarga y penetra la mezcla por sus espacios vacíos.

El oxígeno del proceso de mezclado también es transportado en los espacios vacíos de la mezcla hacia la tolva después del proceso de mezclado.

El oxígeno que penetra en la tolva por su abertura superior y por la abertura de descarga inferior debe eliminarse, si la mezcla va a almacenarse por un lapso algo prolongado.

El grado de exposición de la mezcla al oxígeno depende del sistema de sellado en uso y de la densidad de la mezcla. Una mezcla de arena y asfalto muy densa es prácticamente impenetrable por el aire y se oxida únicamente en la parte inferior de la abertura de descarga y en la parte superior de la tolva. Un material base con más espacios vacíos permite que el oxígeno penetre en la mezcla y propicia un alto grado de oxidación. El grado de oxidación depende de los vacíos en la mezcla o del grado de exposición de la mezcla al oxígeno. Aún una mezcla de arena y asfalto, con su alto grado de densidad, se oxida significativamente si pasa un tiempo suficientemente largo.

La oxidación avanza como un cáncer a través de la mezcla con el paso del tiempo. Los operadores frecuentemente hallan que la mezcla oxidada puede romperse abriendo la compuerta de descarga y abriendo un agujero con un tubo. Esta mezcla oxidada o coquizada representa una mezcla de 15 años de edad con un grado de penetración de aproximadamente 10. El riesgo que se corre al abrir un agujero es que la mezcla que está sobre la parte endurecida que se rompe puede tener las propiedades de un asfalto de 8 a 10 años de edad con un grado de penetración de 30 a 40. Esta mezcla con grado de penetración de 30 a 40 fluye fácilmente de la tolva una vez que se quita la mezcla oxidada.

Si se usa el material de grado 30-40 de penetración, la misma produce un pavimento que se torna quebradizo rápidamente y se deteriora después de una corta vida útil.

Como se puede ver de este ejemplo ideado en EE.UU. toda la oxidación es resultado del oxígeno introducido en la mezcla durante el proceso de mezclado en el mezclador.

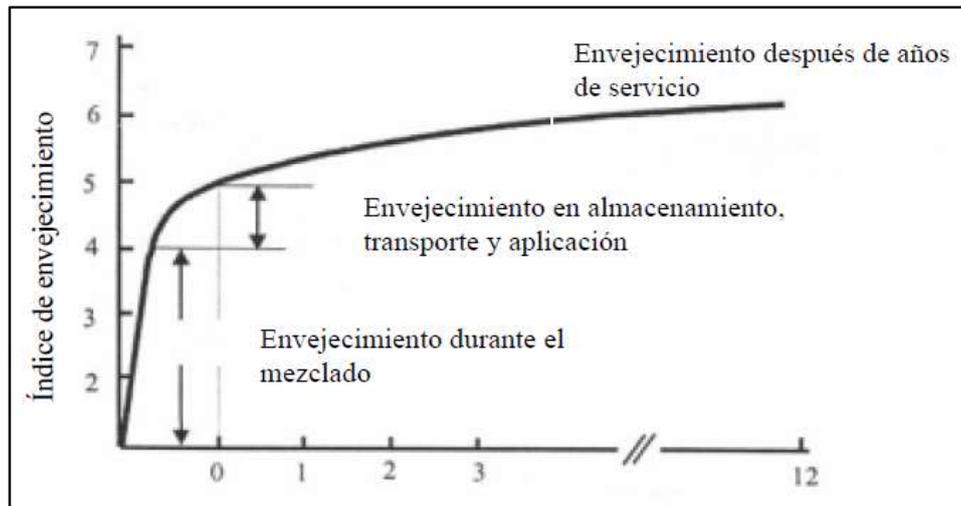
La oxidación del asfalto puede representar ya sea una molestia o un problema crítico para el productor de mezcla caliente. La oxidación puede causar tiempo improductivo y puede afectar la calidad de la mezcla. El comprender las causas, los efectos y las soluciones debe ser parte del conocimiento básico de los profesionales relacionados con el tema.

Varios factores influyen en la oxidación: el manejo de asfalto líquido, la superficie del pavimento y en los sistemas de tolvas de compensación y de almacenamiento. La oxidación se produce cuando el asfalto queda expuesto al oxígeno presente en la atmósfera. Su efecto aumenta con el paso del tiempo, y su tasa de actividad se acelera con el calor.

La oxidación puede controlarse limitando la exposición del asfalto al oxígeno, reduciendo el tiempo de manejo y limitando las temperaturas en donde sea posible.

Un Resumen de lo anterior se muestra:

*Figura2.3. Curva de envejecimiento de asfalto*



Fuente: EXXON MOBIL, *Lubricants & Petroleum Specialties*.

De lo anterior necesitamos mostrar como ocurre el proceso de envejecimiento a nivel físico y químico, y deducir soluciones útiles, para disminuir esta tasa de oxidación.<sup>11</sup>

## 2.7. PROCESO DE ENVEJECIMIENTO DEL CEMENTO ASFALTICO<sup>12</sup>

El ligante asfáltico se ajusta en cuanto a composición y propiedades para cumplir con especificaciones técnicas que rigen en algunos pavimentos asfálticos, la elección del ligante está estrechamente relacionado con las solicitaciones que se esperan para las distintas capas, de ahí, y como se analizó en el capítulo anterior los cambios químicos o físicos de su estructura interna en el proceso constructivo son considerados perjudiciales. De este hecho se desprende el concepto de durabilidad del asfalto atendiendo al grado de resistencia de este a los cambios antes mencionados.

En la medida que el asfalto envejece, éste se vuelve más rígido, por lo cual pierde parte de sus capacidades para absorber energía por deformación, y a su vez, pierde su capacidad para deformarse y absorber estados tensionales. El envejecimiento tiene como origen cambios particularmente químicos en su estructura interna que ocurren a nivel molecular, como así mismo, cambios físicos: figuración, estructura de poros.

### 2.7.1. Envejecimiento Físico

<sup>11</sup> Véase: [http:// www.salamanca\\_ga.pdf/apuntes/ingenieria\\_civil/oxidaciondelasfalto](http://www.salamanca_ga.pdf/apuntes/ingenieria_civil/oxidaciondelasfalto)

<sup>12</sup> Véase: [http:// www.salamanca\\_ga.pdf/apuntes/ingenieria\\_civil/oxidaciondelasfalto](http://www.salamanca_ga.pdf/apuntes/ingenieria_civil/oxidaciondelasfalto)

Se define el término envejecimiento físico, a los cambios a nivel intermolecular que producen una rigidización del asfalto, aumentando el carácter elástico en desmedro del viscoso.

El origen de estos cambios físicos respecto a la estructura intermolecular del asfalto se pueden ordenar como:

✓ **Envejecimiento Térmico.**

Los asfaltenos y resinas que conforman el asfalto adoptan una estructuración semejante a un cuerpo sólido a temperatura ambiente. El fenómeno de rigidización térmica del asfalto ha sido asociado con la temperatura de transición de este material (Theneoux, 1983), el que a diferencia de materiales cristalinos, presenta un rango de temperaturas de transición. La temperatura de transición está asociada a un reordenamiento de la configuración de las estructuras de cadenas moleculares, lo cual produce una pérdida de movilidad molecular, y por lo tanto, una progresiva rigidización del material.

✓ **Envejecimiento Mecánico.**

Los esfuerzos mecánicos pueden producir empaquetamiento de moléculas reduciendo la movilidad relativa entre ellas a nivel macro.

✓ **Endurecimiento por Volatilización.**

Según Blokker y Van Horn, una de las causas del endurecimiento físico, es la evaporación del material volátil. Este depende de la naturaleza y cantidad de los componentes volátiles y de la condición de exposición, principalmente de la temperatura y espesor de la película.

### **2.7.2. Envejecimiento Químico**

Dada las características complejas de la composición química del asfalto, existen distintas teorías respecto a los factores que alteran el proceso de envejecimiento químico de los

cementos asfálticos, pese a que no hay consenso unánime en cuanto al origen de tal envejecimiento de los ligantes, este fenómeno se explicaría como resultado de:

- Reacciones de oxidación y polimerización
- Reticulación que se acelera por temperaturas altas.
- Efecto de la radiación solar (UV)
- Difusión de oxígeno.
- Volatilización de compuestos de pesos moleculares pequeños (Efecto Físico.)

### **2.7.3. Envejecimiento del Cemento Asfáltico Durante el Proceso de Mezclado en la Planta**

Está bien identificado el endurecimiento que se produce en los ligantes por efecto de su “largo” tiempo de permanencia a altas temperaturas en los tanques de almacenamiento, y sobre todo durante el proceso de mezclado, donde son pulverizados en caliente y colocados sobre la superficie mineral.

Debido al espesor de película tan delgado y a las altas temperaturas a la que es sometido, el asfalto pierde fracciones volátiles. La operación de mezclado en la planta y en caliente del ligante asfáltico y los agregados, a pesar de ser un proceso de corta duración (alrededor de 30 segundos), es muy crítica debido al espesor tan pequeño de la película de asfalto que recubre la partícula del agregado (0,005 a 0,010 mm de espesor). El cemento asfáltico, una vez calentado en los tanques de almacenamiento, se ve sometido a un sobrecalentamiento producido por el contacto con los agregados.

Mientras se mantienen grandes cantidades de cemento asfáltico a una temperatura elevada en los tanques de almacenamiento, no se presentan cambios sensibles en sus propiedades. Sin embargo cuando se mezcla el asfalto caliente con los agregados también calientes extendiéndolos en películas delgadas sobre su superficie durante el proceso de mezclado, las condiciones son muy favorables a la pérdida de fracciones más livianas, a la oxidación y a la adsorción- absorción de ciertos componentes por parte de los agregados. El control de las temperaturas del asfalto y de los áridos, así como la reducción al mínimo del tiempo de mezclado, disminuyen en gran parte el riesgo de un potencial endurecimiento perjudicial. Durante el mezclado, tanto la evaporación como la oxidación son mucho más rápidas que a la temperatura del pavimento, así mismo, la

naturaleza de las reacciones que se presentan a temperaturas altas como a temperaturas bajas son muy variables, lo que genera cambios en su comportamiento reológico.<sup>13</sup>

#### **2.7.4. Efecto del Envejecimiento del Cemento Asfáltico en las Propiedades Reológicas**

Las propiedades reológicas del cemento asfáltico se ven alteradas en mayor o menor grado por los procesos de producción en planta y colocación en obra, lo que afectará el comportamiento de la mezcla asfáltica una vez esté sometida a la acción del clima y de las cargas de tránsito.

##### **2.7.4.1. El tiempo de Envejecimiento del Cemento Asfáltico**

El primer envejecimiento que sufre el cemento asfáltico se produce durante el proceso de mezclado con los agregados pétreos. Durante este proceso, el asfalto es expuesto durante un corto tiempo al aire y a la acción de temperaturas altas (alrededor de 135 °C), presentándose cambios sustanciales en su comportamiento reológico: disminuye la penetración, aumenta su viscosidad y su punto de ablandamiento por la oxidación causada por el aire y la pérdida de los solventes más volátiles. El proceso de envejecimiento continúa aunque en menor velocidad, durante los procesos de almacenamientos en silo, transporte, extendido y compactación de la mezcla asfáltica. Posteriormente una vez colocada la mezcla y abierta al tránsito, el proceso de envejecimiento continúa a una velocidad mucho menor durante los tres primeros años. Después de ello, el envejecimiento seguirá de manera más lenta a través del tiempo de servicio del pavimento, afectando en menor o mayor grado las propiedades reológicas del cemento asfáltico, dependiendo de la cantidad de vacíos, los cuales propician la entrada de aire, agua y luz.

Muchas investigaciones han tratado de evaluar la durabilidad del cemento asfáltico a través de ensayos de laboratorio como son la penetración a 25 °C y la viscosidad a 135 °C del cemento asfáltico y de las propiedades de la mezcla asfáltica como el porcentaje de vacíos. Los cambios en estas propiedades, considerados como factores que alteran el comportamiento de los pavimentos, se han representado a través de distintos modelos.

---

<sup>13</sup> *Tecnología del Cemento Asfáltico de Hugo León Arenas*

De igual forma, el grado de envejecimiento puede ser cuantificado en términos de porcentaje retenido de penetración o mediante el índice de consistencia, dados por las siguientes expresiones:

$$\% \text{ retenido de penetración} = \frac{\text{penetración de asfalto envejecido}}{\text{penetración de asfalto original}} * 100$$

$$\text{índice de envejecimiento} = \frac{\text{viscosidad del asfalto envejecido}}{\text{viscosidad del asfalto original}}$$

*Fuente: Tecnología del Cemento Asfáltico (Hugo León Arenas)*

Ambos parámetros han sido utilizados para evaluar el envejecimiento de diferentes grados de cementos asfálticos y diverso origen.

La pérdida de las propiedades ligantes y rigidización del cemento asfáltico por cambios en su composición química, han sido relacionadas con la aparición de fisuras en las capas de rodadura asfálticas. La viscosidad, la penetración y la ductilidad son las propiedades físicas que más se han correlacionado con este tipo de falla en las mezclas asfálticas.<sup>14</sup>

## **2.8. CARACTERÍSTICAS Y SELECCIÓN DE MATERIALES PÉTREOS**

Los materiales pétreos para construir mezclas asfálticas son de suelos inertes, provenientes de playones de ríos o arroyos de depósitos naturales denominados minas o rocas, los cuales, por lo general requieren cribados y triturados para mejorar ciertas características de comportamiento.

---

<sup>14</sup> *Tecnología del Cemento Asfáltico de Hugo León Arenas*

*Imagen 2.1. Agregados, lavados, triturados y separados por tamaños*



*Fuente: Elaboración propia*

Los agregados de textura rugosa, equidimensionales, proporcionan más resistencia interna que los redondeados y de textura lisa. Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna de una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una fuerte masa de material.

Para la selección de las muestras se tendrá en cuenta que cumpla con las condiciones exigidas en normas. La muestra se extrajo cumpliendo las especificaciones y siguiendo los pasos indicados en el manual de ensayos de suelos y materiales \* asfaltos (método para extraer muestras ASTM C75 AASTHO T2-92). El mismo que consiste extraer del

acopio porciones de áridos en distintos niveles y ubicaciones redondeando el acopio, evitando sacar materiales de las zonas inferior y superior del mismo.

*Imagen 2.2. Tipos de agregados*



agregado redondeado

agregado cubico

*Fuente: Elaboración propia*

Las características más importantes que se deben tomar en cuenta para los agregados para diseñar mezclas asfálticas son: la granulometría, desgaste en la Máquina de Los Ángeles, peso específico del agregado grueso y fino, equivalente de arena, con el fin de garantizar la calidad del pavimento.

Todos estos ensayos son de mucha importancia y deben satisfacer las normas correspondientes, pues como los materiales pétreos se cubren por completo con el asfalto, si la granulometría cambia, también cambia la superficie a cubrir. Ya que la superficie a revestir resulta más afectada al aumentar o disminuir los finos que cuando hay un cambio en las partículas gruesas.

*Tabla 2.3: Ensayos de laboratorio Normalizados para Agregados*

Ensayo de laboratorio para AGREGADOS	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano qué clase de textura tendrá la carpeta.
		EL objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de

*Fuente: The Asphalt Institute.*

## **2.9. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

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

- Suficiente asfalto para asegurar durabilidad.

- Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.
- Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.
- Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.
- Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.
- Las gravedades específicas de masa de todos los agregados usados y la gravedad específica del asfalto sean determinados para poderse usar en los análisis de densidad y vacíos.

Estos requerimientos son materia de pruebas de rutina, especificaciones y técnicas de laboratorio que deben ser considerados, pero que no son técnicas para cualquier método de diseño en particular. Por lo que existen varios Métodos de Diseño de Mezclas, en nuestro caso solo hablaremos del método MARSHALL que por su accesibilidad a los equipos y por ser el más usado en el país.<sup>15</sup>

### **2.9.1. Método Marshall**

El ensayo Marshall para mezclas asfálticas para pavimentación puede emplearse para proyecto en laboratorio y comprobación en obra de las mezclas que contienen cemento asfáltico y áridos cuyo tamaño máximo no exceda los  $\frac{3}{4}$  de pulgada.

Las principales características del ensayo son el análisis de densidad-huecos y los ensayos de estabilidad y fluencia sobre probetas de mezclas compactadas.

Se preparan probetas de 2  $\frac{1}{2}$ " (6,35 cm) de espesor y 4" (10 cm) de diámetro, mediante procedimientos especificados, compactándolas por impacto.

Se determinan la densidad y huecos de la probeta compactada, que se calienta a 60 °C para la realización de los ensayos Marshall de estabilidad y fluencia. La probeta se coloca entre unas mordazas especiales y se carga imponiéndole una deformación de 5 cm/min. La carga máxima registrada durante el ensayo, en libras, se designa como estabilidad Marshall de la probeta. La deformación producida desde el principio de la aplicación de la carga hasta que esta ha alcanzado su valor máximo es la fluencia de la probeta, que

---

<sup>15</sup> Mezclas asfálticas para pavimentación del manual del asfalto the asphalt Institute

suele expresarse en centésimas de pulgada. Se prepara una serie de probetas con contenidos de cemento asfálticos variables por encima y por debajo del óptimo estimado, ensayándolas por el procedimiento que acabamos de describir. Usualmente se preparan tres probetas para cada contenido de cemento asfáltico. Los datos así obtenidos se emplearán para establecer el contenido de cemento asfáltico óptimo de la mezcla y para determinar alguna de sus características físicas. Algunos de los criterios que se toman en cuenta en la siguiente tabla:<sup>16</sup>

Tabla 2.4: Criterios sugeridos para los resultados de los ensayos<sup>1</sup>

METODO DE PROYECTO	Tráfico pesado y muy pesado		Tráfico medio		Tráfico ligero	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>MARSHALL</b>						
Número de golpes de compactación en cada extremo de la probeta	75		50		35	
Estabilidad, libras	750	-	500	-	500	-
Fluencia <sup>2</sup> , expresada en 0,01 pulg	8	16	8	18	8	20
Huecos en la mezcla total % capaz de superficie o nivelación	3	5	3	5	3	5
sheet asphalt con arena o piedra	3	8	3	8	3	8
Capa intermedia o base	3	8	3	8	3	8
Huecos de los áridos rellenos de asfalto%						
Capaz de superficie o nivelación	75	82	75	85	75	85
sheet asphalt con arena o piedra	65	72	65	75	65	75

<sup>16</sup> Manual del asfalto the Asphalt Institute COLLEGE-MARYLAND U.S.A

Capa intermedia o base	65	72	65	75	65	75
<b>HUBBARD-FIEL</b>						
Método original						
Estabilidad, libras	2000	-	1200	2000	1200	2000
Huecos en la mezcla total, %	2	5	2	5	2	5
Método modificado						
Estabilidad, libras	3500	6000	2500	6000	2500	6000
Huecos en la mezcla total, %	2	5	2	5	2	5
<b>HVEEM</b>						
Valor de estabilometro	35	-	35	-	35	-
Valor de cohesiometro	50	-	50	-	50	-
Entumescimiento, pulgadas	-	0,03	-	0,03	-	0,03
Huecos de mezcla total %	4	-	4	-	4	-
<b>METODO TRIAXIAL DE SMITH</b>						
Cohesión unitaria, C, libras por pulg <sup>2</sup>						
Angulo de rozamiento interno, grados						
Huecos en la mezcla total, %		10	5	10	5	10

<sup>1</sup> criterios aplicables solamente cuando el ensayo se hace de acuerdo con los métodos descritos en la publicación del instituto de asfalto.

<sup>2</sup> se sugiere que en las paradas de autobuses, cruces y zonas similares se especifique el empleo de valores de fluencia próximos al mínimo.

Fuente: The Asphalt Institute

## 2.9.2. Características y Comportamiento de las Mezclas Asfálticas en Caliente

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

- ✓ Densidad de la mezcla
- ✓ Vacíos de aire, o simplemente vacíos.
- ✓ Vacíos en el agregado mineral.
- ✓ Contenido de asfalto.

### 2.9.2.1. Densidad

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

La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

### **2.9.2.2. Vacíos de Aire (o simplemente vacíos)**

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 %, dependiendo del diseño específico.

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

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

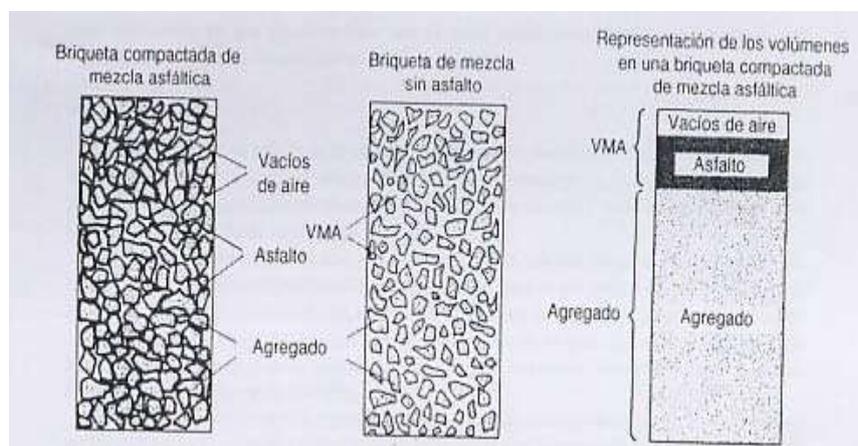
### **2.9.2.3. Vacíos en el Agregado Mineral**

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

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para las

películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla.

Figura 2.4. Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada



Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente Asphalt Institute MS-22

Tabla 2.5. Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada

Tamaño Máximo en mm		VMA mínimo, por ciento		
Porcentaje		Vacíos de Diseño, por ciento <sup>1</sup>		
mm	in.	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

<sup>1</sup> Especificación Normal para Tamaños de Tambores usados en Pruebas, ASTM E 11 (AASHTO M 92)  
<sup>2</sup> El tamaño máximo nominal de partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más de 10 por ciento del material.  
<sup>3</sup> Interpolar el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están citados.

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Asphalt Institute MS-22

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VMA. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca.

Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar el contenido de asfalto.

#### **2.9.2.4. Contenido de Asfalto**

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios (discutidos más adelante) dictados por el método de diseño seleccionado.

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

#### **2.9.3. Propiedades Consideradas en el Diseño de Mezclas**

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.<sup>17</sup> El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber

---

<sup>17</sup> *Principios de construcción de pavimentos de mezclas asfálticas en caliente del Asphalt Institute MS\_22*

que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

### **2.9.3.1. Estabilidad**

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

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

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

*Tabla 2.6. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento*

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo: dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

*Fuente: Asphalt Institute MS-22*

### 2.9.3.2. Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Una graduación densa de agregado firme, duro, a la separación, contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada.

*Tabla 2.7. Causas y efectos de una poca durabilidad*

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua (Hidrofilitos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

*Fuente: Asphalt Institute MS-22*

### 2.9.3.3. Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

*Tabla 2.8: Causas y efectos de la permeabilidad*

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacios en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación Y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada.	Resultará en vacios altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad.

*Fuente: Asphalt Institute MS-22*

### 2.9.3.4. Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios.

*Tabla 2.9. Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad*

CAUSAS	EFFECTOS
Tamaño máximo de partícula grande	Superficie áspera, difícil de colocar.
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable.

*Fuente: Asphalt Institute MS-22*

### 2.9.3.5. Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la sub-rasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las sub-rasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo). Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada y bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

### 2.9.3.6. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

*Tabla 2.10. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga*

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

*Fuente: Asphalt Institute MS-22*

#### **2.4.2.7. Resistencias al deslizamiento**

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie este mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados debe resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

*Tabla 2.11. Causas y efectos del deslizamiento*

<b>CAUSAS</b>	<b>EFFECTOS</b>
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

*Fuente: Asphalt Institute MS-22*

Tabla 2.12: Propiedades de Mezclas Bituminosas Convencional

PROPIEDAD	DEFINICIÓN	VARIABLES QUE PUEDEN INFLUIR
<b>RIGIDEZ</b>	Relación entre tensión y deformación a una temperatura y tiempo de carga dados	Granulometría del árido Rigidez del betún Grado de compactación Sensibilidad al agua Contenido de betún
<b>ESTABILIDAD</b>	Resistencia a la deformación permanente (generalmente a altas temperaturas y largos periodos de aplicación de carga)	Textura superficial del árido Granulometría del árido Rigidez del betún Contenido de betún Grado de compactación Sensibilidad al agua
<b>DURABILIDAD</b>	Resistencia a los efectos climáticos (aire y agua) y a la acción abrasiva del tráfico	Contenido de betún Naturaleza del betún Granulometría del árido Grado de compactación Rigidez del betún Sensibilidad al agua
<b>RESISTENCIA A LA FATIGA</b>	Aptitud de la mezcla para flexionar repetidamente sin romperse	Granulometría del árido Contenido de betún Grado de compactación Rigidez del betún Sensibilidad al agua
<b>RESISTENCIA A LA FISURACIÓN</b>	Resistencia de la mezcla a la fisuración por tensiones de tracción	Granulometría del árido Tipo de árido Contenido de betún Grado de compactación Rigidez del betún Sensibilidad al agua
<b>RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO</b>	Resistencia de la mezcla para proporcionar un coeficiente de fricción adecuado entre el neumático y el pavimento en condiciones húmedas	Textura y resistencia al pulimento del árido Granulometría del árido Contenido de betún
<b>PERMEABILIDAD</b>	Capacidad del aire, agua o vapor de agua para moverse dentro y a través de la mezcla	Granulometría del árido Contenido de betún Grado de compactación Rigidez del betún Sensibilidad al agua

Fuente: ASTEC, 1998

### 3.1. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

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

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

Los agregados necesarios, se extrajeron según el Manual de Carreteras (ASTM C75 AASHTO T2-91). del acopio o almacenamiento de la Alcaldía del Municipio de Tarija de la Provincia Cercado, que se encuentra ubicado en la comunidad de la “Pintada” el mismo que tiene como banco a la chancadora Garzón, ubicada en la comunidad de “Rancho Sur”.

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



*Fuente: Programa Google Earth*

*Imagen 3.2: Acopio de material*



*Fuente: Elaboración Propia*

El cemento asfáltico que se usó fue el C.A. 85-100 con nombre Betunel de procedencia Brasileira, también proporcionado por la misma institución; para seleccionar las muestras se procedió de acuerdo a las especificaciones indicadas en el Manual de Carreteras V4A (Método de muestreo ASTM D140 AASHTO T40-78). siendo los mismos analizados en laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho y también en los laboratorios de suelos y asfaltos de la Honorable Alcaldía Municipal, el mismo que se encuentra ubicado en la misma comunidad de la “Pintada”.

*Imagen 3.3: Especificaciones de cemento asfáltico 85-100*



*Fuente: Elaboración Propia*

## **3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.**

### **3.2.1. Granulometría (ASTM E40 AASHTO T27-99)**

La prueba de granulometría sirve para determinar el porcentaje en peso de los áridos de diferentes tamaños.

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

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

*Imagen 3.4: Lavado de material antes de realizar la granulometría*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.5: Tamizado mediante el equipo de ROP-TAP*



*Fuente: Elaboración Propia*

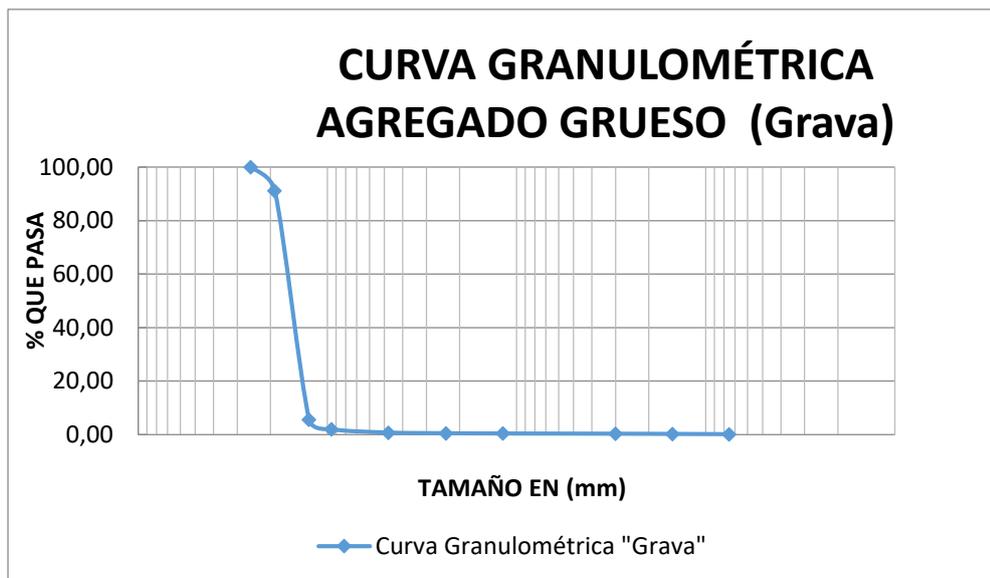
### RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

*Tabla 3.1: Granulometría del Agregado grueso (grava)*

Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,0	440,43	440,43	8,81	<b>91,19</b>
1/2"	12,5	4280,51	4720,94	94,42	<b>5,58</b>
3/8"	9,50	180,42	4901,36	98,03	<b>1,97</b>
N°4	4,75	62,26	4963,62	99,27	<b>0,73</b>
N°8	2,36	11,80	4975,42	99,51	<b>0,49</b>
N°16	1,18	5,35	4980,77	99,62	<b>0,38</b>
N°50	0,30	4,08	4984,85	99,70	<b>0,30</b>
N° 100	0,15	4,25	4989,10	99,78	<b>0,22</b>
N° 200	0,08	4,35	4993,45	99,87	<b>0,13</b>
BASE		5,40	4998,85	99,98	<b>0,02</b>
<b>SUMA</b>		4998,9			
<b>PÉRDIDAS</b>		1,1			

*Fuente: Elaboración Propia*

*Gráfico 3.1: Curva Granulometría del Agregado grueso*



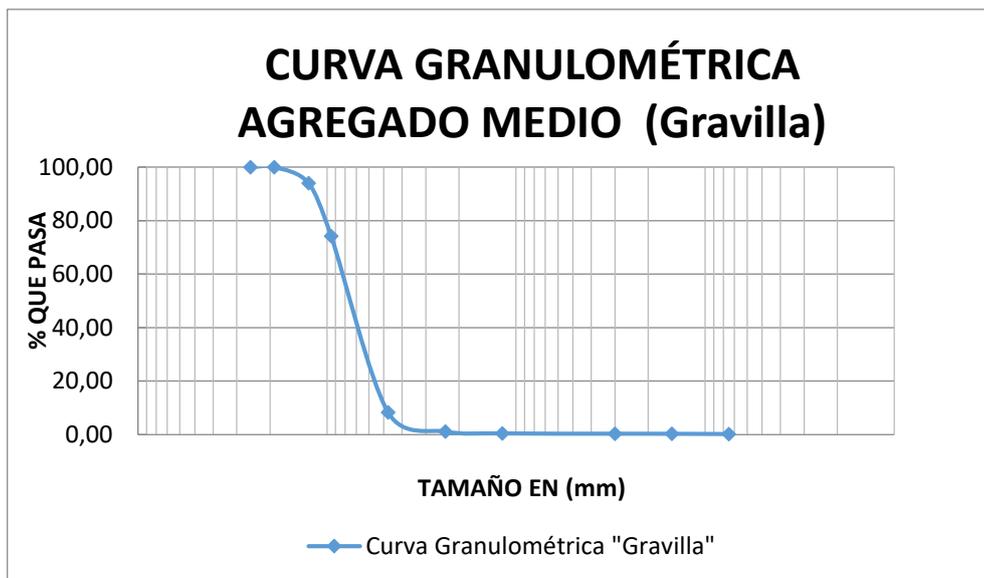
*Fuente: Elaboración Propia*

*Tabla 3.2: Granulometría del Agregado medio (gravilla)*

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

*Fuente: Elaboración Propia*

*Gráfico 3.2: Curva Granulometría del Agregado medio gravilla*



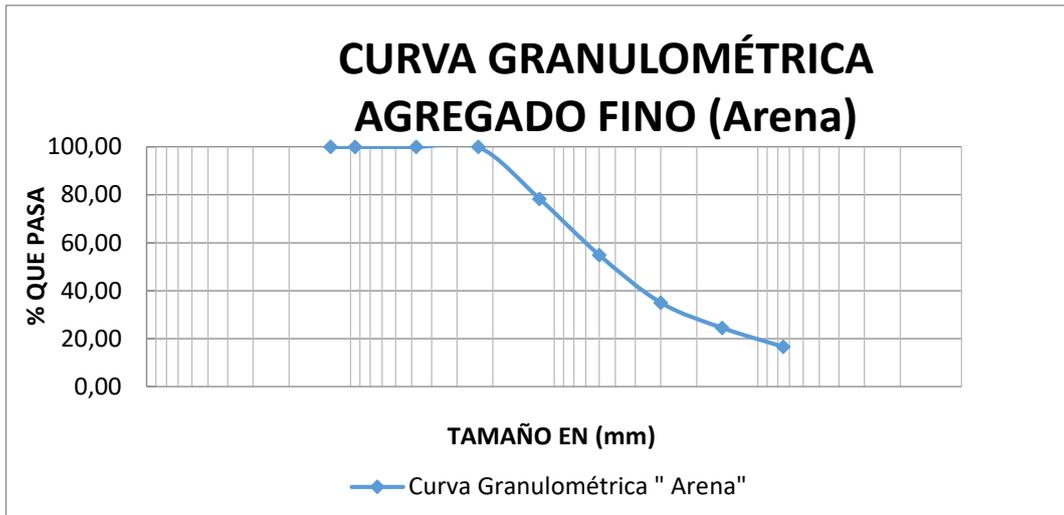
*Fuente: Elaboración Propia*

*Tabla 3.3: Granulometría del Agregado fino (arena)*

Peso Total (gr.)			3000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3/4	12,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1/2	9,50	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/8	4,75	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
N°4	2,36	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
N°8	1,18	649,42	649,42	21,65	<b>78,35</b>
N°16	0,60	704,89	1354,31	45,14	<b>54,86</b>
N°30	0,30	593,75	1948,06	64,94	<b>35,06</b>
N°50	0,15	315,30	2263,36	75,45	<b>24,55</b>
N°100	0,075	237,32	2500,68	83,36	<b>16,64</b>
N° 200	-	393,19	2893,87	96,46	<b>3,54</b>
BASE	-	104,45			
	<b>SUMA</b>	2998,3			
	<b>PÉRDIDAS</b>	1,7			

*Fuente: Elaboración Propia*

*Gráfico 3.3: Curva Granulométrica del Agregado fino (Arena)*



*Fuente: Elaboración Propia*

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

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

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

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

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

*Para el Desgaste de los Ángeles.*

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

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

*Fuente: Norma ASTM, C131.*

### **Procedimiento de ensayo:**

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



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.7: Pesar los materiales retenidos en las cantidades*

*Del método que corresponden*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.8: Introducir la muestra y las cargas abrasivas*

*En la Máquina de Los Ángeles*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.9: Sacar el material y las cargas abrasivas*



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

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

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

*Fuente: Elaboración Propia*

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

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

Fuente: Elaboración Propia

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

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

Fuente: Elaboración Propia

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

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACIÓN ASTM
A	-	-	-	35% MAX
B	-	-	-	35% MAX
C	5000	3825	23,50	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

Fuente: Elaboración Propia

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

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

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

#### PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

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

*El agregado retenido en el tamiz N°4*



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.13: Peso del material superficialmente seco*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.14: Obtención del peso sumergido en agua.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.15: Secado de la muestra en el horno.*



*Fuente: Elaboración Propia*

## **RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

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

Gravedad específica seca aparente $G_{sa}$	<b>2,58</b>	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica seca Bulk $G_{sb}$	<b>2,48</b>	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica saturada sup. Seca bulk $G_{sssb}$	<b>2,52</b>	gr/cm <sup>3</sup>
Absorción %	<b>1,48</b>	%

*Fuente: Elaboración Propia*

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

Gravedad específica seca aparente $G_{sa}$	2,6	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica seca Bulk $G_{sb}$	2,47	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica saturada sup. Seca bulk $G_{sssb}$	2,52	gr/cm <sup>3</sup>
Absorción %	1,94	%

*Fuente: Elaboración Propia*

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

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

#### Procedimiento del ensayo:

*Imagen 3.16: Se obtiene el material necesario*



*Fuente: Elaboración Propia*

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

*El material que pasa por el tamiz N°4*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.18: Secado superficial del material con secadora*



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

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



Fuente: Elaboración Propia

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



Fuente: Elaboración Propia

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

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

Gravedad específica seca aparente $G_{sa}$	2,67	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica seca Bulk $G_{sb}$	2,5	gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica saturada sup. Seca bulk $G_{ssb}$	2,54	gr/cm <sup>3</sup>
Absorción %	2,99	%

Fuente: Elaboración Propia

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

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm).

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el

recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

*Imagen 3.22: Equipo necesario para el ensayo*



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.24: Colocar la solución indicada hasta la medida*



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

## **RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

*Tabla 3.12: Tabla de resultados del equivalente de arena*

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,8	13,30	73,68
2	10,7	14,6	73,29
<b>Promedio</b>			<b>73,49</b>

*Fuente: Elaboración Propia*

### 3.3. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

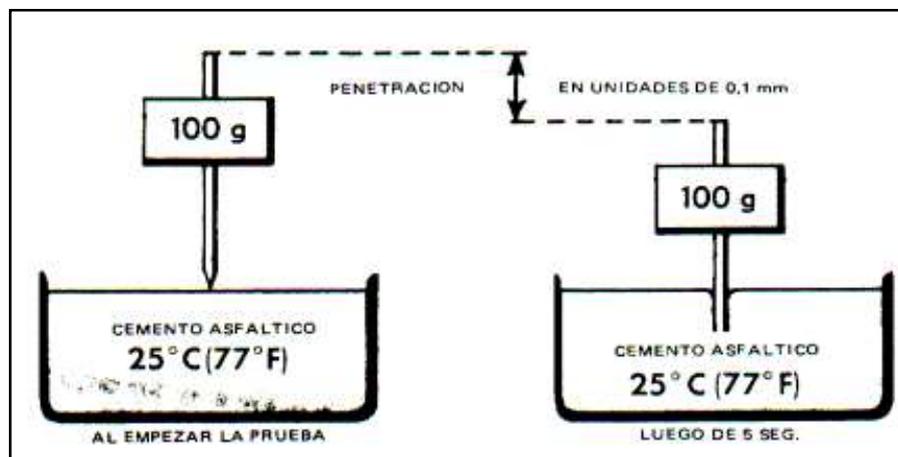
Para los ensayos de caracterización del cemento asfáltico, se realizaron con el mismo método, es decir se repite el mismo procedimiento tanto para el asfalto original como para el asfalto recalentado.

#### 3.3.1. Ensayo de Penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97)

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

La consistencia de un cemento asfáltico se mide mediante un ensayo de penetración. Durante éste ensayo se introduce una aguja de dimensiones específicas en una muestra de betún bajo una carga conocida (100 gr) a una temperatura fija (25 °C), durante un plazo de tiempo predeterminado (5 seg). Se denomina penetración a la distancia hasta la cual penetra la aguja, que se mide en décimas de milímetro/dmm (0.1 mm). Por lo tanto, cuanto mayor es la penetración de la aguja, más blando es el cemento asfáltico.

*Imagen 3.28: Ensayo de penetración*



*Fuente: Manual de carreteras*

*Imagen 3.29: Colocar el betún en taras*



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.13: Tabla de resultados del ensayo de Penetración del cemento asfáltico

<i>Cemento asfáltico original</i>								
ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	99	102	83	94,2	85	100
	Lectura N°2		97	97	86			
	Lectura N°3		96	99	89			
	Promedio		97,3	99,3	86,0			
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	106	95	95	93	85	100
	Lectura N°2		105	86	83			
	Lectura N°3		104	79	81			
	Promedio		105,0	86,7	86,3			
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	100	87	94	89,8	85	100
	Lectura N°2		99	81	89			
	Lectura N°3		104	79	75			
	Promedio		101,0	82,3	86,0			
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm)	Lectura N°1	mm	81	91	96			
	Lectura N°2		86	79	93			
	Lectura N°3		76	89	87			

AASHTO T-49	Promedio		81,0	86,3	92,0	86,4	85	100
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	101	71	79			
	Lectura N°2		95	76	81			
	Lectura N°3		80	79	83			
	Promedio		92,0	75,3	81,0	82,8	85	100
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	82	86	96			
	Lectura N°2		79	81	93			
	Lectura N°3		89	97	97			
	Promedio		83,3	88,0	95,3	89	85	100
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	83	83	93			
	Lectura N°2		85	85	85			
	Lectura N°3		96	90	81			
	Promedio		88,0	86,0	86,3	85,4	85	100
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	78	87	85			
	Lectura N°2		89	82	77			
	Lectura N°3		98	77	79			
	Promedio		88,3	82,0	80,3	82,7	85	100
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	75	87	79			
	Lectura N°2		73	93	80			
	Lectura N°3		78	91	75			
	Promedio		75,3	82,3	78,0	78,6	85	100

*Fuente: Elaboración Propia*

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

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

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

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



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

## **RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

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

<i>Cemento asfáltico original</i>
-----------------------------------

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad a135 °C Saybolt-Furol	SSF	195,0	189,0	192,1	192	250	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad a135 °C Saybolt-Furol	SSF	198,6	195,6	204,0	199,4	250	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad a135 °C Saybolt-Furol	SSF	204	191,3	220,0	205,1	250	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad a135 °C Saybolt-Furol	SSF	201,0	225	212,0	212,67	250	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad a135 °C Saybolt-Furol	SSF	215,2	218,0	228,0	220,4	250	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad a135 °C Saybolt-Furol	SSF	209,0	198,6	219,3	209	250	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad a135 °C Saybolt-Furol	SSF	214,0	209	227	216,7	250	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad a135 °C Saybolt-Furol	SSF	226	231,1	221,4	226,2	250	-

<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad a 135 °C Saybolt-Furol	SSF	236,3	229,6	245,0	237,0	250	-

*Fuente: Elaboración Propia*

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

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

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

Quitar el plato base y el molde lleno del baño de agua, y con un contemporizador caliente cortar el exceso el material bituminoso para que el molde simplemente esté lleno a nivel. Posteriormente quitar la briqueta del plato, despegar los pedazos laterales, e inmediatamente realizar el ensayo.

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



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

## **RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

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

<i>Cemento asfáltico original</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
	cm.	140	150	145	145	75	-

Ductilidad a 25°C AASHTO T-51								
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES		
						Mínimo	Máximo	
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	135	144	150	143	75	-	
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES		
						Mínimo	Máximo	
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	127	150	140	139	75	-	
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES		
						Mínimo	Máximo	
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	125	135	140	133	75	-	
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES		
						Mínimo	Máximo	
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	133	129	125	129	75	-	
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES		
						Mínimo	Máximo	
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	138	142	144	141	75	-	
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES		
						Mínimo	Máximo	
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	136	130	141	136	75	-	
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>								
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES		
						Mínimo	Máximo	
Ductilidad a 25°C	cm.	137	123	120	127	75	-	

AASHTO T-51							
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	125	118	129	124	75	-

*Fuente: Elaboración Propia*

### 3.3.4. Punto de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO 79-96)

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

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

El ensayo más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el de "Vaso Abierto Cleveland" (COC), que consiste en llenar un vaso de bronce con un determinado volumen de asfalto, y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados. El punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes volátiles como para provocar una inflamación instantánea.

*Imagen 3.37: Muestra en la copa de Cleveland*



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

## **RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

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

<i>Cemento asfáltico original</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	335	330		333	>232	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	298	305		302	>232	-

<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	307	312		310	>232	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	310	325		318	>232	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	323	320		322	>232	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	308	315		312	>232	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	320	312		316	>232	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	325	315		320	>232	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	328	325		327	>232	-

Fuente: Elaboración Propia

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

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

Consiste en cubrir la superficie de la base y los anillos un agente (glicerina). Por otro lado poner agua destilada en el vaso de precipitación lo suficiente como para que la muestra quede totalmente bañada en el agua destilada luego verter el cemento asfáltico a los anillos y dejar reposar, enfriar durante 30 minutos. Una vez enfriado el asfalto poner los anillos junto al poseedor en el vaso con agua destilada, por fuera alrededor del vaso colocar hielo para bajar la temperatura hasta 5°C. Para acabar de armar todo el equipo, es decir colocar los anillos, con las guías de centradoras de las esferas en el poseedor y poner a calentar para hacer el ensayo.

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



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.42: Alcanzada la temperatura de 5°C*

*Colocar las guías centradoras y las bolas de acero y calentar*



*Fuente: Elaboración Propia*

## **RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

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

<i>Cemento asfáltico original</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	43,0	44,0		44	43	53
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo

Punto de ablandamiento	°C	42,0	44,0		43	43	53
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
<b>ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENSAYO 1</b>	<b>ENSAYO 2</b>	<b>ENSAYO 3</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	43,0	47,0		45	43	53
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
<b>ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENSAYO 1</b>	<b>ENSAYO 2</b>	<b>ENSAYO 3</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	49,0	47,0		48	43	53
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
<b>ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENSAYO 1</b>	<b>ENSAYO 2</b>	<b>ENSAYO 3</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	47,0	52,0		50	43	53
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
<b>ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENSAYO 1</b>	<b>ENSAYO 2</b>	<b>ENSAYO 3</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	42,0	48,0		45	43	53
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
<b>ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENSAYO 1</b>	<b>ENSAYO 2</b>	<b>ENSAYO 3</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	47,0	48,0		48	43	53
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
<b>ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENSAYO 1</b>	<b>ENSAYO 2</b>	<b>ENSAYO 3</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	51,0	52,0		52	43	53
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
<b>ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENSAYO 1</b>	<b>ENSAYO 2</b>	<b>ENSAYO 3</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	55,0	52,0		54	43	53

Fuente: Elaboración Propia

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

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

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

*Imagen 3.43: Peso de los picnómetros vacíos*



*Fuente: Elaboración Propia*

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



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.45: Verter el cemento asfáltico en los picnómetros*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.46: Llenar con agua destilada cada uno de los picnómetros y Dejar en baño maría por 30 minutos también en agua destilada sacar y pesar*



*Fuente: Elaboración Propia*

## **RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

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

<i>Cemento asfáltico original</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,1	37,3	38,1			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,3	62,0	62,5			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	56,4	55,5	56,1			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	62,5	62,1	62,8			
Peso Específico	gr/cm3	<b>1,008</b>	<b>1,003</b>	<b>1,014</b>	<b>1,008</b>	1	1,05
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,2	37,5	38,1			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,1	62,2	62,4			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	56,7	57,9	57,4			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	62,9	62,3	62,8			
Peso Específico	gr/cm3	<b>1,042</b>	<b>1,002</b>	<b>1,018</b>	<b>1,021</b>	1	1,05
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,1	37,4	38,3			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,3	62,1	62,4			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	56,5	57,3	57,7			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	62,6	63,5	62,8			
Peso Específico	gr/cm3	<b>1,014</b>	<b>1,073</b>	<b>1,018</b>	<b>1,035</b>	1	1,05
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,1	37,2	38,2			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,5	62,4	62,6			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	57,5	57,6	57,8			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	63,9	63,4	64,1			
Peso Específico	gr/cm3	<b>1,075</b>	<b>1,048</b>	<b>1,080</b>	<b>1,068</b>	1	1,05
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD				PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	

		ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3		Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,1	37,0	38,0			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,4	62,2	62,5			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	57,7	57,9	57,6			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	64,8	63,6	64,8			
Peso Específico	gr/cm3	<b>1,136</b>	<b>1,069</b>	<b>1,130</b>	<b>1,112</b>	1	1,05
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,3	37,4	38,2			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,1	62,0	62,5			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	55,9	56,5	56,8			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	62,5	62,6	63,0			
Peso Específico	gr/cm3	<b>1,020</b>	<b>1,029</b>	<b>1,025</b>	<b>1,025</b>	1	1,05
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,21	37,3	38,2			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,3	62,5	62,8			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	56,7	55,2	57,7			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	63,7	63,2	63,2			
Peso Específico	gr/cm3	<b>1,079</b>	<b>1,038</b>	<b>1,018</b>	<b>1,045</b>	1	1,05
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,31	37,6	38,2			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,5	62,7	62,3			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	55,8	57,2	55,8			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	63,2	64,4	63,9			
Peso Específico	gr/cm3	<b>1,039</b>	<b>1,092</b>	<b>1,097</b>	<b>1,076</b>	1	1,05
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo

Peso Picnómetro	gr	38,2	37,9	38,4			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,3	62,7	62,3			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	55,8	57,1	56,8			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	63,8	64,8	64,7			
Peso Específico	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,090</b>	<b>1,120</b>	<b>1,147</b>	<b>1,119</b>	1	1,05

*Fuente: Elaboración Propia*

### 3.3.7. Ensayo de Destilación (ASTM D6997 AASHTO T59-97)

Este método generalmente se realiza para emulsiones asfálticas, para separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas volatilidades, o bien separar los materiales volátiles de los no volátiles. En este caso se lo realizó con el objetivo de conocer un valor aproximado de volátiles después de cada recalentamiento.

Es un ensayo en el cual se usa  $200 \pm 0,1$  gr de una muestra, por otro lado pesar el destilador, incluyendo la tapa, abrazadera, termómetros y empaquetadura. Luego introducir el asfalto en el destilador y aplicar calor con el quemador encendido y ajustado a la llama al mínimo; también aplicar calor con un quemador Bunsen al tubo conector, para prevenir la condensación de agua, mover el anillo quemador aproximadamente a nivel con el fondo cuando la temperatura leída en el termómetro fuera de aproximadamente  $215^{\circ}\text{C}$ . Incrementar la temperatura a  $260 \pm 5^{\circ}\text{C}$  manteniéndola por 15 min. La destilación total se completa en  $60 \pm 15$  min contados desde la primera aplicación de calor.

*Imagen 3.47: Pesar el destilador, incluyendo la tapa, abrazadera, termómetros y empaquetadura.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.48: Una vez que pesamos todo el destilador más la muestra verificar que el equipo esté bien armado y seguro, para luego poner a calentar*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.49: Una vez cumplido el tiempo determinado sacar y volver a pesar*



*Fuente: Elaboración Propia*

**RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

Tabla 3.19: Tabla de datos y resultados del ensayo de destilación

<i>Cemento asfáltico original</i>			
peso de destilador + termómetro + tapa + abrazadera + muestra			
peso antes del ensayo	gr	2501,7	
peso después del ensayo	gr	2498,9	
peso de destilación	gr	2,8	
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>			
peso de destilador + termómetro + tapa + abrazadera + muestra			
peso antes del ensayo	gr	2502	
peso después del ensayo	gr	2499,4	
peso de destilación	gr	2,6	
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>			
peso de destilador + termómetro + tapa + abrazadera + muestra			
peso antes del ensayo	gr	2502	
peso después del ensayo	gr	2499,6	
peso de destilación	gr	2,4	
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>			
peso de destilador + termómetro + tapa + abrazadera + muestra			
peso antes del ensayo	gr	2501,2	
peso después del ensayo	gr	2499,4	
peso de destilación	gr	1,8	
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>			
peso de destilador + termómetro + tapa + abrazadera + muestra			
peso antes del ensayo	gr	2501,6	
peso después del ensayo	gr	2500,2	
peso de destilación	gr	1,4	
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>			
peso de destilador + termómetro + tapa + abrazadera + muestra			
peso antes del ensayo	gr	2501,7	
peso después del ensayo	gr	2499,6	
peso de destilación	gr	2,1	
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>			
peso de destilador + termómetro + tapa + abrazadera + muestra			
peso antes del ensayo	gr	2500,9	
peso después del ensayo	gr	2499,2	
peso de destilación	gr	1,7	
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>			
peso de destilador + termómetro + tapa + abrazadera + muestra			
peso antes del ensayo	gr	2501,2	
peso después del ensayo	gr	2499,8	
peso de destilación	gr	1,4	
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>			
peso de destilador + termómetro + tapa + abrazadera + muestra			

peso antes del ensayo	gr	2501,2	
peso después del ensayo	gr	2500	
peso de destilación	gr	1,2	

*Fuente: Elaboración Propia*

### 3.3.8. Película Delgada Rotatoria (ASTM D 2872 AASHTO T 240-06)

El ensayo de película delgada rotatoria es un procedimiento que somete a las muestras del cemento asfáltico en un efecto de calor y aire, es decir a un envejecimiento a condiciones primarias. Similares al envejecimiento que ocurre en la mezcla con los agregados.

Para este ensayo se debe precalentar el horno antes de realizar el ensayo mínimamente 120 minutos. Por otro lado en otro horno calentar la muestra hasta una temperatura de 163°C. Verter el cemento asfáltico al recipiente y pesar un volumen de 35 gr y dejar reposar hasta que tenga una temperatura ambiente, con el horno estabilizado en 163°C proceder a introducir la muestra, para poder realizar el ensayo (el horno debe volver alcanzar los 163°C durante los primeros 10 minutos para proceder con el ensayo) en lapso de 75 minutos. Pasado el tiempo determinado retirar la muestra del horno y vaciar en una tara para poder realizar los ensayos correspondientes, después de 24 horas.

*Imagen 3.50: Precalentar el horno por 120 minutos previo al ensayo*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.51: verter el cemento asfáltico en el recipiente y pesar 35gr y dejar enfriar a temperatura ambiente*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.52: realizar el ensayo por un lapso de 75 min y luego sacar y vaciar en una tara para hacer los ensayos*



*Fuente: Elaboración Propia*

## **RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

*Tabla 3.20: Tabla de datos y resultados del ensayo de película delgada*

<i>Cemento asfáltico original</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración después del ensayo 25°C	mm	58,0	62,0	65,0	62	47	-
Viscosidad después del ensayo 135°C	SSF	225			225	-	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
						ESPECIFICACIONES	

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	Mínimo	Máximo
Penetración después del ensayo 25°C	mm	58,0	60,0	53,0	57	47	-
Viscosidad después del ensayo 135°C	SSF	232			232	-	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración después del ensayo 25°C	mm	49,0	47,0	58,0	51	47	-
Viscosidad después del ensayo 135°C	SSF	243			243	-	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración después del ensayo 25°C	mm	46,0	43,0	49,0	46	47	-
Viscosidad después del ensayo 135°C	SSF	251			251	-	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 150°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración después del ensayo 25°C	mm	46,0	41,0	37,0	41	47	-
Viscosidad después del ensayo 135°C	SSF	268			268	-	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 6 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración después del ensayo 25°C	mm	41,0	51,0	47,0	46	47	-
Viscosidad después del ensayo 135°C	SSF	231			231	-	-

<i>Cemento asfáltico recalentado 15 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración después del ensayo 25°C	mm	40,0	46,0	38,0	41	47	-
Viscosidad después del ensayo 135°C	SSF	254			254	-	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 24 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración después del ensayo 25°C	mm	39,0	41,0	38,0	39	47	-
Viscosidad después del ensayo 135°C	SSF	267			267	-	-
<i>Cemento asfáltico recalentado 48 horas a 180°C y enfriado 24 horas</i>							
ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración después del ensayo 25°C	mm	35,0	34,0	39,0	36	47	-
Viscosidad después del ensayo 135°C	SSF	274			286	-	-

*Fuente: Elaboración Propia*

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

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

El propósito del método de dosificación Marshall es determinar el contenido óptimo de betún para una combinación específica de áridos. Se trata de un ensayo mecánico que consiste en romper probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de altura y compactadas mediante un martillo de peso y altura de caída normalizados. Posteriormente se calientan a una temperatura de 60°C y se rompen en la prensa Marshall mediante la aplicación de una carga vertical a través de una mordaza perimetral y una velocidad de deformación constante de 50,8 mm/min para determinar su estabilidad y deformación. Este método establece densidades y contenidos óptimos de huecos que se han de cumplir durante la construcción del pavimento. Es importante saber que este ensayo es uno de los más conocidos y utilizados tanto para la dosificación de mezclas bituminosas como para su control en planta mediante la verificación de los parámetros de diseño de las muestras tomadas. Usualmente se preparan tres probetas para cada contenido de asfalto.

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

Para la confección de las briquetas se debe primero tamizar todo el agregado que será utilizado y tener en bolsas separadas, antes de pesar el agregado deberá secarse hasta obtener peso constante entre 105°C y 110°C. Sobre la base del peso de 1200 gr que debe pesar cada muestra antes de compactar, se preparan las proporciones separadas para cada una de las 18 probetas, colocando las cantidades necesarias de los agregados.

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

Se retira los agregados del horno previamente pesados y se añade el cemento asfáltico mezclando hasta obtener una muestra homogénea la misma debe realizarse a una temperatura inferior en 10 a 20°C a la del calentamiento del cemento asfáltico. Luego se coloca en el molde y estando todo caliente se compacta con 75 golpes a cada cara de la briqueta, retirar la probeta del molde y dejar enfriar al aire para luego ser ensayada dentro de las 24 horas subsiguientes.

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



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.54: Pesar los agregados, las cantidades necesarias la granulometría*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.55: Una vez calientes a las temperaturas determinadas mezclar*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.56: Una vez calientes a las temperaturas determinadas mezclar*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.57: Compactar con 75 golpes cada lado, desmoldar y dejar enfriar*



*Fuente: Elaboración Propia*

### **3.4.1 Determinación de la Densidad, Estabilidad y Fluencia Marshall**

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

## Determinación de la Densidad

*Imagen 3.58: Medir sus alturas y pesar en su estado seco al aire libre.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.59: Briquetas en baño maría a 25°C por 5 min.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.60: Pesar las briquetas saturadas con superficie seca.*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.61: Determinación del peso sumergido en el agua.*



*Fuente: Elaboración Propia*

### **Determinación de la Estabilidad y Fluencia**

*Imagen 3.62: Poner en baño maría a 60°C por 35 min para cada una*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Imagen 3.63: Colocar las briquetas en la mordaza y lectura del dial de Estabilidad (dentro del anillo Marshall) y el dial de deformación para el Flujo.*



*Fuente: Elaboración Propia*

## RESULTADO DE LA PRÁCTICA

El procedimiento detallado de cada uno de los cálculos y gráficas realizado para determinar el contenido óptimo del cemento asfáltico se verá registrado en el Anexo3

*Tabla 3.21: Resultados del ensayo Marshall para determinar el contenido optimo*

PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO (Pulg)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
5,0	2,28	2960,02	10,37	6,50	63,49	17,80
5,5	2,29	3167,87	10,64	5,16	70,82	17,68
6,0	2,31	3298,17	10,96	3,72	78,73	17,48
6,5	2,30	3262,94	11,22	3,39	81,40	18,24
7,0	2,29	3134,47	11,29	3,38	82,46	19,26
7,5	2,24	3029,38	11,48	4,53	78,65	21,22
PROMEDIO	2,29	3142,14	10,99	4,45	75,92	18,61
PROMEDIO FINAL	<b>5,8</b>					

EL PORCENTAJE ÓPTIMO DEL CEMENTO ASFÁLTICO ES DE 5,8%

*Fuente: Elaboración Propia*

### 3.5. CONFECCIÓN DE BRIQUETAS CON CEMENTO ASFÁLTICO RECALENTADO

Una vez obtenido el contenido óptimo del cemento asfáltico, se confecciona briquetas con cemento asfáltico recalentado 6, 15, 24, 48 horas a dos temperaturas de 150°C Y 180°C, para poder estudiarlas y analizar su comportamiento de las mismas.

Se confeccionaron usando el método Marshall, el mismo método que se realizó para obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico, por lo tanto se siguió el mismo procedimiento mencionado en el punto 3.4 de acuerdo al Manual de Carreteras (documento de referencia: ASTM D-15 59).

Se realizaron 8 muestras para cada tiempo de recalentamiento, siendo la variante el cemento asfáltico recalentado a distintos tiempos. Con los resultados se analizaron la estabilidad, la fluencia y el porcentaje de vacíos ya que para el método Marshall son los parámetros fundamentales que se deben tomar en cuenta.

Se realizaron gráficas para ver su comportamiento con respecto al tiempo de recalentamiento.

Estabilidad vs Tiempo de Recalentamiento

Flujo vs Tiempo de Recalentamiento

% de Vacíos vs Tiempo de Recalentamiento

Los cálculos y resultados de las mezclas asfálticas diseñadas con asfalto recalentado se verán registrados en Anexo 5

## CAPITULO IV

### 4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados y análisis de los ensayos realizados tanto para el cemento asfáltico como para las mezclas asfálticas (briquetas). Todos los ensayos se lo realizaron de acuerdo al Manual de Carreteras V4A.

Para poder analizar mejor los resultados ver Tabla 4.1 en la misma que se presenta las especificaciones de los cementos asfálticos según norma y la Tabla 4.2 en la que se observa la calidad del cemento asfáltico según el peso específico.

*Tabla 4.1: Ensayos de laboratorio Normalizados para Asfaltos*

CARACTERISTICAS	Metodo de ensayo AASHO	Metodo de ensayo ASTM	TIPOS				
			Industriales y especiales	pavimentacion			
Penetracion 25°C, 100gr, 5 seg	T-49	D-5	40-50	60-70	85-100	120-150	200-300
Viscosidad a 135°C							
Saybolt-furol, SSF	-	E-102	120+	100+	85+	70+	50+
Cinematica, centistokes	-	D-445	240+	200+	170+	140+	100+
Punto de inflamacion (vaso abierto cleveland) °C	T-48	D-92	232+	232+	232+	232+	177+
Ensayo en horno en pelicula delgada penetracion despues del ensayo 25°C	T-179	-	-	-	-	-	-
100 gr, 5 seg, % de la original	T-49	D-5	52+	50+	45+	42+	37+
Ductilidad							
A 25°C, cms.	T-51	D-113	100+	100+	100+	60+	-
A 15,6 C, cms.	-	-	-	-	-	-	60+
solubilidad en C Cl, %	T-44°	D-4°	99,5+	99,5+	99,5+	99,5+	99,5+

*Fuente: The Asphalt Institute.*

*Tabla 4.2: Ensayos de laboratorio Normalizados para Asfaltos*

Peso específico D 25°C	CALIDAD
1,023	Muy buena
0,983	Regular
0,975	Mala

*Fuente: YPF (Seminario técnico asfalto y sus aplicaciones)*

#### **4.1.1. Análisis y Resultados de los Ensayos del Cemento Asfáltico Original y Recalentados**

*Tabla 4.3: Tabla de resultados de caracterización del Cemento asfáltico original*

<b>CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO ORIGINAL</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>RESULTADO</b>
Peso específico	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,008</b>
Punto de inflamación	°C	<b>296,0</b>
Ductilidad	cm	<b>145,0</b>
Penetración	mm	<b>94,2</b>
Viscosidad	SSF	<b>192,0</b>
Punto de ablandamiento	°C	<b>43,5</b>
Destilación	gr	<b>2,8</b>
E. de película delgada en horno rotatorio		
Penetración después del ensayo	mm	<b>61,7</b>
Viscosidad después del ensayo	SSF	<b>218,0</b>
% Retenido de penetración	%	<b>65,4</b>
I.E después del ensayo de película delgada		<b>1,14</b>

*Fuente: Elaboración Propia*

Una vez realizados los ensayos de caracterización del asfalto original se tiene los resultados mostrados en la Tabla 4.3. En la misma que se observa que el peso específico está dentro de los rangos aceptables el mismo es mayor a uno, siendo 1,008 gr/cm<sup>3</sup> y según la Tabla 4.2 se trataría de un asfalto de muy buena calidad.

El punto de inflamación es de 296°C, es decir es la temperatura a la cual el cemento asfáltico utilizado para los ensayos puede ser calentado sin presentar peligro de incendio en presencia de una chispa, y según la Tabla 4.1 del Manual del Instituto del Asfalto, para cementos asfálticos de penetración 85-100 mm la mínima temperatura aceptada es de 232°C. Por lo que se puede verificar que el dato obtenido se encuentra dentro del rango de aceptabilidad, dando a conocer que no existe peligro en la utilización o manipulación de los ensayos realizados en los laboratorios.

Analizando los resultados de los demás ensayos como ser el de la ductilidad, el mismo que se realiza para conocer la consistencia de los cementos asfálticos, es decir el grado de fluidez que tiene un asfalto a una determinada temperatura, se puede decir que también se encuentra dentro del rango de aceptabilidad como se puede observar en la Tabla 4.3 es de 145 cm. Y según las especificaciones técnicas deben superar los 100 cm (ver Tabla 4.1).

En cuanto a la penetración del cemento asfáltico como se presenta en la Tabla 4.3 esta es de 94,2 mm siendo el promedio de tres ensayos. De la misma manera se puede decir que cumple con las especificaciones técnicas exigidas para garantizar la calidad del cemento asfáltico.

Otra de las propiedades importantes del asfalto es la viscosidad, que generalmente repercute en la trabajabilidad del mismo, esta presenta un valor de 192 SSF, por lo cual es aceptable por que según las especificaciones técnicas exigidas por el Manual del Instituto de Asfaltos, esta debe superar los 85 SSF, esto para garantizar un buen grado de fluidez en el momento de trabajar.

Como se conoce los cementos asfálticos son termoplásticos, es decir a presencia de altas temperaturas cambia su estado de sólido a líquido y en uno de los ensayos que se observa este fenómeno es en el punto de ablandamiento que es la temperatura a la cual el cemento asfáltico no puede soportar la carga de una bola de acero y comienza a fluir, con respecto a dicha característica se puede decir que cumple satisfactoriamente ya que presenta un valor de 43.5°C que según la norma debe superar los 43°C.

El ensayo de destilación generalmente se realiza a los cementos asfálticos diluidos, para medir las proporciones de los disolventes; en este trabajo de investigación llevo a cabo con el fin de verificar la pérdida de solventes más livianos, mediante la diferencia de peso inicial y final del ensayo y como se puede observar en los cálculos en el (Anexo3) Se verifica que existe dicha perdida con un valor de 2,8 gr. (ver Tabla 4.3)

Con respecto al ensayo de película delgada, se hizo con la finalidad de simular en el laboratorio las condiciones que producen un aumento de la consistencia del cemento asfáltico *durante las operaciones de mezclado en planta y colocado en obra*, lo que significa poder medir el envejecimiento del cemento asfáltico durante estas operaciones y como se puede ver presenta un valor de envejecimiento de 1.14. La penetración después

del ensayo es de 61.7 mm y su viscosidad es de 218 SSF, con lo que se puede decir que se torna más duro y más viscoso.

*Tabla 4.4: Tabla de ensayos de caracterización del cemento asfáltico recalentado a 150°C durante 6, 15, 24 y 48 horas*

ENSAYO A 150°C	UNIDAD	6	15	24	48
		HORAS	HORAS	HORAS	HORAS
Peso específico	gr/cm <sup>3</sup>	1,021	1,035	1,068	1,112
Punto de inflamación	°C	302	310	318	322
Ductilidad	cm	143	139	133	129
Penetración	mm	93	89,8	86,4	82,8
Viscosidad	SSF	199,4	205,1	212,7	220,4
Punto de ablandamiento	°C	43,0	45	48	50
Destilación	gr	2,6	2,4	1,80	1,4
Índice de envejecimiento		<b>1,04</b>	<b>1,07</b>	<b>1,11</b>	<b>1,15</b>
% Retenido de penetración	%	<b>98,35</b>	<b>95,28</b>	<b>91,75</b>	<b>87,85</b>
E. de película delgada en horno rotatorio					
Penetración después del ensayo	mm	57	51	46	41
Viscosidad después del ensayo	SSF	232	243	251	268
I.E después del E. de película delgada		1,21	1,27	1,31	1,40

*Fuente: Elaboración Propia*

Después de realizar los ensayos de caracterización de las muestras recalentadas durante 6, 15, 24, 48 horas se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.4 en la misma que se ve el comportamiento del peso específico, el mismo que incrementa a medida que aumentan las horas de recalentamiento. No presenta una amplia variación el uno del otro, pero efectivamente existe tal incremento.

Con respecto al ensayo de seguridad de los cementos asfálticos como ser el punto de inflamación, éste también presenta un incremento a medida que se va aumentando el tiempo de recalentamiento, sin embargo, se mantiene dentro de los parámetros de aceptabilidad según normas por lo cual se garantiza que no existe peligro de incendio en los ensayos que se realizó con este cemento asfáltico.

En la misma Tabla 4.4 a medida que se aumenta el tiempo de recalentado algunas de sus propiedades van mejorando se podría decir, pero otras decrecen; tal es el caso de la ductilidad que va variando su estado de flujo, pero de igual manera cumple con las

especificaciones indicadas en la Tabla 4.1 supera los 100 cm, por lo tanto según la ductilidad se puede calentar hasta 48 horas y la ductilidad seguirá dentro de los parámetros requeridos.

Uno de los ensayos que sirven para medir su consistencia es la penetración, la misma que decrece y se puede ver de manera concreta que no se puede recalentar el cemento asfáltico más de las 24 horas en el caso de recalentar a una temperatura de 150°C debido a que ya no cumple con las exigencias requeridas en la norma, por lo tanto ya no garantizará la buena calidad del asfalto. Como en este trabajo de investigación se está tratando con un cemento asfáltico que se clasifica según su penetración (85-100 mm), entonces esta propiedad será de mayor importancia, siendo como una limitante.

Otra de las características importantes es la viscosidad del cemento asfáltico, presentado en la misma tabla ésta aumenta, es decir a mayor tiempo de recalentado mayor viscosidad del cemento asfáltico. En cuanto al comportamiento del punto de ablandamiento, este se presenta de manera similar a de la viscosidad, sin embargo, se mantiene dentro de los rangos requeridos. La destilación por su parte baja a medida que aumenta el tiempo de recalentado (ver Tabla 4.4).

Analizando lo que viene a ser el índice de envejecimiento éste es directamente proporcional, es decir a mayor tiempo de exposición en el horno del cemento asfáltico mayor será su pérdida de volátiles, ocasionando un incremento del 10,6% de índice de envejecimiento del asfalto recalentado a 6 horas con respecto al de 48 horas (ver Tabla 4.4). Por su parte en el ensayo de película delgada presenta una disminución considerable de su penetración saliendo totalmente de los parámetros de aceptación según norma y un correspondiente aumento de la viscosidad, por lo mismo aumenta también el índice de envejecimiento a un 5% más que el envejecimiento por oxidación del asfalto, siendo así un 15% .

*Tabla 4.5: Ensayos de caracterización del cemento asfáltico recalentado a 180°C durante 6, 15, 24 y 48 horas*

ENSAYO A 180°C	UNIDAD	6	15	24	48
		HORAS	HORAS	HORAS	HORAS
Peso específico	gr/cm <sup>3</sup>	1,025	1,045	1,076	1,119
Punto de inflamación	°C	312	316	320	327
Ductilidad	cm	141	136	127	124
Penetración	mm	89	85,4	82,7	78,6

Viscosidad	SSF	209,0	216,7	226,2	237,0
Punto de ablandamiento	°C	45,0	48	51,50	53,5
Destilación	gr	2,1	1,7	1,40	1,20
Índice de envejecimiento		<b>1,09</b>	<b>1,13</b>	<b>1,18</b>	<b>1,23</b>
% Retenido de penetración	%	<b>94,34</b>	<b>90,68</b>	<b>87,74</b>	<b>83,37</b>
E. de película delgada en horno rotatorio					
Penetración después del ensayo	mm	46	41	39	36
Viscosidad después del ensayo	SSF	231	254	267	286
I.E después del E. de película delgada		1,203	1,323	1,390	1,489

*Fuente: Elaboración Propia*

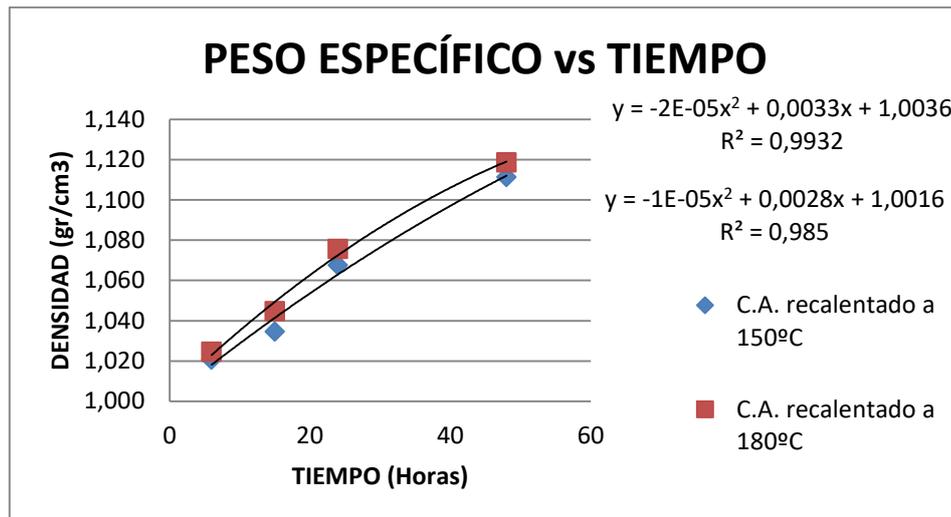
Siguiendo con la misma metodología se realizó los recalentamientos a una mayor temperatura de 180°C (ver Tabla 4.5) en la misma que se muestran los resultados siguientes:

El comportamiento del peso específico, del punto de inflamación, el punto de ablandamiento y la viscosidad es similar al que se muestra en la anterior tabla, estas características son directamente proporcionales, a mayor tiempo de recalentamiento, mayor es el efecto de cada una de ellas.

Según las Tablas 4.4 y 4.5 existe una variación notoria que a mayor temperatura mayor será el índice de envejecimiento del cemento asfáltico ya que el mismo aumenta un 6.9% con respecto a la temperatura de 150°C A 180°C, perdiendo su consistencia (disminuyendo su penetración y ductilidad), si se observa en la Tabla 4.5 según ésta no se podrá recalentar el asfalto a más de 15 horas ya que el mismo presenta una penetración de 85.4 mm por lo tanto no cumpliría con las exigencias de la norma, y no se garantizará un cemento asfáltico de buena calidad.

Su evolución de las características del cemento asfáltico, sometido a dos ciclos de calentamiento- enfriamiento a temperaturas de 150°C y 180°C respectivamente durante tiempos de recalentamiento variables de 6, 15, 24 y 48 horas se observa en las siguientes gráficas.

*Gráfico 4.1: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento de la densidad del mismo*



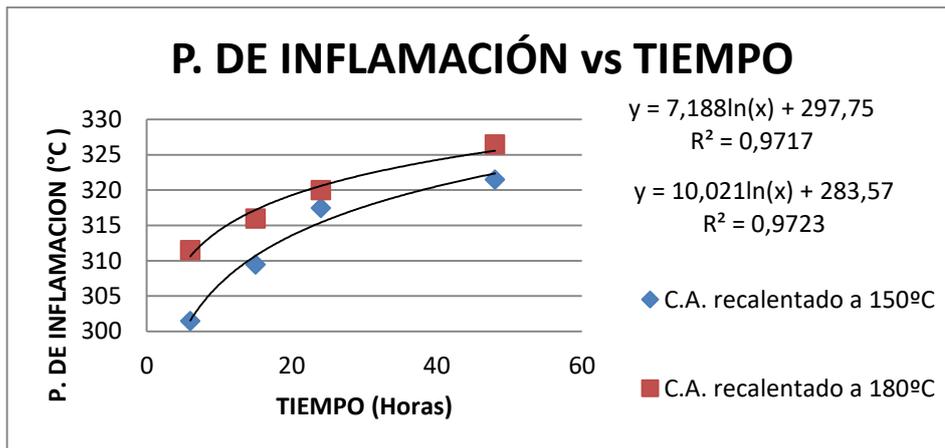
*Fuente: Elaboración Propia*

El peso específico del cemento asfáltico, incrementa hasta un máximo de 1,112 gr/cm<sup>3</sup> a las 48 horas esto para 150°C y 1,119 gr/cm<sup>3</sup> para 180°C de exposición en el horno, esto se debe a que disminuye su volumen para una masa casi constante por lo tanto varía de manera creciente.

De acuerdo a la Gráfica 4.1 se puede observar que el peso específico del asfalto, recalentado a una temperatura de 180°C es mayor que cuando es recalentado a 150°C, es decir será proporcional a mayor temperatura mayor peso específico del cemento asfáltico.

De forma similar en la Gráfica 4.2 se presenta el **punto de inflamación**, según los resultados de los ensayos realizados, podemos observar que el punto de inflamación, va aumentado hasta una temperatura de 322°C a las 48 horas, esto cuando se trabaja con una temperatura de 150°C y 327°C para cuando se recalienta a una temperatura de 180°C, es decir durante el proceso de recalentamiento el cemento asfáltico tiende a perder un cierto porcentaje de volátiles más livianos, por lo tanto en los primeros recalentamientos existirá mayor cantidad de volátiles por lo que se encontrará más sensible a incendiarse a la presencia de una chispa y a medida que incrementa el tiempo de recalentamiento disminuirán la cantidad de volátiles por lo que se necesitara mayor temperatura para llegar al punto de inflamación.

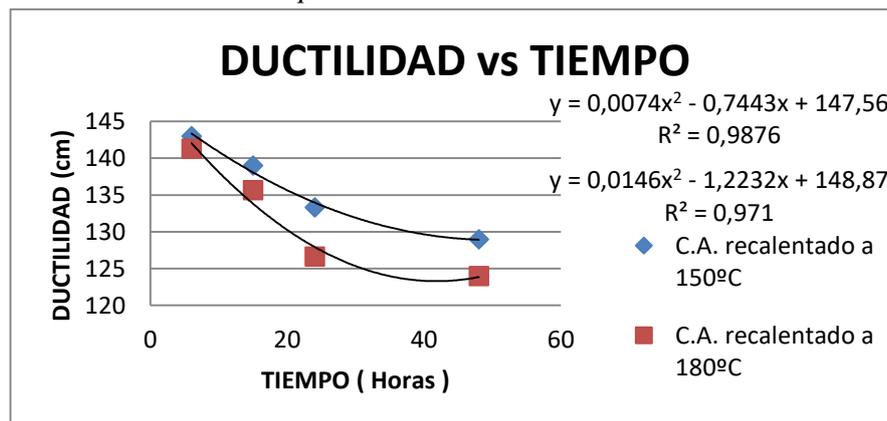
*Gráfico 4.2: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento del punto de inflamación.*



*Fuente: Elaboración Propia*

Se tiene también el ensayo de **ductilidad**, que es la capacidad para mantenerse coherente bajo las grandes deformaciones inducidas por el tránsito.

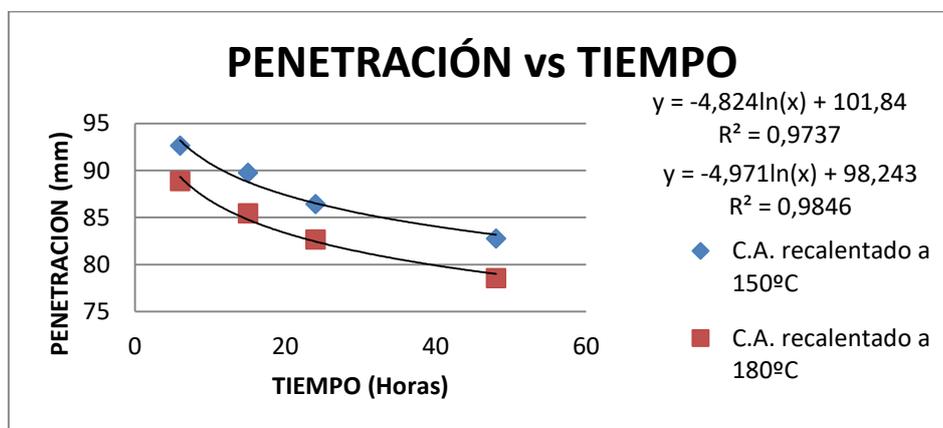
*Gráfico 4.3: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento de la ductilidad*



*Fuente: Elaboración Propia*

en cuanto al comportamiento de la ductilidad del cemento asfáltico se puede ver en la Gráfica 4.3 que a mayor tiempo de recalentamiento, presenta menor ductilidad tanto para 150°C como para 180°C disminuyendo desde 143 cm a 129 cm y desde 141 cm a 124cm respectivamente, esto se debe a la pérdida de resinas y aceites ocasionados por el proceso de recalentamiento del cemento asfáltico que estamos utilizando para el ensayo, en las primeras horas de recalentamiento entre 6 y 15 horas se observa que varían menos el uno del otro respectivamente con relación a las 24 y 48 horas de recalentamiento esto se debe a que a que las moléculas del cemento asfáltico no se están comportándose de manera uniforme.

Gráfico 4.4: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento de la penetración.



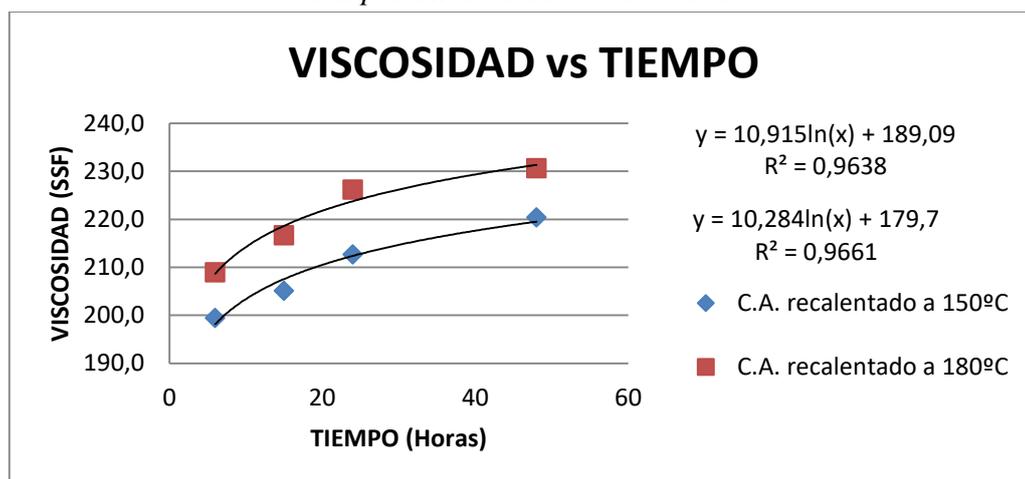
Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la Gráfica 4.4 se tiene la penetración a las dos temperaturas que se trabajó y esta característica disminuye a medida que aumenta el tiempo de recalentado de 93 mm a 82,8 mm y de 89 mm a 78,6 mm haciéndose notar que en ambos casos el cemento asfáltico pierde su calidad antes de las 48 horas de recalentado, esto a causa del proceso de oxidación, a mayor tiempo de recalentamiento mayor pérdida de solventes más livianos como ser aceites y resinas que son componentes muy importantes del asfalto que proporcionan características cementantes y de consistencia al cemento asfáltico, por lo tanto el asfalto va perdiendo el grado de fluidez tornándose más duro y quebradizo.

Y como se puede observar en la gráfica a mayor temperatura 180°C mayor pérdida de consistencia.

Una de las propiedades que más interesan desde el punto de vista ingenieril es la viscosidad de los cementos asfálticos, ya que es la resistencia que ofrece un fluido a la deformación, debida básicamente al rozamiento interno de las moléculas.

*Gráfico 4.5: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento de la viscosidad.*

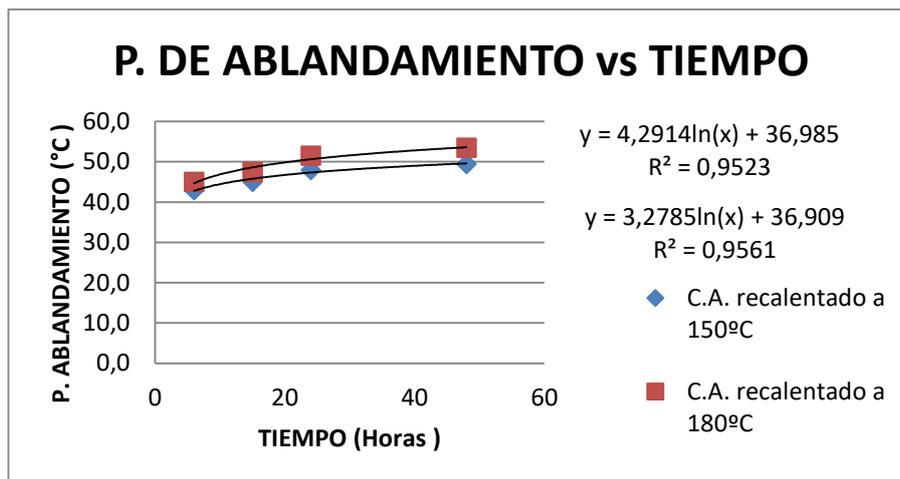


*Fuente: Elaboración Propia*

Según el Gráfico 4.5 el comportamiento de la viscosidad del cemento asfáltico para 150 y 180°C tiende incrementarse a medida que aumenta el tiempo de recalentamiento de 199,4 a 220,4 SSF y de 209 a 237 SSF, que se debe a la reducción gradual de los aceites a medida que aumenta el tiempo de recalentamiento, esto hace que se permita un acercamiento entre los núcleos de los asfaltenos y la fricción originada lo cual hace que el asfalto incremente su viscosidad, es decir a mayor tiempo de recalentamiento del cemento asfáltico menor será el grado de fluidez .

El punto de ablandamiento es otra de las características del cemento asfáltico, que según el Gráfico 4.6 también se incrementa a medida que aumenta el tiempo de recalentamiento desde 43 a 50°C y desde 45 a 53,5°C pero no presenta una amplia variación, de las temperaturas tomadas entre los puntos de ablandamiento tanto a 150°C como a 180°C.

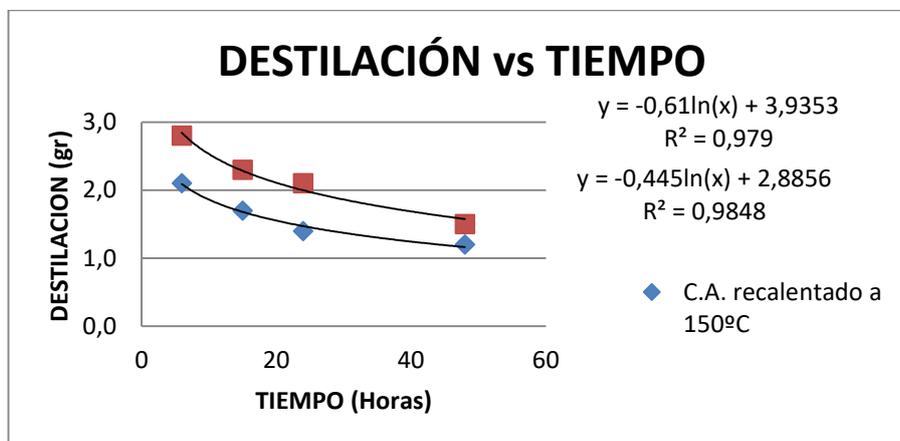
*Gráfico 4.6: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento del punto de ablandamiento*



*Fuente: Elaboración Propia*

Al igual que la viscosidad el punto de ablandamiento es un ensayo que lo realiza para medir la consistencia de los cementos asfálticos y los responsables de dicha característica son los aceites presentes en los asfaltos, por lo tanto al reducir los aceites a medida que se recalienta el cemento asfáltico aumenta el punto de ablandamiento, es decir se torna más duro aumentando la temperatura que permite la caída de una esfera.

*Gráfico 4.7: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento de la destilación*

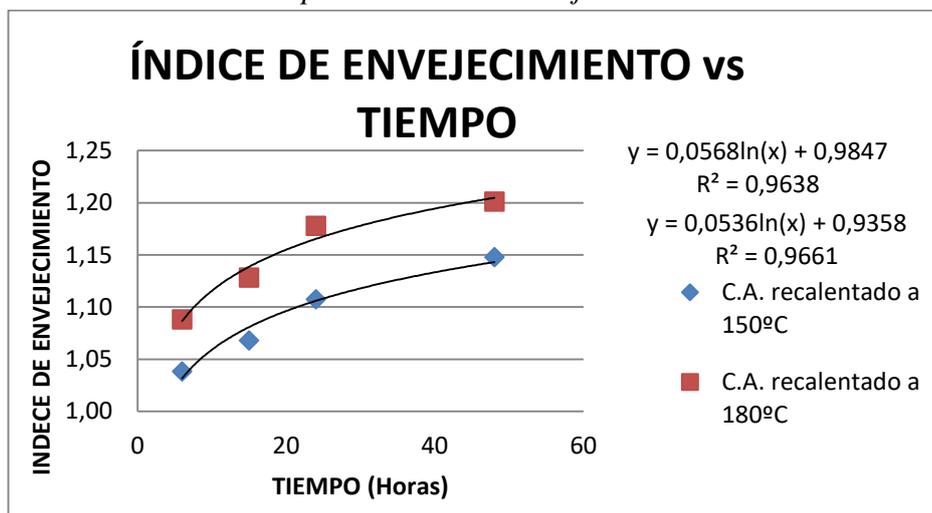


*Fuente: Elaboración Propia*

En cuanto a la destilación es un ensayo que se realiza generalmente en asfaltos diluidos para determinar las proporciones relativas de betún asfáltico y disolventes presentes en el asfalto fluidificado. En este trabajo de investigación se lo realizó con el fin de conocer un valor aproximado de pérdidas de volátiles mediante los procesos de recalentamiento, como se puede observar en la Gráfica 4.7 presenta una menor destilación a medida que aumenta el tiempo de recalentamiento esta baja desde 2,6 a 1,4 gr en el caso que se trabaja

con 150°C de temperatura y desde 2,1 a 1,20 gr en el caso de 180°C. (Ver Tablas 4.4 y 4.5)

*Gráfica 4.8: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento del envejecimiento*

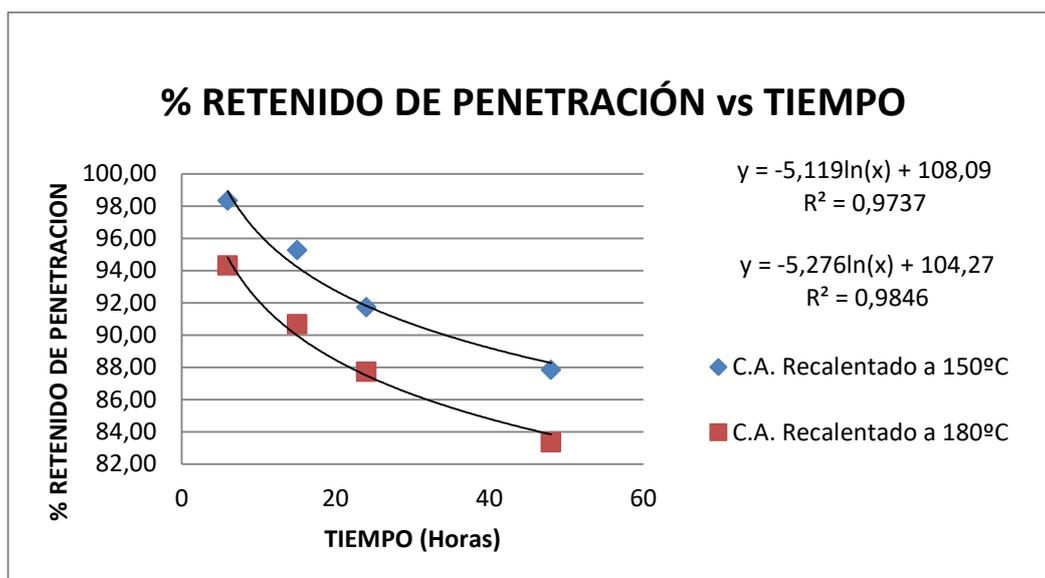


*Fuente: Elaboración Propia*

Mediante los resultados observados se puede mencionar, que al recalentar el cemento asfáltico ya sea a una temperatura de 150°C o a una temperatura de 180°C, tiene un efecto de envejecimiento debido a que el asfalto estuvo en un proceso de ciclos de calentamiento – enfriamiento, es decir hubo un proceso de oxidación, lo cual provoca un índice de envejecimiento del mismo debido al cambio de sus características, mismas que no fueron de gran magnitud, pero se presentaron cambios, como se observa a mayor temperatura presentará mayor índice de envejecimiento según el Gráfico 4.8.

Los índices de envejecimiento en los dos casos incrementan a mayor tiempo de recalentamiento en el primero de 1,04 a 1,15 y en el segundo de 1,9 a 1,23.

*Gráfica 4.9: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento porcentaje retenido de penetración*



*Fuente: Elaboración Propia*

Otra manera de cuantificar el envejecimiento del cemento asfáltico es en términos del porcentaje retenido de penetración como se observa en el gráfico 4.9 esta baja a medida que aumenta el tiempo de recalentamiento, comportándose inversamente proporcional al índice de envejecimiento.

#### 4.1.2. Análisis y Resultados de los Ensayos de Estabilidad, Fluencia y Vacíos

*Tabla 4.6: Límites sugeridos para los resultados de los ensayos1*

MÉTODO DE PROYECTO	Tráfico pesado y muy pesado		Tráfico medio		Tráfico ligero	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>MARSHALL</b>						
Número de golpes de compactación en cada extremo de la probeta	75		50		35	
Estabilidad, libras	1800	-	1800	-	750	-
Fluencia <sup>2</sup> , expresada en 0,01 pulg	8	14	8	14	8	18
Huecos en la mezcla total % capaz de superficie o nivelación	3	5	3	5	3	5
sheet asphalt con arena o piedra	3	8	3	8	3	8
Capa intermedia o base	3	8	3	8	3	8

Huecos de los áridos rellenos de asfalto%						
Capaz de superficie o nivelación sheet asphalt con arena o piedra	75	82	75	85	75	85
Capa intermedia o base	65	72	65	75	65	75
<b>HUBBARD-FIEL</b>						
Método original						
Estabilidad, libras	2000	-	1200	2000	1200	2000
Huecos en la mezcla total, %	2	5	2	5	2	5
Método modificado						
Estabilidad, libras	3500	6000	2500	6000	2500	6000
Huecos en la mezcla total, %	2	5	2	5	2	5
<b>HVEEM</b>						
Valor de estabilometro	35	-	35	-	35	-
Valor de cohesiómetro	50	-	50	-	50	-
Entumescimiento, pulgadas	-	0,03	-	0,03	-	0,03
Huecos de mezcla total %	4	-	4	-	4	-
<b>METODO TRIAXIAL DE SMITH</b>						
Cohesión unitaria, C, libras por pulg <sup>2</sup>						
Angulo de rozamiento interno, grados						
Huecos en la mezcla total, %		10	5	10	5	10

<sup>1</sup> criterios aplicables solamente cuando el ensayo se hace de acuerdo con los métodos descritos en la publicación del instituto de asfalto.

<sup>2</sup> se sugiere que en las paradas de autobuses, cruces y zonas similares se especifique el empleo de valores de fluencia próximos al mínimo.

Fuente: The Asphalt Institute.

Tabla 4.7: Resultados de la mezcla confeccionadas con cemento asfáltico recalentado a 150°C

ENSAYO A 150°C	UNIDAD	6	15	24	48
		HORAS	HORAS	HORAS	HORAS
ESTABILIDAD	libras	3594,2	3675,4	3822,0	4084,1
FLUENCIA	Pulg	10,70	9,84	8,40	7,78
% DE VACIOS	%	5,8	6,0	6,5	9,1

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la Tabla 4.7 la estabilidad Marshall de las briquetas realizadas con cemento asfáltico recalentado a 150°C se comportan directamente proporcional al tiempo de recalentado, a mayor tiempo de recalentado del cemento asfáltico mayor estabilidad en las mezclas. Según las especificaciones de la Tabla 4.6 los resultados obtenidos de la estabilidad están dentro de los parámetros de aceptabilidad ya que los valores superan las 1800 libras, siendo los mismos de 3594,2 libras para 6 horas de recalentado y un máximo de 4084,1 libras. En cuanto a la fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la biqueta, como se aprecia en la

Tabla 4.7, esta disminuye a medida que incrementa las horas de recalentado del cemento asfáltico, comportándose inversamente proporcional a la estabilidad de las mezclas asfálticas. Según las especificaciones (Tabla 4.6) el flujo ideal estaría entre 8 – 14 pulg, en el resultado obtenido cumple con los parámetros hasta el recalentado de 24 horas con un valor de 8,40 pul, quedando de esa manera que para el máximo recalentado ya no cumple, el mismo que cuenta con un valor de 7,78 pulg.

El porcentaje de vacíos de la mezcla se incrementan a mayor tiempo de recalentamiento del asfalto se presentaran mayor porcentaje de vacíos en la mezcla (ver Tabla 4.7). Que según la Tabla 4.6 del Instituto de Asfalto, la misma que presenta límites sugeridos para el método Marshall el porcentaje de huecos o vacíos permitido para asfaltados debe estar entre un 3 y 5 % que en este caso no cumple con las exigencias de las especificaciones, presentando valores como 5,8 % y 9,1 % por lo que no cumplen con el rango permitido, proporcionando mayor permeabilidad en el cuerpo de las mezclas.

*Tabla 4.8: Resultados de la mezcla confeccionadas con cemento asfáltico recalentado a 180°C*

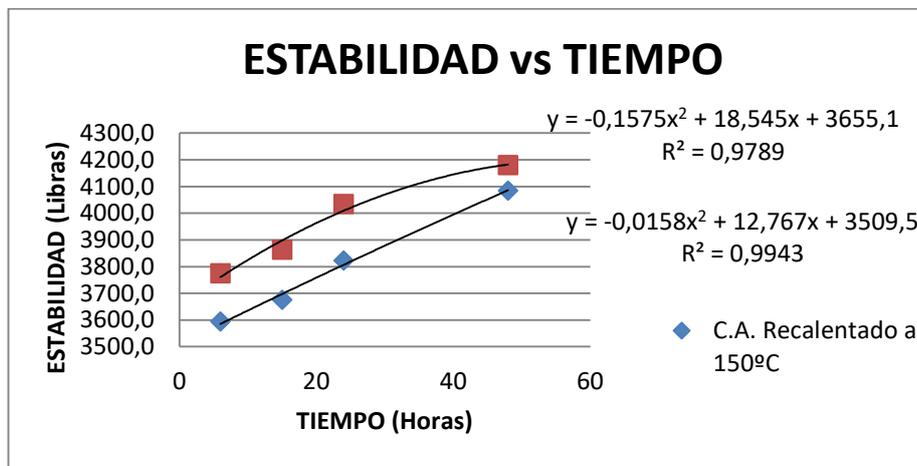
ENSAYO A 180°C	UNIDAD	6	15	24	48
		HORAS	HORAS	HORAS	HORAS
ESTABILIDAD	libras	3774,7	3862,4	4033,9	4179,5
FLUENCIA	Pulg	8,88	8,11	7,51	6,85
% DE VACIOS	%	6,7	7,4	7,5	10,0

*Fuente: Elaboración Propia*

Analizando la Tabla 4.8 la misma que presenta los resultados del recalentamiento del cemento asfáltico a una mayor temperatura que la anterior 180°C, de igual manera se puede ver que el comportamiento es muy similar a la anterior, el comportamiento de la estabilidad también se incrementa a medida que se aumenta los tiempos de recalentado pero el efecto es mayor, es decir a mayor temperatura mayor estabilidad de las briquetas, según la Tabla 4.6 cumpliría con lo exigido presentando valores mayores a 1800 libras siendo el mínimo de 3774,7 y el máximo 4179,5 libras.

En cuanto al flujo decrece y se puede ver que sólo cumple con las especificaciones hasta el recalentamiento de 15 horas, a las 24 y 48 horas de recalentado del cemento asfáltico ya no cumple presentando valores de 7,51 y 6,85 pulg mismos que estarían fuera de rango (ver Tabla 4.6). Los vacíos lo propio al igual que el caso anterior el porcentaje aumenta saliéndose del rango llegando a valores desde 6,7 % hasta 10 %.

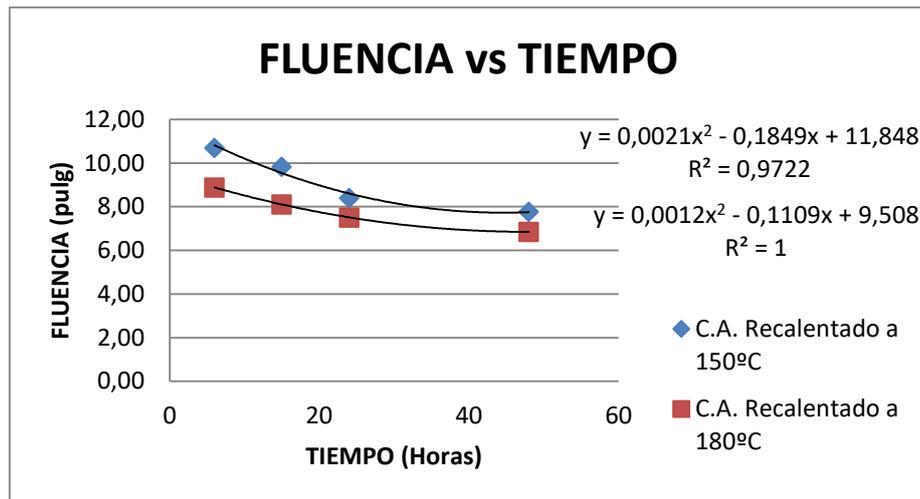
*Grafico 4.10: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento de la estabilidad en la mezcla*



*Fuente: Elaboración Propia*

La temperatura es un aspecto del cual se debe tener cuidado en el diseño o confección de las mezclas, a mayor temperatura presenta mayor estabilidad, valores muy altos de estabilidad no son buenos para una mezcla según la norma española, debido a que producen un pavimento demasiado rígido y por lo tanto menos durable que lo deseado.

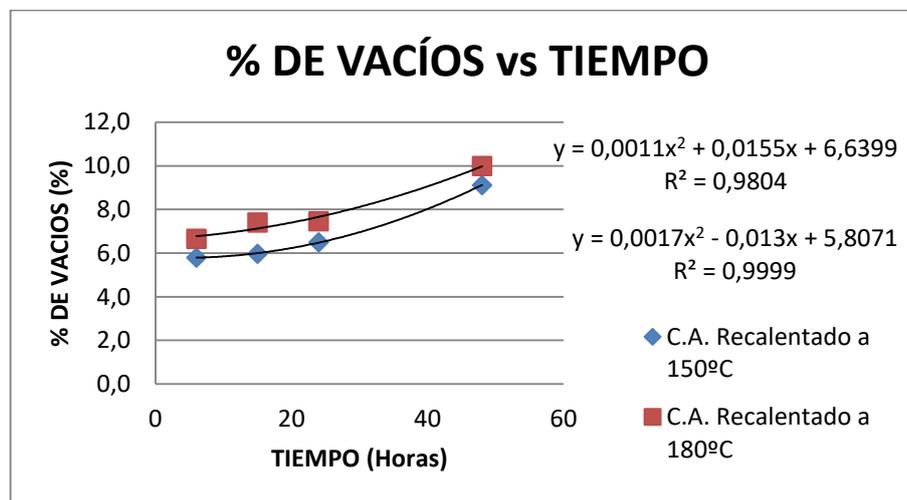
*Gráfico 4.11: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento del flujo en la mezcla*



*Fuente: Elaboración Propia*

Como ya se mencionó anteriormente la fluencia es un aspecto muy importante debido a que representa la deformación de la briqueta lo que indica la disminución en el diámetro vertical de la briqueta, como se puede observar en la Gráfica 4.11 el flujo se comporta de manera decreciente y baja a un más cuando se usa el cemento asfáltico recalentado a mayor temperatura 180°C

*Gráfico 4.12: Efecto del recalentamiento del cemento asfáltico sobre el comportamiento del % de vacíos en la mezcla*



*Fuente: Elaboración Propia*

Analizando el Gráfico 4.12 del porcentaje de vacíos en la mezcla al igual que la estabilidad aumenta cuando se usa el cemento asfáltico recalentado a 180°C, para diseñar las mezclas asfálticas en caliente. Esto, debido a que el cemento asfáltico a medida que se recalienta incrementa su viscosidad y baja su consistencia, por tal efecto no consigue

una adhesión adecuada con los agregados, presentando así un mayor porcentaje de vacíos en las mezclas asfálticas en caliente.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES

1. En el presente trabajo de investigación se han cumplido los objetivos planteados debido a que se logra obtener resultados que nos permite comprobar que efectivamente sí incide el recalentamiento del cemento asfáltico en sus propiedades como también en el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.
2. Se calculó un contenido óptimo del cemento asfáltico en base a la norma (ASTM D15-59) mediante el método Marshall el mismo que consiste en la obtención del promedio de la máxima estabilidad, máxima fluencia y al 4% del porcentaje de huecos, determinando un valor de 5,8 % (ver Anexo 3) con el que se diseñó la mezcla asfáltica para los diferentes casos de recalentamiento.
3. Se realizó recalentamientos o ciclos de calentamiento-enfriamiento de 6, 15, 24 y 48 horas a dos temperaturas diferentes 150 y 180°C, porque por lo general son horas representativas que pueden presentarse en caso de existir alguna falla o mantenimiento de algún equipo para volver a reanudar los trabajos. Una vez obtenidos los resultados, se observa que a medida que se realiza los recalentamientos las propiedades del cemento asfáltico se ven afectadas, como en el caso del **peso específico, el punto de inflamación, la viscosidad, el punto de ablandamiento** que tienden a incrementarse, por otro lado **la ductilidad, la penetración y la destilación** bajan a medida que se aumenta el tiempo de recalentado.

Por lo tanto, se confirma que el cemento asfáltico depende de las proporciones de los asfaltenos, resinas y aceites que contiene el mismo; cuando el cemento asfáltico es sometido a ciclos de calentamiento-enfriamiento no sólo se **oxida**, sino también presenta una **reducción gradual de los aceites y volátiles más livianos** durante el tiempo que se encuentra en el horno, que hace que se produzca el cambio en sus propiedades físico-mecánicas del asfalto.

Llegando a la conclusión que el efecto del recalentamiento del cemento asfáltico disminuye la durabilidad del mismo, ya que la viscosidad aumenta, presentando la desventaja en la trabajabilidad del mismo, el peso específico se torna más pesado en una masa de volumen casi constante lo que provoca que en cada calentamiento se torne más duro, frágil que se puede ver mediante el punto de ablandamiento, la penetración y ductilidad.

Así también se establece que a mayor temperatura mayor es la pérdida de algunas propiedades físico-mecánicas del cemento asfáltico.

4. Se cuantificó un grado de envejecimiento del cemento asfáltico de acuerdo al cambio en sus propiedades, mediante un índice de consistencia, llegando a la conclusión que a mayor tiempo de recalentamiento del cemento asfáltico mayor es la oxidación y pérdida de aceites y volátiles más livianos, lo que hace que el índice de envejecimiento del cemento asfáltico recalentado a una temperatura de 150°C incremente de 6 a 15 horas un índice del 2,88 %, de 6 a 24 horas un 6,73 % y de 6 a 48 horas un porcentaje de 10,58 % y cuando el asfalto es recalentado a 180°C sus valores de incremento son de 6 a 15 horas es de 3,67 %, de 6 a 24 horas presenta un índice de 8,26 % y de 6 a 48 horas su índice es de 12,84 %.
5. También se realizó el ensayo de película delgada (RTFO) según la Norma (ASTM D 2872 AASHTO T240) para cada uno de los ciclos de recalentamiento, para simular el envejecimiento del cemento asfáltico *durante el proceso de fabricación y posterior colocación en obra* de la mezcla asfáltica en caliente. Y mediante la relación de viscosidades del asfalto original y envejecido se pudo obtener un índice de envejecimiento del cemento asfáltico aproximado, que se producirá durante los procesos de mezclado en planta, manipulación del asfalto en caliente y colocación en obra, resultados que se muestran en el cuadro siguiente:

Cemento asfáltico recalentado a 150°C			Cemento asfáltico recalentado a 180°C		
Horas de recalentamiento	I.E. por ciclos de recalentamiento	I.E. después del ensayo de película delgada	Horas de recalentamiento	I.E. por ciclos de recalentamiento	I.E. después del ensayo de película delgada
C.A. original		1,14	C.A. original		1,14
6 horas	1,04	1,21	6 horas	1,09	1,25
15 horas	1,07	1,27	15 horas	1,13	1,32
24 horas	1,11	1,31	24 horas	1,18	1,39
48 horas	1,15	1,40	48 horas	1,23	1,49

Efectivamente, existe el índice de envejecimiento pero no es de gran magnitud. Por lo que se llega a la conclusión que alguna de sus propiedades del cemento asfáltico no salgan del rango de aceptación según normas (la ductilidad, el punto de inflación, viscosidad). Esto se debe a que los aceites no volátiles o más pesados protegen al asfalto de la oxidación debido a su gran estabilidad química. Lo cual permite concluir que un cemento asfáltico que tenga altos contenidos de aceites será más resistente al envejecimiento y presentara mayor durabilidad.

6. Una vez realizados los ensayos del cemento asfáltico se llegó a la conclusión que cuando se trabaja con una temperatura de 150°C no se puede recalentar este producto pasadas las 24 horas, porque la penetración ya no cumple con los requisitos solicitados en norma de la misma manera cuando se trabaja con temperaturas de 180°C como máximo se puede recalentar hasta 15 horas (ver Anexo 7)
7. Después de realizar los cálculos y obtener los resultados de la estabilidad, fluencia y porcentaje de vacíos de las briquetas diseñadas con cemento asfáltico recalentado a dos temperaturas 150°C Y 180°C en periodos de tiempo de 6, 15, 24 y 48 horas se llegó a la conclusión de que efectivamente si incide el efecto del recalentamiento del cemento asfáltico en el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, si bien no se muestra en la estabilidad ni en el flujo los mismos que están dentro de los parámetros de aceptabilidad según norma (estabilidad  $\geq 1800$  libras y el flujo 8-14 pulg). Pero el porcentaje de vacíos no cumplen con lo especificado en norma (3 - 5 %), presentando valores que varían desde 5,8 % hasta 9,1 %, para índices de envejecimiento de 1,04 a 1,15

respectivamente y cuando se trabaja con cemento asfáltico recalentado a 180°C los vacíos son desde 6,7 % hasta 10 % para índices de envejecimiento de 1,08 a 2,23 respectivamente.

Llegando a la conclusión final que las mezclas asfálticas diseñadas con cemento asfáltico recalentado presentarán una estructura con alto porcentaje de vacíos, es decir se obtendrá mezclas asfálticas permeables, que cuando se pongan en servicio, con las acción de las cargas y con el efecto de los agentes climáticos esta no tendrá una buena durabilidad, al ser permeable permitirá el paso del agua, aire hacia su interior a través de la mezcla, ocasionando desintegración de la mismas y presentando fallas prematuras, como la conocida piel de cocodrilo y otras, lo que hace que reduzca la vida útil de la carpeta asfáltica.

8. Después de obtener los resultados se llegó a verificar la hipótesis de este trabajo de investigación, efectivamente el uso del cemento asfáltico recalentado afecta de manera negativa a las mezclas asfálticas en caliente, debido a que el asfalto sufre un envejecimiento (por oxidación y pérdida de volátiles) perdiendo sus propiedades, consistencia y poder adherente ocasionando que las mezclas elaboradas con este asfalto recalentado sean permeables ofreciendo poca durabilidad de los pavimentos.
9. los cálculos y resultados realizados y obtenidos en este trabajo de investigación fueron en base a 8 muestras para cada caso de recalentamiento del cemento asfaltico obteniendo un total de 90 muestras.

## **RECOMENDACIONES**

- En lo posterior, se recomienda profundizar el estudio ampliando el campo de investigación a la química del asfalto, ya que se ha demostrado a través de los años que los diferentes problemas que se presentan durante el diseño y la construcción de la estructura de un pavimento se deben principalmente a la composición química del asfalto que influye directamente en las propiedades químicas.
- Se recomienda tener mucho cuidado en la utilización y manipulación los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos y también se recomienda

utilizar ropa adecuada como guantes, barbijo, lentes y otros para evitar problemas de salud.

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