

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.- INTRODUCCIÓN GENERAL

Las Plantas de Tratamiento de Agua (PTA) son las encargadas de transformar agua natural en agua potable mediante los procesos de coagulación, floculación, decantación y filtración, generando residuos que dependen de los químicos utilizados durante el tratamiento, las condiciones del agua bruta y el tipo de dosificación, así como también del dimensionamiento de la red de atendimento y la calidad de agua exigida para el consumo de la población.

Los tratamientos de aguas residuales disminuyen la contaminación de los cursos del agua y evitan daños a la salud pública de la población, generando un residuo de lodo con elevada presencia de materias orgánicas y nutrientes, que requiere una correcta disposición, a fin de no convertirse en un problema socio ambiental.

La disposición de dichos residuos es un desafío mundial, inclusive en nuestro medio. Los principales usos que se les puede dar a los lodos es en: áreas agrícolas, construcción de rellenos sanitarios, fabricación de ladrillos y recuperación de áreas degradadas, aunque se encuentran en camino diversas investigaciones que incorporan el uso de lodos en los materiales de construcción civil, tales como concretos, suelos y capas de pavimentos el cual será objeto de estudio en este trabajo de investigación.

En Europa y América del Norte se utiliza la incineración como tratamiento de los residuos lodos, aunque es una solución que requiere de una sofisticada tecnología con alto costo por tonelada tratada que es una de los principales factores que hace que sea difícil su utilización; entre tanto, entre otras de sus desventajas esta que existe producción de gases, que pueden ser controlados a través del perfeccionamiento del proceso de combustión y de utilización de filtros.

En este trabajo se busca específicamente evaluar experimentalmente la posibilidad del uso de los lodos del tratamiento del agua potable y agua residual calcinados, en el

asfalto, vislumbrando la mejoría del comportamiento de las mezclas asfálticas para fines de pavimentación.

Para evaluar la consistencia se considera los ensayos de penetración, viscosidad Saybolt Furol, punto de ablandamiento, ductilidad y además que se realizaron otros ensayos de caracterización como temperatura de punto de inflamación y peso específico ya que son los ensayos más requeridos y usuales en nuestro medio.

La prueba consiste en determinar el par de torsión que es necesario aplicar en un eje rotacional, en el seno de una muestra de prueba colocada dentro de un contenedor, bajo condiciones controladas de temperatura, para que gire a una cierta velocidad.

La penetración en ligantes y residuos asfálticos, cuyo objetivo es determinar la consistencia de los ligantes asfálticos, así como de los residuos por destilación de las emulsiones, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de prueba de dichos materiales bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.

Esta prueba es usada como una medida de la consistencia de ligantes asfálticos, por ejemplo, a valores elevados de penetración el ligante asfáltico se considera de consistencia blanda y viceversa.

1.2.- DISEÑO TEÓRICO

1.2.1.- JUSTIFICACIÓN

- Las plantas de tratamiento de agua potable y residual generan como sub producto de su operación residuo de lodo, del cual su disposición se convierte en una problemática socio ambiental; con este trabajo se pretende investigar la posibilidad de utilizar dicho residuo en las mezclas asfálticas.
- Se realiza la investigación para conocer el comportamiento de ligante asfáltico modificado con residuos sólidos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual.
- Con este trabajo se pretende verificar la posibilidad de utilizar los residuos de lodo en ligantes asfálticos, para su uso posterior en pavimentación.

- Se justifica porque de ser positivo el resultado se obtendría una mezcla asfáltica más económica con la incorporación del residuo de lodo en el ligante asfáltico.
- Se justifica porque no existe estudios realizados con los residuos producidos por la plantas de tratamiento de agua de nuestro medio, para su uso de estos residuos en los ligantes asfálticos y posteriormente en capas de pavimentos.
- Contribuir al conocimiento referente a ligantes asfálticos modificados con residuos sólidos.

1.2.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.2.1.- SITUACIÓN PROBLÉMICA

Las plantas de tratamiento de agua potable (PTA) y agua residual (PTAR) generan como sub producto de sus operaciones de tratamiento, una cantidad de lodo que es considerado como residuo sólido, cuyas propiedades de dicho residuo sólido dependen de los químicos utilizados en el proceso de tratamiento, de las condiciones del agua bruta y del tipo de dosificación. La disposición final de estos residuos es un desafío a nivel mundial ya que sin un adecuado gerenciamiento puede resultar daños a los seres humanos y al medio ambiente; ante esta situación con este trabajo se pretende evaluar experimentalmente la posibilidad de usar los lodos generados por las plantas de tratamiento de agua potable y residual de nuestro medio en los asfaltos y posteriormente en mezclas asfálticas con fines de pavimentación.

1.2.2.2.- PROBLEMA

De qué manera influye en la consistencia del ligante asfáltico, la adición de residuos sólidos de plantas de tratamiento de agua potable y agua residual.

1.2.3.- OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los objetivos que se pretenden alcanzar son los siguientes:

1.2.3.1.- OBJETIVO GENERAL

Evaluar la consistencia del ligante asfáltico con la adición de residuos sólidos de plantas de tratamiento de agua potable PTA y de agua residual PTAR.

1.2.3.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un tratamiento térmico a los lodos mediante un secado al aire libre y un secado a través de un horno a altas temperaturas que permita la eliminación de materia orgánica mediante la incineración.
- Preparación de misturas asfálticas con diferentes porcentajes de lodos.
- Estudiar los cambios que se pueden generar en las propiedades de la mezcla asfalto-residuo de planta de tratamiento de agua, al usar diferentes porcentajes de adición (5%,10%,15%,20%) en peso con tamaños de partículas que pasan el tamiz N° 200.
- Realizar los ensayos de caracterización (penetración, viscosidad, punto de ablandamiento, ductilidad, punto de inflación y peso específico) tanto a las muestras de ligante normal, como a las de ligante modificado a efectos de realizar comparaciones de la variación de sus propiedades.
- Determinar el porcentaje óptimo de adición de residuos que presente el mejor comportamiento en la mezclas ligante-residuo.
- En base a los resultados obtenidos evaluar la posibilidad de usar residuos sólidos de plantas de tratamiento de agua potable y residual en asfaltos para su posterior empleo en mezclas asfálticas para fines de pavimentación.
- Elaborar mediante el método Marshall, una mezcla asfáltica con ligante normal y otra con ligante modificado.
- Realizar una caracterización de los agregados usados en la mezcla asfáltica, los cuales deben cumplir las especificaciones del Manual de la ABC.
- Evaluar la incidencia en la mezcla asfáltica, del ligante modificado en comparación con una mezcla asfáltica con ligante normal.

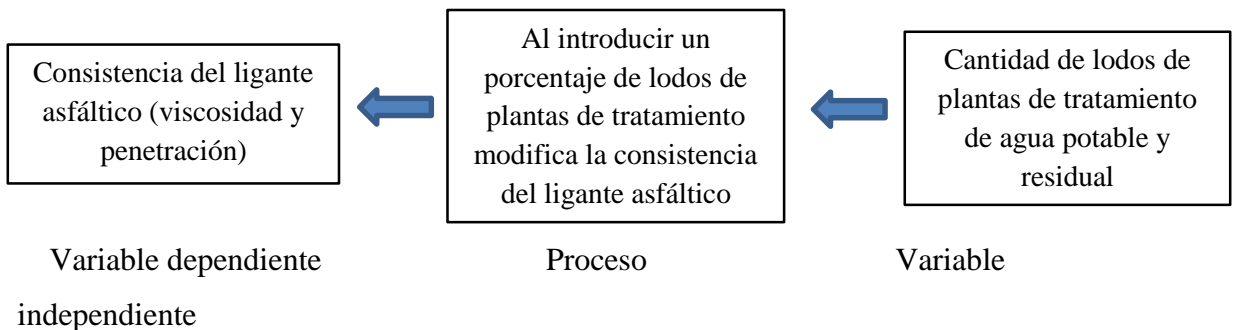
1.3.- HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Al adicionar una cierta cantidad en peso de residuos de plantas de tratamiento, como agente modificador del ligante asfáltico, se presentara una mejoría en sus características en comparación con las características del ligante normal.

1.4.- VARIABLES

1.4.1.- Variable dependiente: Consistencia del ligante asfáltico (viscosidad y penetración).

1.4.2.- Variable independiente: Cantidad de lodos de plantas de tratamiento.



1.5.- ALCANCE

La introducción que se realiza se hace con el propósito de realizar un diseño teórico en donde se establezca el problema, los objetivos, la hipótesis, las variables y por otro lado se realiza un diseño metodológico que nos permita para definir el tipo de investigación, el método de investigación a usar, las técnicas, tratamiento de la información y también se elabora el contenido de la investigación como así también se realiza un cronograma de actividades; todo esto se realiza con la finalidad de cumplir de la mejor manera con el objetivo de la investigación.

En el capítulo relativo al estado de conocimiento sobre la evaluación de la consistencia de ligantes asfálticos modificados, se pretende realizar una recopilación a través de diversas referencias bibliográficas de todos los conceptos necesarios relacionados al tema de investigación como por ejemplo la definición de ligante asfáltico, tipos de asfaltos, su composición, características, especificaciones, asfaltos

modificados, elementos modificadores, lodos de plantas de tratamiento de agua potable y residual; todas estas definiciones se presenta de manera ordena en dicho capítulo con la finalidad de conocer toda la teoría necesaria para la investigación.

El capítulo de investigación tiene la finalidad de convertirse en una guía del proceso experimental que se va a llevar a cabo desde el muestreo de los materiales (ligante asfáltico y lodos de plantas de tratamiento), mezcla del ligante con lodos, evaluación de la consistencia del ligante modificado, para ello en este capítulo se establecen de manera secuencial y lógica los pasos que se deben de seguir para evaluar la consistencia del ligante asfáltico modificado, mediante los ensayos de viscosidad y penetración para obtener los resultados que son la materia prima de la investigación.

Finalmente el último capítulo pretende llegar a obtener conclusiones y recomendaciones en base a las observaciones y resultados obtenidos en el capítulo de investigación, dichas conclusiones nos permitirán verificar si se cumple o no la hipótesis propuesta y comprobar si se puede o no usar los residuos sólidos como agente modificador en ligantes asfálticos para su uso posterior en pavimentación. Por otro lado se realizan recomendaciones para investigaciones futuras.

En general la investigación pretende conocer de qué manera los lodos de plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual influyen en el comportamiento del ligante asfáltico al utilizar estos como agente modificador y en base a dicho comportamiento si se puede o no usar en obras de pavimentación.

1.6.- DISEÑO METODOLÓGICO

1.6.1.- UNIDAD DE ESTUDIO DE DECISIÓN MUESTRAL

1.6.1.1.- UNIDAD

Ligante asfaltico modificado con diferentes porcentajes de lodos de plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual.

1.6.1.2.- POBLACIÓN

Ligantes asfálticos modificados.

1.6.1.3.- MUESTRA

Ligantes asfálticos modificados con residuos sólidos de plantas de tratamiento de agua potable y agua residual.

1.6.2.- MÉTODOS Y TÉCNICAS

1.6.2.1.- MÉTODO

El método de investigación que aplicaremos será el método experimental, ya que este tipo de método es compatible con el tipo de estudio y el problema planteado.

1.6.2.2.- TÉCNICA

La técnica que se empleada será la técnica de la observación directa del experimento que se realizara para obtener los datos necesarios de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- CEMENTO ASFÁLTICO

2.1.1.- DEFINICIÓN

El asfalto es un material de color oscuro, se puede encontrar en estado líquido, semisólido o sólido, que presenta propiedades cohesivas y aglutinantes, conformado por una serie muy compleja de compuestos en los que sobresalen los hidrocarburos; que en gran parte es disulfuro de carbono, presenta consistencia semisólida a las temperaturas ambientes ordinarias pero tiende permanentemente a la liquidez al incrementarse la temperatura. Esta es una de la propiedad que ha permitido adecuarlo a muchos usos en la construcción de diferentes obras civiles.

Los cementos asfálticos pueden ser procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de determinados crudos de los petróleos por destilación o extracción. Estos últimos representan el 90% de la producción total de asfaltos.

El asfalto como se verá más adelante, es parte integral de muchos petróleos en los que existe en solución. Mediante el proceso de destilación se separan las fracciones volátiles quedando el asfalto como residuo de dicho proceso. En procesos de destilación natural a través de millones de años, se han formado depósitos naturales de asfalto, algunos libres de impurezas y otros en los que se encuentra mezclado con cantidades variables de minerales, agua y otras sustancias. Los depósitos naturales en que el asfalto se presenta dentro de la estructura de una roca porosa se conocen comúnmente con el nombre de asfaltos de roca o roca asfáltica.

2.1.2.- NOMENCLATURA

Debido a la gran antigüedad del asfalto, existen numerosos términos relativos a dicho producto, los cuales son repetidos los idiomas con acepciones levemente diferentes, lo cual ha ocasionado cierta confusión.

La palabra asfalto proviene de la palabra *asphalte* que procede del acadio, lengua hablada en Asia, entre los años 1600 y 1400 a.C. En esta zona se encuentra en efecto la palabra *sphalto* que significaba “lo que hace caer”; la palabra fue adoptada después por los griegos, en tiempos de Homero.

De esta manera fueron evolucionando en más términos hasta llegar a ser llamado bitumen, pasando luego al latín y más adelante al francés (asphalte), al español (asfalto) y al inglés (asphalt).

En la actualidad existe una terminología adoptada oficialmente en casi todo los países del mundo. Los principales términos son los siguientes:

- **Bitume (betún).**- Mezcla de hidrocarburos de origen natural, acompañado de sus derivados no metálicos. De consistencia líquida, aceitosa o sólida; sustancia combustible que se encuentra dentro de la tierra.
- **Asphalte.**- Betún sólido preparado a partir de hidrocarburos naturales o derivados de hidrocarburos naturales por destilación, oxidación o cracking. De consistencia sólida, con bajo contenido en productos volátiles, con propiedades aglomerantes y soluble en sulfuro de carbono.
- **Alquitrán (goudron).**- Material de consistencia viscosa y semifluida, de olor fuerte y penetrante y sabor amargo, resultante de la combustión y la destilación de las diferentes partes de los árboles, especialmente los pinos y los abetos.

2.2.- PROCEDENCIA DEL CEMENTO ASFÁLTICO

2.2.1.- LOS ASFALTOS NATURALES

Procesos análogos que ocurren en la naturaleza han formado depósitos naturales de asfalto, algunos prácticamente libres de materias extrañas y otros en que el asfalto se encuentra mezclado con cantidades variables de ciertos 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 rocas asfálticas. Estos asfaltos naturales se manifiestan en diversas formas, entre las que se destacan las siguientes:

- Manantiales
- Lagos
- Exudaciones
- Impregnando rocas
- Filones

2.2.1.1.- MANANTIALES

Se presentan en algunas fuentes de las que fluye petróleo o asfalto líquido, generalmente en pequeña cantidad. Proviene comúnmente de depósitos de cierta importancia, con salida al exterior por alguna grieta de la roca.

2.2.1.2.- LAGOS

A veces, manantiales como los descritos anteriormente pero de un gran caudal, situados en el fondo de depresiones profundas. Pueden dar lugar a la formación de lagos de asfalto, como el muy conocido de Trinidad, cerca de las costas de Venezuela el cual es una de las mayores yacimientos de asfalto natural, es una emulsión de asfalto, gases, agua, arena y arcilla: para su mejor aprovechamiento, se somete a sencillos procesos de refinación que le eliminan las sustancias perjudiciales. Se dice que Colon lo usó para calafatear sus barcos en el viaje de regreso a España. El lago proporciona la mayor parte del asfalto que se usó en los Estados Unidos en los trabajos de pavimentación, antes de la producción en gran escala del asfalto derivado del petróleo.

2.2.1.3.- EXUDACIONES

Se presentan en rocas porosas saturadas de asfalto, de las que este fluye bajo los efectos del calor o de alguna presión interior.

2.2.1.4.- IMPREGNANDO ROCAS

Son bastante frecuentes los yacimientos de rocas o menos porosas en las que el asfalto se encuentra llenado parcial o totalmente los poros, pero sin llegar a exudar. La proporción de asfalto contenido en estas rocas puede variar dentro de límites amplios siendo de mayor utilidad aquellas cuya proporción de asfalto es del 7%.

2.2.1.5.- FILONES

Son intrusiones de asfalto en una masa rocosa, a través de grietas o fallas en algunos de sus estratos o bien, la sedimentación alternada de capas de asfalto y otros materiales. El primer origen generalmente da lugar a filones inclinados o verticales y el segundo a filones horizontales. Es el caso de la llamada gilsonita que se encuentra en algunas regiones de los Estados Unidos formando filones de asfalto que se encuentra en el lecho del mar muerto. El asfalto contenido en ellos se denomina asfaltites, caracterizándose por su elevado punto de fusión: cuando se desprende alguna cantidad de asfalto de estos filones, por efectos de terremotos u otras sacudidas, los trozos de asfalto, por su menor densidad, flotan en la superficie, donde pueden recogerse. Este asfalto no se explota industrialmente, ya que las cantidades que pueden obtenerse son muy pequeñas. Representa un gran valor histórico ya que fue una de las primeras fuentes de suministro de asfalto en la antigüedad.

2.2.2.- EL ASFALTO DERIVADO DEL PETRÓLEO

Casi todo el asfalto que se produce y utiliza actualmente en el mundo procede de la refinación del petróleo. El asfalto derivado del petróleo es llamado a veces asfalto residual (residuo de la destilación del petróleo) para distinguirlo de los asfaltos naturales. Las implicaciones poco deseables que normalmente se atribuye a la palabra residual han conducido a la industria del asfalto a preferir el empleo de la expresión de destilación directa que sin embargo, es actualmente inexacta, ya que raramente se producen asfaltos del petróleo por destilación simple sin algún tratamiento posterior.

Actualmente, la producción promedio total de asfalto producido en las tres refinerías del mundo, asciende a los 5 mil barriles/día.

2.2.2.1.- OBTENCIÓN DE ASFALTO EN REFINERÍAS

El crudo de petróleo es una mezcla de distintos hidrocarburos que incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos, los componentes del asfalto. Para obtener este debe separarse entonces las distintas fracciones del crudo de petróleo por destilaciones que se realizan en las refinerías de petróleo.

A continuación se detallan los procesos que se siguen en las refinerías para la obtención del cemento asfáltico.

2.2.2.1.1.- DESTILACIÓN PRIMARIA

Es la primera operación a que se somete el crudo. Consiste en calentar el crudo en hornos tubulares hasta aproximadamente 375°C. Los componentes livianos (nafta, kerosene, gas oíl), hierven a esta temperatura y se transforman en vapor. La mezcla de vapores y líquido caliente pasa a una columna fraccionadora. El líquido o residuo de destilación primaria se junta todo en el fondo de la columna y de ahí se bombea a otras unidades de la refinería.

2.2.2.1.2.- DESTILACIÓN AL VACÍO

Para separar el fondo de la destilación primaria, otra fracción libre de asfáltenos y la otra con el concentrado de ellos, se recurre comúnmente a la destilación al vacío. Difiere de la destilación primaria, en que mediante equipos especiales se baja la presión (aumenta el vacío) en la columna fraccionadora, lográndose así que las fracciones pesadas hiervan a menor temperatura que aquella a la que hervían a la presión atmosférica. El producto del fondo de la columna, un residuo asfáltico más o menos duro a temperatura ambiente, se denomina residuo de vacío. De acuerdo a la

cantidad de vacío que se practica en la columna de destilación, se obtendrán distintos cortes de asfaltos que ya pueden ser utilizados como cementos asfálticos.

2.2.2.1.3.- DESASFALTIZACIÓN CON PROPANO O BUTANO

El residuo de vacío obtenido por destilación al vacío, contiene los asfaltenos dispersos en un aceite muy pesado, que, a la baja presión (alto vacío) y alta temperatura de la columna de vacío, no hierve (se destila). Una forma de separar el aceite de los asfaltenos es disolver (extraer) este aceite en gas licuado de petróleo. El proceso se denomina "desasfaltización" y el aceite muy pesado obtenido, aceite desasfaltizado. Se utiliza como solvente propano o butano líquido, a presión alta y temperaturas relativamente moderadas (70 a 120 °C). El gas licuado extrae el aceite y queda un residuo semisólido llamado "bitumen".

En las siguientes figuras se muestra de manera esquemática el proceso de refinación que se sigue para la obtención del cemento asfáltico.

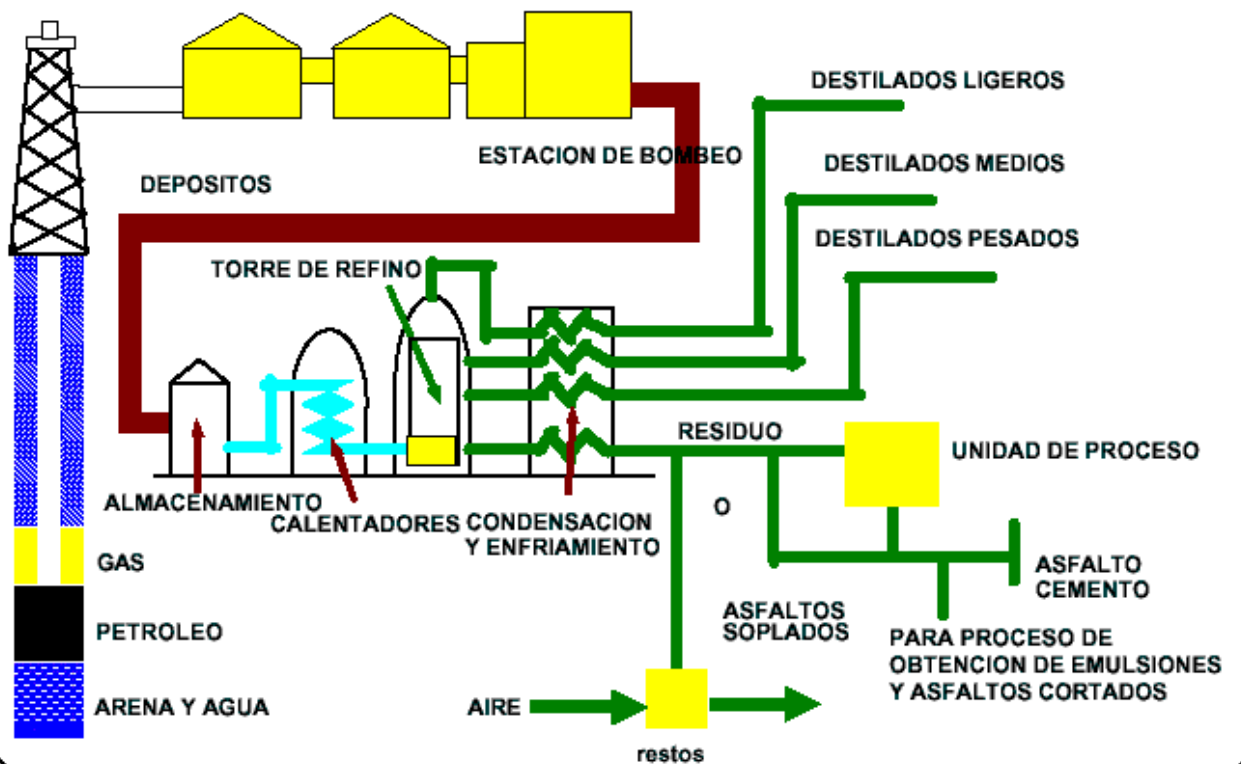
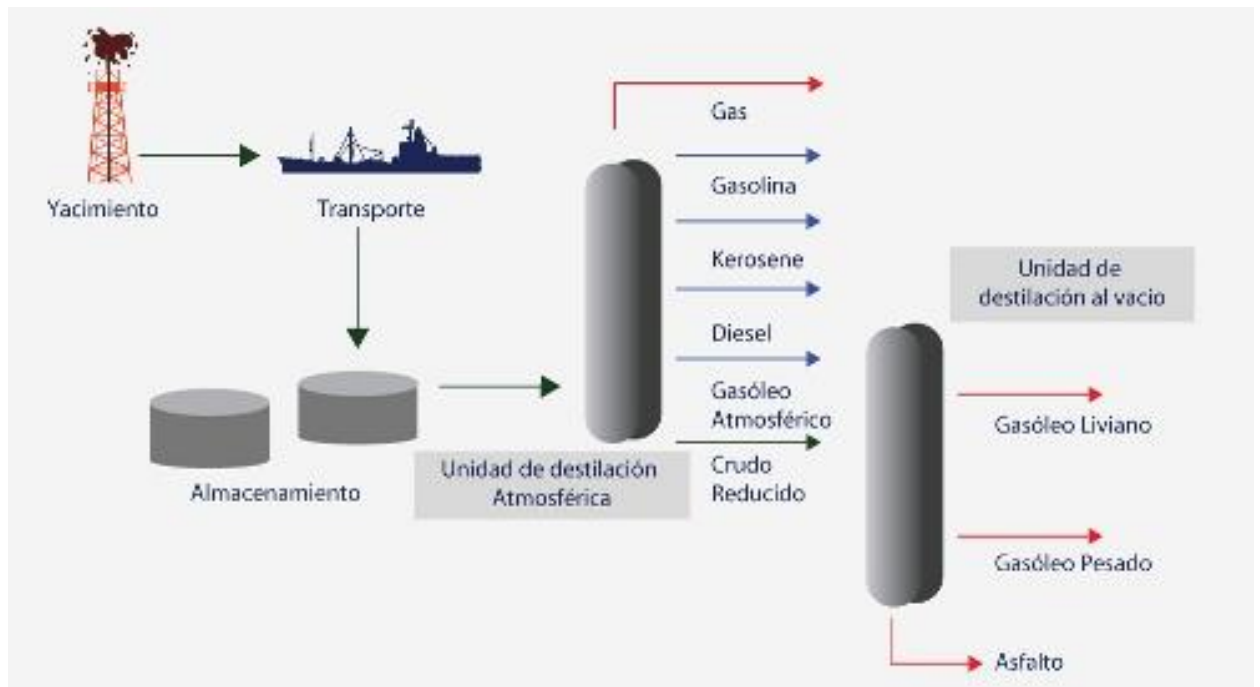


Figura 2.1 Proceso de destilación del petróleo**Figura 2.2** Proceso de obtención del asfalto

DESTILACIÓN DE PETRÓLEO

Una vez que el crudo llega a la refinería se calienta en un gran horno a temperaturas superiores a los 370 °C, para después transportarlo a la torre de destilación, el corazón de la refinería. En la torre se fragmenta el crudo en diferentes componentes:



Figura 2.3 Productos obtenidos de la destilación del petróleo

2.3.- COMPOSICIÓN DEL ASFALTO

2.3.1.- COMPOSICIÓN QUÍMICA

Existen infinidad de libros que tratan de explicar la composición química del cemento asfáltico. El tema ha resultado muy controvertido debido principalmente a que este material está conformado por una mezcla muy compleja de compuestos orgánicos de alto peso molecular.

Es necesario tener un amplio conocimiento de la constitución química de los asfaltos ya que brinda una gran ayuda para poder controlar las propiedades químicas y físicas de los mismos, lo cual permite adecuarlo a la función que va a desarrollar en la vía.

Al igual que al petróleo crudo, es una mezcla de numerosos hidrocarburos, mezclados en proporciones muy diferentes.

La mayoría de estos hidrocarburos están presentes en el petróleo crudo, pero el proceso de refinación da también lugar a cambios en su estructura molecular. Como los hidrocarburos livianos se eliminan durante ese proceso, la gran mayoría de los hidrocarburos son pesados y de molécula complicada.

Los hidrocarburos constituyentes de los asfaltos, pueden pertenecer a uno o varios de los siguientes grupos:

- Alifáticos saturados o parafínicos
- Nafténicos o cicloparafínicos
- Aromáticos
- Alifáticos no saturados

Además del carbono e hidrogeno, constituyentes principales de los hidrocarburos, se encuentran, presentes, azufre, nitrógeno, vanadio, níquel, entre otros. Estos minerales desempeñan un papel muy importante dentro del comportamiento del asfalto.

Cuando se inició el programa estratégico de investigación en asfaltos SHRP(strategic highway research program), el principal problema que encontraron los investigadores

fue que en las refinerías se estaban utilizando nuevos crudos, de características muy diferentes a los usados tradicionalmente para producir el asfalto, lo cual era la causa de mucho de los problemas que se presentaban en los pavimentos. De esta manera, se justifica el interés de grupo de investigación del programa SHRP en el estudio de la química del asfalto.

La química del asfalto es, muy seguramente la parte más compleja de la industria petrolera, porque se trata de una mezcla de diferentes tipos de materiales con diferentes pesos moleculares. La investigación en este sentido es también compleja, pues se trata de correlacionar la composición química con las propiedades físicas y su comportamiento en servicio.

Tabla 2.1.- Composición Química del Asfalto

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (%)
Carbono	82 - 88
Hidrógeno	8 - 11
Azufre	0 - 6
Oxígeno	0 - 1.5
Nitrógeno	0 - 1

Fuente: Conferencia: Introducción a la Química del Asfalto por: Ing. German Garzón

2.4.- CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO

2.4.1.- CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Los diversos métodos utilizados para la caracterización química de los cementos asfálticos, se basan en la facilidad que tienen para ser separados en un gran número de clases o grupos genéricos, usando precipitación por solventes de diferentes grados de aromaticidad y cromatografía líquida.

Los diversos procedimientos para el estudio de la composición química del asfalto se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Fraccionamiento por precipitación
- Fraccionamiento por destilación
- Separación cromatográfica
- Análisis químico
- Análisis de pesos moleculares

2.4.2.- PROPIEDADES FÍSICAS – MECÁNICAS DEL ASFALTO

El asfalto posee las siguientes propiedades de reología físico-mecánicas, mismas que son determinantes para calificar la capacidad de un asfalto.

2.4.2.1.- VISCOSIDAD

Es la propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando a este se le aplica una fuerza. Los fluidos de alta viscosidad presentan mayor resistencia a fluir en comparación de un fluido con baja viscosidad que fluye con facilidad. Es importante mencionar que la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura; a mayor temperatura, menor viscosidad y viceversa.

2.4.2.2.- CONSISTENCIA

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

2.4.2.3.- ELASTICIDAD

Propiedad que tienen los materiales para recuperar su forma inicial al finalizar o disminuir la carga que los deforma.

2.4.2.4.- RESISTENCIA AL CORTE

Es la capacidad de resistencia a altas temperaturas, la cual se determina con un reómetro de corte dinámico, que el aparato que imprime una fuerza cortante con la que se miden dichas resistencias.

2.4.2.5.- DUCTILIDAD

Es la capacidad de disipación de energía que tiene un material dentro de su rango plástico. La rotura del material es dependiente de la deformación del mismo. En el caso del asfalto, la ductilidad le permite normalmente tener mejores propiedades aglomerantes y los asfalto con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura.

2.4.2.6.- PÉRDIDA DE MASA

Es la pérdida de solventes o los componentes más ligeros que se encuentran en el asfalto (máximo 0.8% en prueba de película delgada).

2.4.2.7.- DURABILIDAD

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

Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto debido a que el comportamiento del asfalto es afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción y otras variables que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

2.4.2.8.- ADHESIÓN Y COHESIÓN

La adhesión se refiere a la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación (mezcla asfáltica).

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

2.4.2.9.- SUSCEPTIBILIDAD A LA TEMPERATURA

Es asfalto es un material termoplástico, se vuelve más viscoso (duro) a medida que su temperatura disminuye y menos viscoso (blando) conforme su temperatura

aumenta. Esta característica es conocida como la susceptibilidad a la temperatura o susceptibilidad térmica.

La susceptibilidad térmica varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aun si estos tienen el mismo grado de consistencia.

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

Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperatura ambiente normal para mantener unidas las partículas del agregado y así evitar deformaciones como por ejemplo los ahuellamientos en los pavimentos debido al paso de los vehículos.

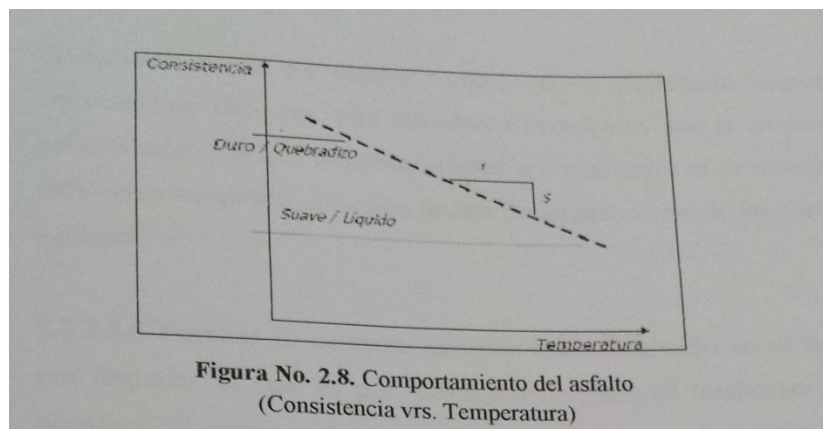


Figura 2.4.- Comportamiento del asfalto

(Consistencia vs Temperatura)

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

2.4.2.10.- PUREZA

El cemento asfáltico se compone, casi enteramente de betunes los cuales por definición son solubles en bisulfuro de carbono. Los asfaltos refinados son generalmente más del 99.5 % solubles en bisulfuro de carbono y por lo tanto casi betunes puros. Las impurezas si existen son inertes. Normalmente el cemento asfáltico cuando deja la refinería está libre de agua o humedad, pero puede haber humedad en los tanques de transporte. Si presenta agua inadvertidamente puede causar espumas al asfalto cuando se calienta por encima de los 100°C (212°F).

2.4.2.11.- SEGURIDAD

La espuma puede constituir un riesgo para la seguridad, por lo tanto, las normas requieren que el asfalto no forme espuma hasta temperaturas de 175 °C (347 °F).

El cemento asfáltico, si se lo somete a temperaturas suficientemente elevadas, desprende vapores que arden en presencia de una chispa o llama de fuego. Sin embargo para tener certeza de que existe un adecuado margen de seguridad, se debe de conocer el punto o la temperatura del asfalto para la aplicación del proyecto, como así también se debe conocer mediante ensayos la temperatura del asfalto a la cual se inflama con la presencia de fuego.

2.4.2.12.- COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO A DIFERENTES TEMPERATURAS

2.4.2.12.1.- REACCIÓN DEL ASFALTO ANTE ALTAS TEMPERATURAS

El cemento asfáltico expuesto a temperaturas extremadamente calurosas, como los desiertos o a condiciones de velocidad y carga sostenidas, como por ejemplo un tráiler a velocidad lenta, puede comportarse como un líquido viscoso, por esta razón que se le considera un fluido Newtoniano, puesto que hay una conducta lineal entre la fuerza de resistencia y la velocidad relativa.

A los líquidos viscosos como el cemento asfáltico también se les conoce como plásticos, ya que una vez que comienzan a fluir pierden su forma y jamás la recuperan, es por esta razón que cuando se aplica este tipo de mezclas en caliente sobre todo en un día caluroso, esta tiende a fluir bajo el tránsito vehicular y el peso del mismo, en pocas palabras su conducta es la de un plástico, lo que puede ocasionar deformaciones y movimiento de las intersecciones. Al mismo tiempo que pierde adherencia entre el agregado y el asfalto, lo cual puede ocasionar un desprendimiento de la carpeta asfáltica.

2.4.2.12.2.- REACCIÓN DEL ASFALTO ANTE BAJAS TEMPERATURAS

Como ya se mencionó en el inciso anterior, las condiciones climatológicas pueden llegar a afectar el comportamiento del cemento asfáltico, en este caso al ser expuesto a temperaturas extremadamente bajas o al ser expuesto al tráfico pesado a una alta velocidad generaron cargas repetitivas, tiende a comportarse como un sólido elástico, contrario a los líquidos plásticos que se comentaron con anterioridad y con la diferencia de que estos tienen la capacidad para recuperar su forma original una vez que la carga se ha desplazado, pero si se excede la capacidad de carga, los sólidos líquidos no se expandirán simplemente se fracturaran.

Para comprender esto mejor, se debe decir que las tensiones internas que sufre el asfalto se acumulan en el pavimento en el momento en que este intenta contraerse, al mismo tiempo que es detenido por la subcapa de la estructura del camino, por lo que se forman hendiduras transversales en la superficie de la misma debido al cambio de temperatura; es por esta razón que esta mezcla se considera frágil a bajas temperaturas.

Más aun en Tarija, que las temperaturas en época de invierno son muy bajas y en época de verano se presentan temperaturas muy elevadas.

2.4.2.12.3.- REACCIÓN DEL ASFALTO A TEMPERATURA AMBIENTE

Cuando el cemento asfáltico se encuentra a temperatura ambiente, la capa asfáltica tiende a comportarse de las dos formas descritas anteriormente, líquida plástica y solida elástica, lo cual permite que el asfalto tenga una buena adherencia con el agregado. Por otro lado esto explica el buen funcionamiento de este, porque utiliza las ventajas de ambos estados, por un lado al calentarse se fluidifica, cubriendo al agregado, formando así una mezcla. Después una vez que el asfalto se enfría, este trabaja como ligante uniendo al agregado formando una mezcla sólida, la cual en su estado final se comporta de manera viscoelástica.

Cualquier fuerza ejercida en el asfalto causa una reacción paralela en el resorte y el amortiguador de aire. En la mezcla en caliente, el resorte representa la respuesta elástica inmediata del asfalto y del agregado. El amortiguador de aire simboliza la reacción más lenta y viscosa del asfalto, particularmente en temperaturas más calientes.

2.4.2.12.4.- ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO

La oxidación es una reacción química del asfalto cuando este entra en contacto con el ambiente, la cual afecta al cemento asfáltico ocasionando que se vuelva más frágil, ya que existe un endurecimiento excesivo de la carpeta asfáltica. Y a pesar de que esta reacción se da en forma generalmente lenta, esta puede acelerarse cuando el asfalto está expuesto a altas temperaturas. Por otro lado las carpetas asfálticas con un número considerable de años o las que sufrieron una mal compactación en el proceso de construcción, son candidatas para presentar oxidación, la primera por el deterioro y la segunda porque al estar mal compactada posee un mayor porcentaje de vacíos, lo cual genera una mayor penetración del oxígeno en la mezcla.

Estas reacciones del cemento asfáltico ante las distintas temperaturas descritas anteriormente son conductas generalmente para cualquier asfalto, sin embargo estas

pueden variar según la capacidad de las propiedades físicas, mecánica y química del mismo para mejorar su comportamiento.

Cabe mencionar que esta investigación solo se enfoca en las mejorías que puede presentar el asfalto con adiciones especiales que está estudiando con respecto a las conductas generales ya antes mencionadas.

2.4.3.- CARACTERIZACIÓN FÍSICA

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

- Ensayos para medir la consistencia
- Ensayos de durabilidad
- Ensayos de pureza
- Ensayos de seguridad
- Otros ensayos

2.4.3.1.- ENSAYOS PARA MEDIR LA CONSISTENCIA DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

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

- Viscosidad
- Penetración
- Punto de ablandamiento
- Ductilidad

2.4.3.1.1.- ENSAYOS DE VISCOSIDAD

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

Si se llena con un líquido el espacio comprendido entre dos placas paralelas, una de las cuales permanece fija y la otra móvil, y se mueve respecto a la otra, la única resistencia que se opone al desplazamiento de esa placa es la que el fluido opone al deformarse.

Cuando un fluido se somete a la acción de una fuerza, se deforma y fluye, pero solo una parte de la energía aplicada se transforma en energía cinética, ya que una fracción más o menos notable se disipa en forma de frotamientos internos generadores de energía calorífica.

Se dice que el fluido es más o menos viscoso, según que esta fracción sea más o menos grande. Con flujo laminar y líquido viscoso simple, esta fuerza es proporcional a la superficie de las placas y a la velocidad relativa del movimiento entre ambas e inversamente proporcional a la distancia existente entre ellas. En la siguiente figura se representa esquemáticamente el dispositivo descrito (Newton en 1729, fue el primero en definir cuantitativamente el concepto de viscosidad).

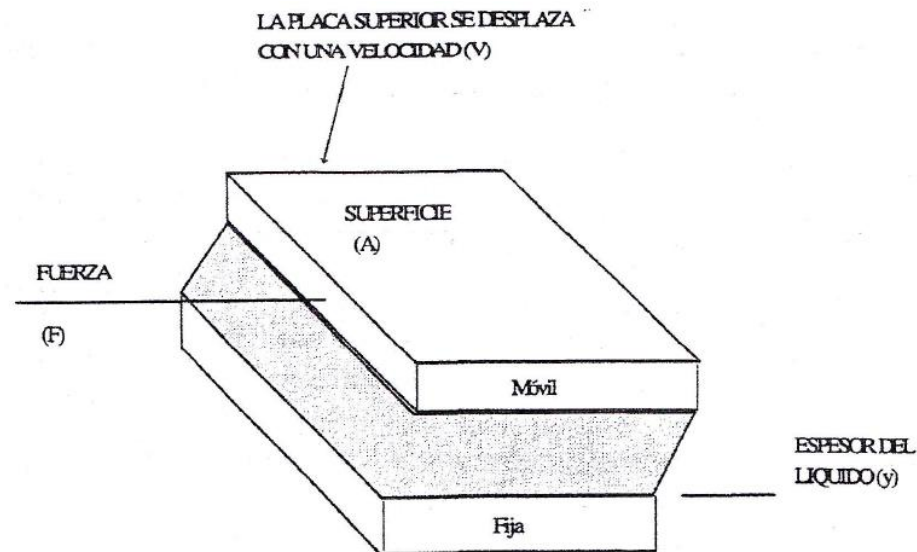


Figura 2.5 Definición simplificada de la viscosidad

La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas que se emplean durante su aplicación.

Las viscosidades que se encuentran en los cementos asfálticos varían desde unos pocos centipoises (centésima parte del Poise) a elevadas temperaturas, a 10^{10} poises o más a bajas temperaturas, en las que se produce rotura frágil.

La viscosidad se mide en el ensayo de viscosidad Saybolt-Furol o en el ensayo de viscosidad cinemática. La viscosidad de un cemento asfáltico a las temperaturas usadas en el mezclado (normalmente $135\text{ }^{\circ}\text{C}$) se mide con viscosímetros capilares de flujo inverso o viscosímetros Saybolt; la viscosidad absoluta, a las temperaturas altas en servicio ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$), generalmente se mide con viscosímetros capilares de vidrio al vacío.

2.4.3.1.1.1- MEDIDA DE LA VISCOSIDAD ABSOLUTA A (60°C - 135°C)

El viscosímetro capilar es también muy utilizado para medir la viscosidad a la temperatura de 60°C . Esta temperatura fue seleccionada porque se considera como la

más alta que puede tener en su superficie una mezcla asfáltica en servicio durante el mes de verano en los Estados Unidos.

Los viscosímetros más utilizados actualmente son: el viscosímetro de vacío Cannon-Mannig y el viscosímetro del Instituto del Asfalto que se muestra en la siguiente figura. La norma ASTM D-2171 describe el procedimiento de ensayo para determinar la viscosidad. El viscosímetro es colocado en un baño de agua o aceite provisto de un controlador de temperatura y se deja el tiempo necesario para que se obtenga la temperatura de ensayo. Posteriormente se aplica vacío con el fin de que el asfalto comience a fluir de un lado a otro. El tiempo en segundos que tarda en fluir el cemento asfáltico de una marca a otra multiplicado por la constante de calibración proporcionada por el fabricante es su viscosidad en poises.

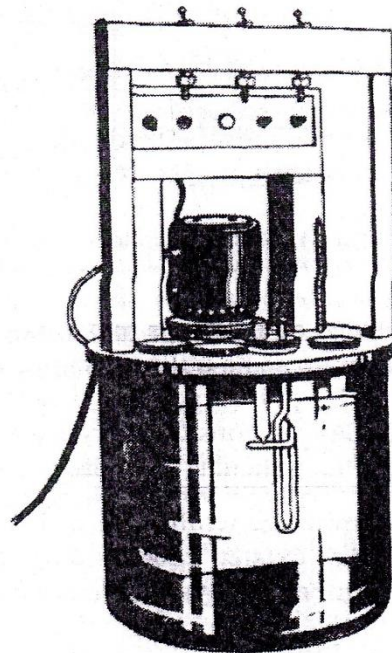


Figura 2.6 Sistema para medir la viscosidad a 60°C

2.4.3.1.1.2- MEDIDA DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 135°C

La norma ASTM D2170 es utilizada para medir la viscosidad de los cementos asfálticos a 135°C, usando el viscosímetro Zeitfuchs Cross Arm. A esta temperatura el cemento asfáltico es suficientemente fluido para desplazarse por el tubo capilar bajo la acción de la gravedad y no es necesario aplicar vacío. La temperatura de 135 °C ha sido seleccionada porque es la temperatura media de mezclado utilizada en la planta para la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente. La unidad de medida de medida es el centistokes ya que la fuerza de la gravedad induce al flujo y la densidad del material afecta la velocidad de fluir. La viscosidad absoluta se obtiene de multiplicar la viscosidad cinemática por el peso específico del cemento asfáltico.

2.4.3.1.1.3- MEDIDA DE LA VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL

En el ensayo Saybolt-Furol se emplea un viscosímetro Saybolt con orificio Furol. Se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho una cantidad específica de asfalto. Como las temperaturas a que se determina la viscosidad son frecuentemente superiores a los 100 °C, el baño de temperatura constante del viscosímetro se llena con aceite; pero si se hace la prueba con un cutback (asfalto líquido), en éste caso, sí se puede utilizar agua. Cuando el asfalto ha alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide, en segundos, el tiempo necesario para que pasen a través del orificio Furol 60 ml del material. Los valores obtenidos se expresan como segundos Saybolt-Furol (SSF).

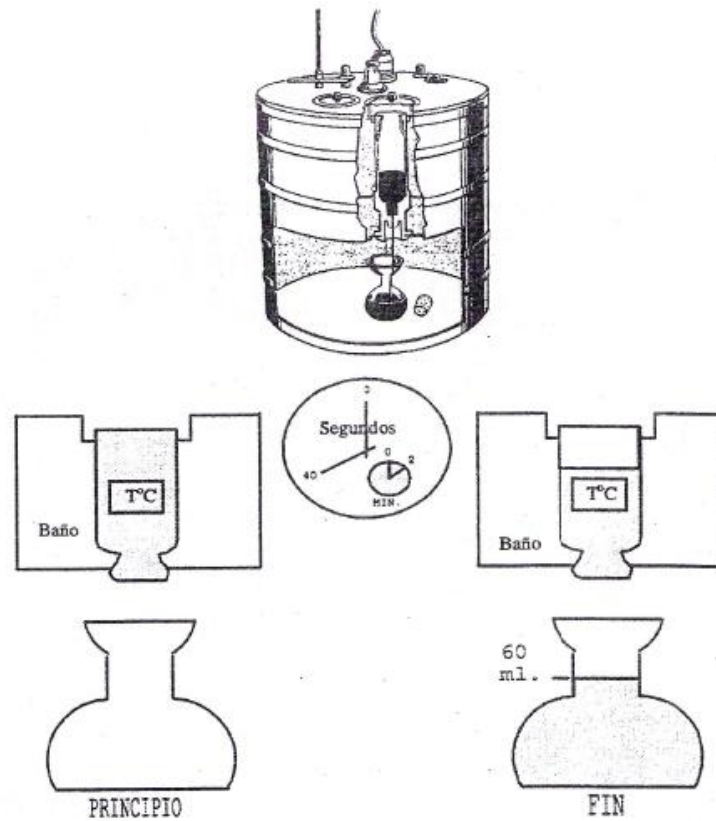


Figura 2.7 Viscosímetro Saybolt Furol

2.4.3.1.2.- ENSAYO DE PENETRACIÓN

El ensayo de penetración es un ensayo empírico usado para medir la consistencia del cemento asfáltico a temperaturas medias de servicio. Usualmente se mide a 25°C (77°F), considerada como la temperatura media en servicio de la mezcla asfáltica.

El ensayo consiste en calentar una muestra de asfalto a 25°C (o una temperatura definida con anterioridad) en un baño de agua controlada termostáticamente. Una aguja normalizada 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 durante un tiempo de 5 segundos. Por ejemplo si fue

necesario penetrar 8 mm, la penetración del cemento asfáltico es de 80. La penetración es un ensayo normalizado según la norma ASTM D-5.

El ensayo se puede realizar a otras temperaturas, tales como 0.4 y 16 °C, aunque la carga o el tiempo de penetración pueden variar. A bajas temperaturas se utiliza un peso de 200 g y un tiempo de 601 segundos.

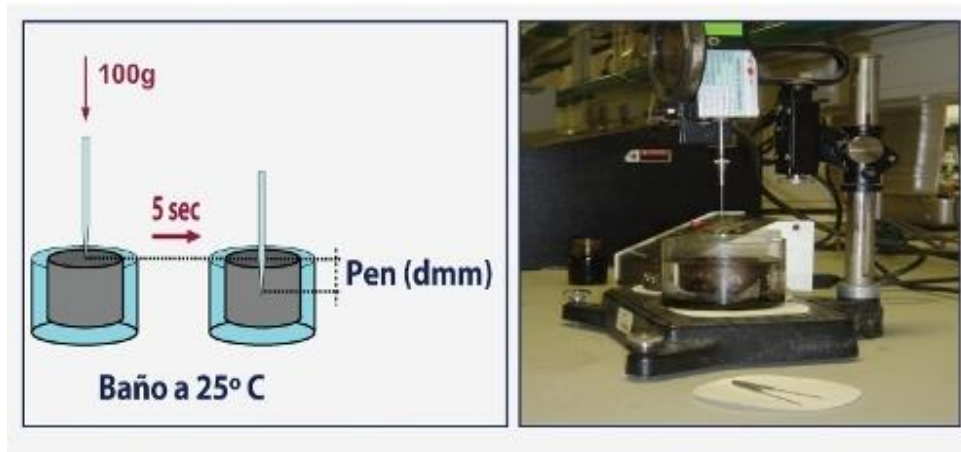


Figura 2.8 Penetrómetro

Durante la ejecución de la prueba de penetración pueden ser causa de error los siguientes aspectos:

- El que haya quedado aire atrapado en la muestra cuando fue vaciada en la cápsula, lo cual da penetraciones superiores a las reales.
- Que la temperatura a la hora de la prueba no sea la especificada por la norma en cual se basa dicho ensayo.
- Que la aguja no esté en contacto con la superficie del asfalto al ajustar la caratula del aparato.
- Que la aguja no esté totalmente recta.
- El no aceitar el sostenedor de la aguja cada que se hace una prueba puede dar penetraciones menores a las reales debido a la fricción del del vástago con el sujetador.

2.4.3.1.3.- PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Los asfaltos son materiales termoplásticos, por lo cual no puede hablarse de un punto de fusión en el término estricto de la palabra. Se establece entonces un punto de ablandamiento, determinado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado de fluidez. Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a diferentes temperaturas. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo del anillo y bola.

Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas, se deja enfriar a la temperatura ambiente durante cuatro horas. Sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso específicos, casi siempre de 9.51mm de diámetro. Una vez lista, se suspende la muestra sobre un baño de agua y se calienta el baño de tal manera que la temperatura del agua suba a velocidad constante. Se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura es el punto de ablandamiento.



Figura 2.9 Anillo y bola equipo automático y manual

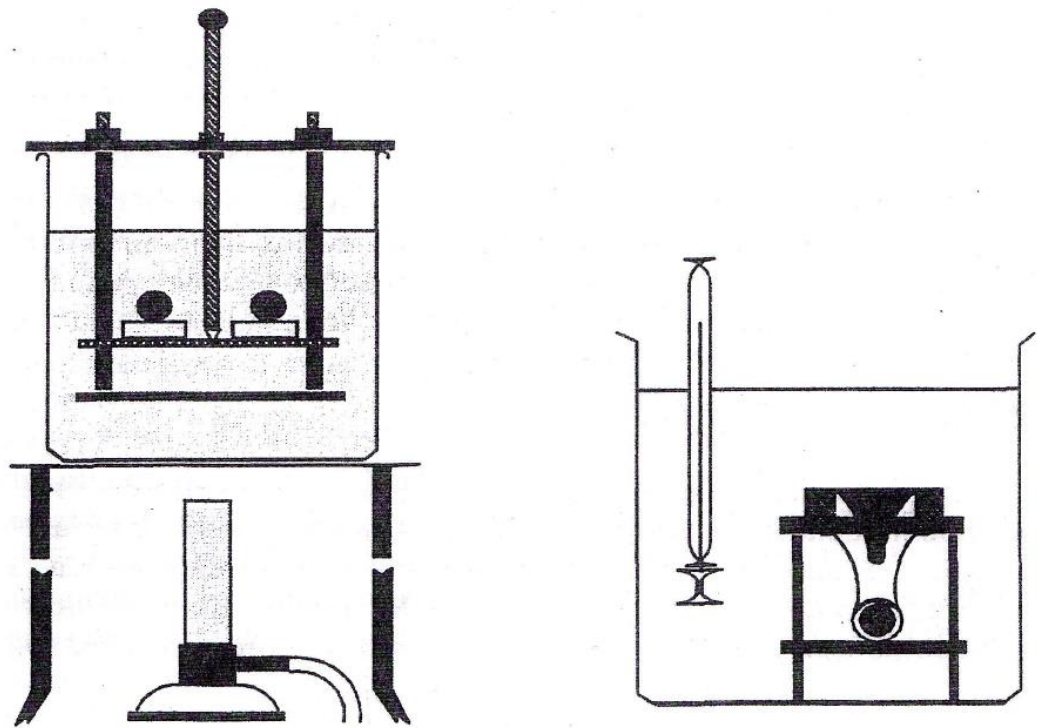


Figura 2.10 Esquema del ensayo punto de ablandamiento

2.4.3.1.4.- DUCTILIDAD

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

La presencia o ausencia de ductilidad tiene, usualmente, mayor importancia que el grado de ductilidad existente. Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes. Por otra parte, asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura.

El ensayo consiste en moldear en condiciones y con dimensiones normalizadas de ensayo y se someter a alargamiento con una velocidad especificada hasta que el hilo que une los dos extremos se rompa. Normalmente, el ensayo se realiza a una

temperatura de 25 °C y una velocidad de alargamiento de 5cm/min. La ductilidad se mide en un equipo llamado ductilómetro. La longitud (en cm) a la que el hilo del material se rompe define la ductilidad.

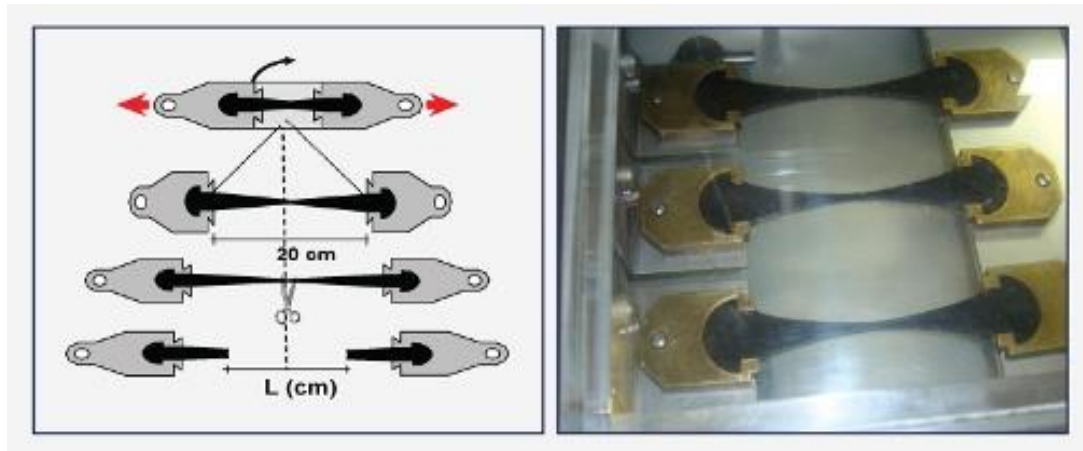


Figura 2.11 Medida de la ductilidad

2.4.3.2.- ENSAYOS DE DURABILIDAD

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 más que influye. Los siguientes ensayos son utilizados para medir de manera más o menos aproximada el envejecimiento de un cemento asfáltico.

2.4.3.2.1.- EL ENSAYO DE LA PELÍCULA DELGADA

Este ensayo se emplea para prever el endurecimiento que puede esperarse se produzca en el asfalto durante las operaciones de mezclado. Esta tendencia al endurecimiento se mide por ensayos de penetración realizados antes y después del tratamiento en el horno.

Este ensayo se realiza colocando una muestra de 50 g de asfalto en un recipiente cilíndrico de 13.97cm de diámetro y 9.525mm de profundidad, con fondo plano. Así se obtiene una probeta de asfalto de un espesor aproximado a 3mm. El recipiente con

la probeta se coloca en un soporte giratorio en un horno bien ventilado y se mantiene una temperatura de 163 °C durante 5 horas. Después se vierte el asfalto en un recipiente normal empleado en el ensayo de penetración. El ensayo en horno de película delgada ha sustituido al ensayo de pérdida por calentamiento.

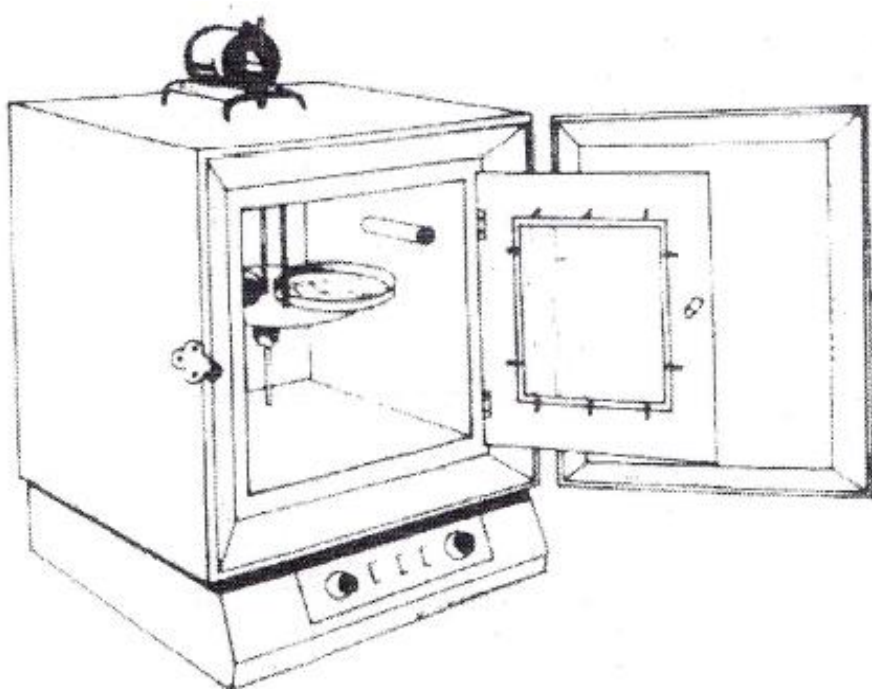


Figura 2.12 Ensayo al horno en película delgada

2.4.3.1.5.- PUNTO DE INFLAMACIÓN

El punto de inflamación o punto de chispa, indica la temperatura a la que puede calentarse el material, sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura, usualmente, es muy inferior a aquella a la que el material ardería o su punto de fuego. Por lo tanto, éste análisis sirve como prueba de seguridad en la operación de las plantas asfálticas en caliente. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta Cleveland. La copa de bronce se llena parcialmente con el

material y se calienta a una velocidad establecida. Se hace pasar periódicamente, sobre la superficie de la muestra, una pequeña llama, y se define como punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina. El punto de inflamación de los cutbacks se mide mediante el ensayo de punto de inflamación de vaso abierto, también, pero el aparato se modifica para hacer posible el calentamiento indirecto del cutback. A veces se emplea para los betunes asfálticos el punto de inflamación Pensky-Martens. Este difiere, esencialmente, de los otros por la necesidad de agitación durante el proceso.

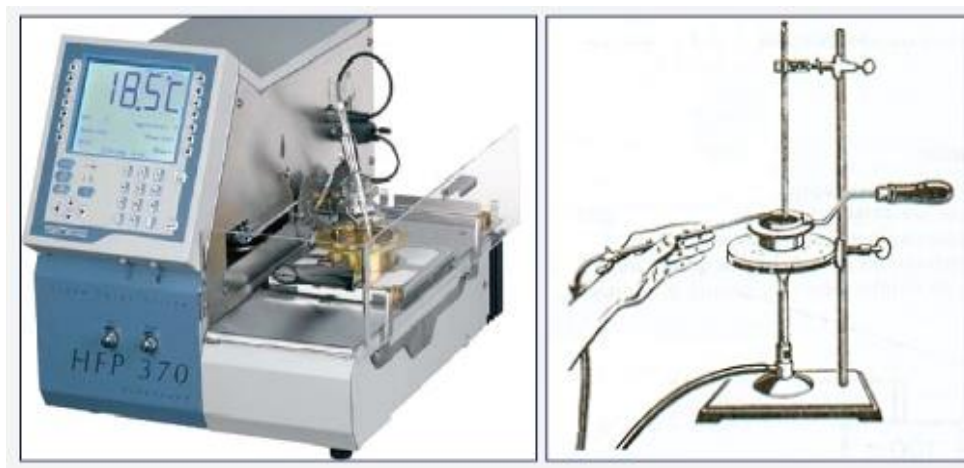


Figura 2.12 Aparato COC

2.4.3.1.6.- OTRAS PRUEBAS

También existen aparte de los ensayos mencionados anteriormente, otra serie de ensayos que se realiza a los cementos asfálticos, asfaltos rebajados y emulsiones asfálticas para usos en pavimentación y algunos de estos ensayos son los siguientes:

2.4.3.1.6.1.- SOLUBILIDAD

El ensayo de solubilidad determina el contenido de betún en el betún asfáltico. La porción de betún asfáltico soluble en sulfuro de carbono está constituida por los elementos aglomerantes activos. La mayor parte de los betunes asfálticos se disuelve

en sulfuro de carbono y en tetracloruro de carbono. Como el tetracloruro de carbono no es inflamable, es el disolvente preferido en la mayor parte de los casos.

La determinación de la solubilidad es sencillamente un proceso de disolución del betún asfáltico en un disolvente separando la materia insoluble.

2.4.3.1.6.2.- PESO ESPECÍFICO

Aunque normalmente no se especifica, es útil para hacer las correcciones de volumen cuando éste se mide a temperaturas elevadas. Se emplea, también, como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentaciones compactadas. El peso específico es la relación de peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos a temperaturas especificadas. O sea, la cantidad de veces que pesa más que el agua a igual temperatura. El peso específico se determina normalmente por el método del pignómetro.

2.4.3.1.6.3.- DESTILACIÓN

El ensayo de destilación se emplea para determinar las proporciones relativas de asfaltos y disolventes presentes en el cutback. Se emplea también para medir las cantidades de disolvente que destilan a diversas temperaturas, que indican las características de evaporación del disolvente. Estas, a su vez, indican la velocidad a que el material curará después de su aplicación. El asfalto recuperado en el ensayo puede emplearse para realizar los ensayos descritos al hablar de betunes asfálticos.

El ensayo se realiza colocando una cantidad específica de cutback en un matraz de destilación conectado a un condensador. El cutback se calienta gradualmente hasta una temperatura especificada y se anota la cantidad de disolvente destilado a diversas temperaturas. Cuando se alcanza la temperatura de 360 °C se mide la cantidad de asfalto restante y se expresa como porcentaje en un volumen de la muestra original. Para los asfaltos líquidos de curado lento el ensayo es el mismo, sólo que se hace una única medición a 360 °C.

2.4.3.1.6.4.- CONTENIDO DE HUMEDAD

Se coloca en una retorta de metal un volumen medido de asfalto que se mezcla perfectamente con un disolvente de tipo nafta. La retorta está provista de un condensador de reflujo y que descarga en un colector graduado. Se aplica calor a la retorta y el agua contenida en la muestra se recoge en el colector. El volumen de agua se mide y se expresa en porcentaje del volumen de la mezcla original.

2.4.3.1.6.5.- FLOTADOR

El ensayo del flotador se hace sobre el residuo de destilación de los asfaltos líquidos del tipo de curado lento. Es un ensayo de viscosidad modificado y se emplea porque el residuo es usualmente demasiado blando para el ensayo de penetración o de volumen demasiado pequeño para la determinación de la viscosidad Saybolt-Furol. Su finalidad es dar una indicación de la consistencia de los productos con estas limitaciones.

Se solidifica un tapón de residuo asfáltico en el orificio del fondo del flotador por enfriamiento a 5 °C. Después se coloca el flotador sobre el agua a 50 'C y se determina el tiempo necesario para que el agua pase a través del tapón. En las especificaciones se fijan los valores que deben obtenerse en los distintos grados de asfalto líquido de tipo de curado lento (SC).

2.4.3.1.6.6.- ENSAYO DE TAMIZADO

El ensayo de tamizado complementa al de sedimentación. Se emplea para determinar cuantitativamente el porcentaje de asfalto presente en forma de glóbulos relativamente grandes. Estos glóbulos no dan revestimientos delgados y uniformes de asfalto sobre las partículas de áridos.

En el ensayo de tamizado se hace pasar una muestra representativa de la emulsión asfáltica a través de un tamiz #20. El tamiz y el asfalto retenido se lavan a continuación con una solución diluida de oleato sódico y finalmente con agua

destilada. Después del lavado, el tamiz y el asfalto se secan en un horno y se determina la cantidad de asfalto retenido.

2.5.- FUNCIONES DEL ASFALTO

El asfalto se presta particularmente bien para la construcción por varias razones:

- Proporciona una buena unión y cohesión entre agregados, incrementando por ello la resistencia con la adición de espesores relativamente pequeños.
- Capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos.
- Impermeabiliza la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de las precipitaciones.
- Proporciona una estructura de pavimento con características flexibles.

En la mayoría de los casos, el asfalto utilizado para pavimentar las calles, es el residuo de las refinerías después de haber destilado del petróleo crudo una gran cantidad de otros productos.

2.6.- CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

Los cementos asfálticos se pueden clasificar de acuerdo a varios criterios, algunos de los cuales se detalla a continuación:

2.6.1.- POR GRADOS DE PENETRACIÓN

Se aplica la Norma ASTM D-946 (Clasificación Estándar por Grado de Penetración para Cementos Asfálticos Utilizados en Pavimentación).

Se basa en el resultado del ensayo de penetración, el cual describe la consistencia a una temperatura de 25 °C.

La Norma ASTM D-946 adopta los siguientes grados de penetración en decimas de milímetros:

- 40 – 50
- 60 – 70
- 85 – 100
- 120 – 150
- 200 – 300

2.6.2.- POR GRADOS DE VISCOSIDAD

Se aplica la Norma ASTM D-3381 (Clasificación Estándar por Grado de Viscosidad para Cementos Asfálticos Utilizados en Pavimentación).

Se basa en la determinación de la viscosidad absoluta del producto a 60 °C.

Cuando las pruebas se realizan sobre el cemento asfáltico original se designan como AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20 y AC-40 y se designan como AR 1000, AR 2000, AR 4000, AR 8000 y AR 1600; cuando se efectúan sobre muestras de asfalto sometidas a un ensayo de envejecimiento acelerado.

2.7.- TIPOS DE ASFALTO

La mayor parte de los asfaltos producidos son utilizados en trabajos de pavimentación, destinándose una producción menor para aplicaciones industriales, como impermeabilizante, aislantes, etc.

2.7.1.- CEMENTO ASFÁLTICO

Los cementos asfálticos son preparados especialmente para el uso en la construcción de pavimentos asfálticos. Es un material para su aplicación en trabajos de pavimentación, pues aparte de sus propiedades aglomerantes e impermeabilizantes, posee características de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la mayoría de los ácidos, sales y álcalis.

2.7.2.- ASFALTO NATURAL

Es un asfalto que se obtiene por proceso natural de evaporación o destilación y se forma cuando el petróleo crudo sube hasta la superficie de la tierra a través de grietas. Ya en la superficie la acción conjunta del sol y el aire separa los aceites ligeros y los gases dejando un residuo que es asfalto, el cual generalmente está impregnado de arcilla o arena muy fina que se adhiere al petróleo crudo durante el trayecto ascendente por las grietas a la superficie.

2.7.3.- ALQUITRANES

Los alquitranes son definidos por la ASTM como condensados bituminosos de color negro o café oscuro que llena, sustancialmente cualidades de alquitrán cuando es evaporado parcialmente o destilado fraccionalmente, y el cual es producido por la destilación destructiva de materias orgánicas, tales como carbón de piedra, petróleo, lignito, turba y madera, su contenido de betún es menor que el del cemento asfáltico, presenta buena adhesividad y resiste al ataque de los derivados del petróleo pero presenta alta susceptibilidad térmica y envejecimiento rápido.

Los alquitranes apropiados para pavimentos se obtienen se obtienen por medio de la destilación destructiva de los carbones bituminosos, en la producción de coque y gas y de la separación de los vapores del petróleo en la manufactura del gas de carburo en el estado líquido. Los chapopotes se someten a la destilación fraccionada para separar el agua y los aceites volátiles para obtener las condiciones necesarias para emplearse en trabajos de pavimentación. Hay alquitranes de diferentes grados de densidad, abarcando desde el RT-1 hasta el RT-12 e incluyendo algunos de los alquitranes de endurecimiento lento o rápido.

2.7.4.- ASFALTOS LÍQUIDOS

Son materiales asfálticos de consistencia blanda o fluida, por ello no se incluyen en el ensayo de penetración, cuyo límite máximo es 300. También se los denomina *asfaltos rebajados* o *cutbacks*.

Se componen por una fase asfáltica y un fluidificante volátil, que puede ser bencina, queroseno o aceite. Los fluidificantes se evaporan (proceso de curado), quedando el residuo asfáltico el cual envuelve y cohesiona las partículas del agregado.

Dentro de los asfaltos líquidos encontramos los siguientes productos:

2.7.4.1.- ASFALTO DE CURADO RÁPIDO

Es aquel cuyo disolvente es del tipo de la nafta o gasolina (gasolina más usual en nuestro medio), se obtienen los asfaltos rebajados de curado rápido y se designan con las letras **RC** (*Rapid Curing*), seguidos por un número que indica el grado de viscosidad cinemática en *centi-strokes*.

2.7.4.2.- ASFALTO DE CURADO MEDIO

El disolvente de este asfalto es queroseno, y se designa con las letras **MC** (*Medium Curing*), seguidos con un número que indica el grado de viscosidad cinemática medida en *centi-strokes*.

2.7.4.3.- ASFALTO DE CURADO LENTO

El disolvente o fluidificante es aceite liviano (diésel), relativamente poco volátil, y se designa por las letras **SC** (*Slow Curing*), seguidos con un número que indica el grado de viscosidad cinemática medida en *centi-strokes*.

2.7.5.- ASFALTOS EMULSIFICADOS O EMULSIONES ASFÁLTICAS

Son parte de los asfaltos líquidos.

Es un sistema heterogéneo de dos fases normalmente inmiscibles (no se *mezclan*), como son el **asfalto** y el **agua**, al que se le incorpora una pequeña cantidad de un agente activador de superficie, tensoactivo o emulsificante de base jabonosa o solución alcalina, que mantiene en dispersión el sistema, siendo la fase continua el agua y la discontinua los glóbulos del asfalto, en tamaño, entre uno a diez micrones.

El asfalto es emulsificado en un molino coloidal con 40 - 50% por peso de agua que contiene entre 0.5 y 1.5% por peso de emulsificante. Permite la aplicación del asfalto donde no es posible calentar el material.

Cuando la emulsión se pone en contacto con el agregado se produce un desequilibrio que la rompe, llevando a las partículas del asfalto a unirse a la superficie del agregado.

El agua fluye o se evapora, separándose de las partículas pétreas recubiertas por el asfalto. Existen emulsificantes que permiten que esta *rotura* sea instantánea y otros que retardan éste fenómeno.

De acuerdo con la **velocidad de rotura**, las emulsiones asfálticas pueden ser:

2.7.5.1.- DE ROMPIMIENTO RÁPIDO RS (*RAPID SETTING*).

Forman una capa relativamente dura y principalmente se usan para aplicaciones en spray sobre agregados y arenas de sello, así como penetración sobre piedra quebrada; que por ser de alta viscosidad sirve de impermeabilizante.

2.7.5.2.- DE ROMPIMIENTO MEDIO MS (*MEDIUM SETTING*).

2.7.5.3.- DE ROMPIMIENTO LENTO SS (*SLOW SETTING*).

Sirven especialmente para una máxima estabilidad de mezclado. Se las emplea para dar un buen acabado con agregados compactos y asegurar una buena mezcla estabilizada.

El tipo de emulsión a utilizar depende de varios factores, tales como las condiciones climáticas durante la construcción, tipos de agregados, etc.

Las emulsiones asfálticas deben tener una buena adherencia.

Esta cualidad la confiere el **emulsificante**, que puede darle polaridad negativa o positiva, tomando el nombre de *aniónicas*, las primeras, afines a los áridos de cargas positivas y *cationica*, las segundas, afines a áridos de cargas negativas; como son las de origen cuarzoso o silíceo.

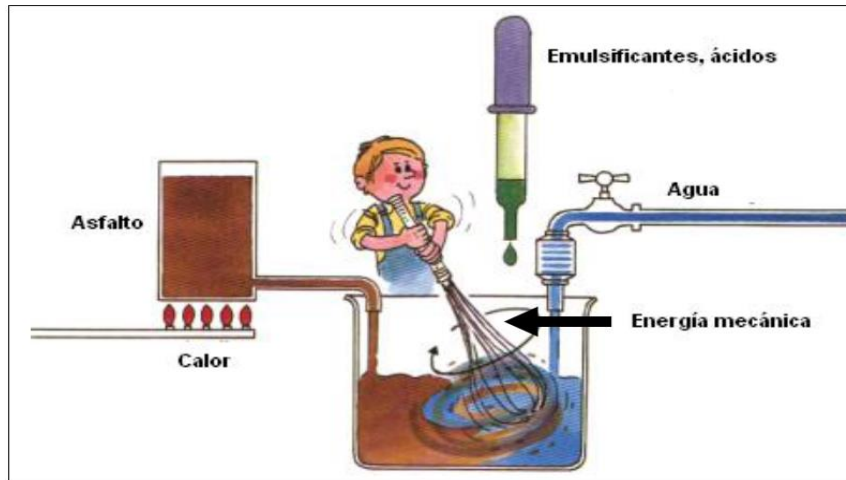


Figura 2.13 Esquema de planta de fabricación de una Emulsión Asfáltica

2.7.6.- ASFALTOS OXIDADOS O SOPLADOS

Estos son asfaltos que han sido sometidos a un proceso de deshidrogenación y posteriormente a un proceso de polimeración.

Este asfalto es expuesto a una elevada temperatura pasándole una corriente de aire con el objetivo de mejorar sus características y ser empleado en aplicaciones más especializadas.

El proceso de oxidación en los asfaltos presenta las siguientes modificaciones físicas:

- Aumento del peso específico.
- Aumento de la viscosidad.
- Disminución de la susceptibilidad térmica.

2.7.7.- ASFALTOS SÓLIDOS O DUROS

Estos son asfaltos con una penetración a temperatura ambiente (25 °C en nuestro medio) menor que 10.

Además de ser aglutinante e impermeabilizante, se caracteriza por su flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la acción de la mayoría de los ácidos, sales y alcoholes.

2.7.8.- ASFALTOS FILLERIZADOS

Son asfaltos en cuya composición hay materias minerales finamente molidas que pasan por el tamiz # 200.

2.7.9.- FLUXANTE O ACEITE FLUXANTE

Fracción de petróleo relativamente poco volátil empleada en ocasiones para ablandar el asfalto hasta la consistencia deseada; frecuentemente se emplea como producto básico para la fabricación de materiales asfálticos para revestimientos de cubiertas.

2.7.10.- ROAD OÍL

Es la fracción pesada del petróleo, usualmente uno de los grados de **asfalto líquido de curado lento** (SC, *Slow Curing*).

2.7.11.- ASFALTO PULVERIZADO

Es el asfalto duro el cual ha sido molido hasta reducirlo a polvo.

2.7.12.- MASTIQUE ASFÁLTICO

Es una mezcla de cemento asfáltico y material mineral en proporciones tales que al calentarse se vuelve una masa espesa, de lenta fluidez que puede vaciarse y compactarse con cuchara de albañil hasta obtener una superficie lisa.

2.7.13.- OTROS TIPOS

2.7.13.1.- ROCA ASFÁLTICA

Roca porosa como arenisca o caliza, que se ha impregnado con asfalto natural a lo largo de su vida geológica.

2.7.13.2.- PRODUCTO ASFÁLTICO DE IMPRIMACIÓN

Asfalto líquido de baja viscosidad que penetra en una superficie no bituminosa cuando se aplica a ella.

2.7.13.3.- PINTURA ASFÁLTICA

Producto asfáltico líquido que a veces contiene pequeñas cantidades de otros materiales como negro de humo, polvo de aluminio y pigmentos minerales.

2.7.13.4.- GILSONITA

Tipo de asfalto natural duro y quebradizo que se presenta en grietas de rocas o filones de los que se extrae.

Material asfáltico para relleno de juntas: Producto asfáltico empleado para llenar grietas y juntas en pavimentos y otras estructuras.

Material asfáltico prefabricado para relleno de juntas: Tiras prefabricadas de asfalto mezclado con sustancias minerales muy finas, materiales fibrosos, corcho, etc., en dimensiones adecuadas para la construcción de juntas.

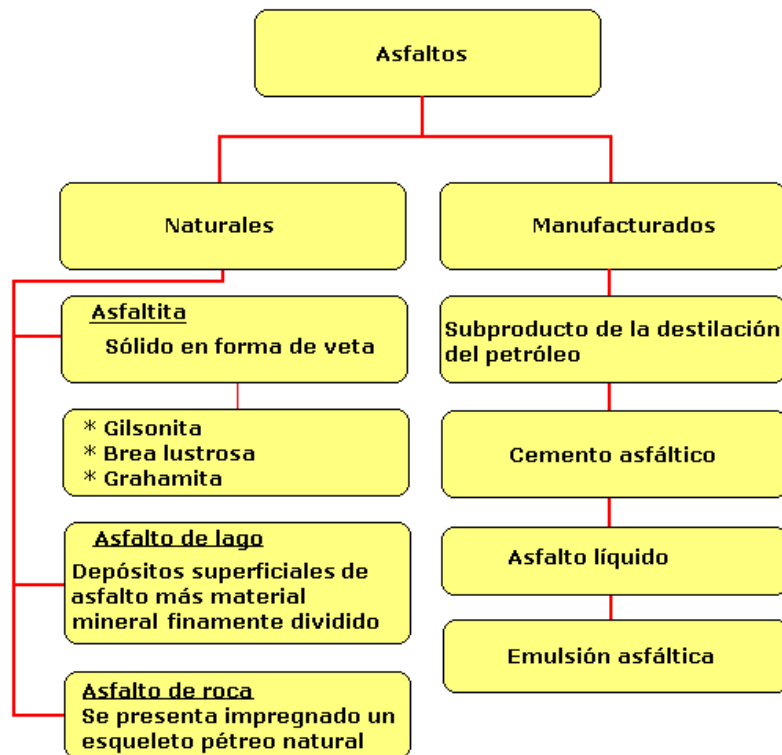


Figura 2.14 Esquema de tipos de asfaltos

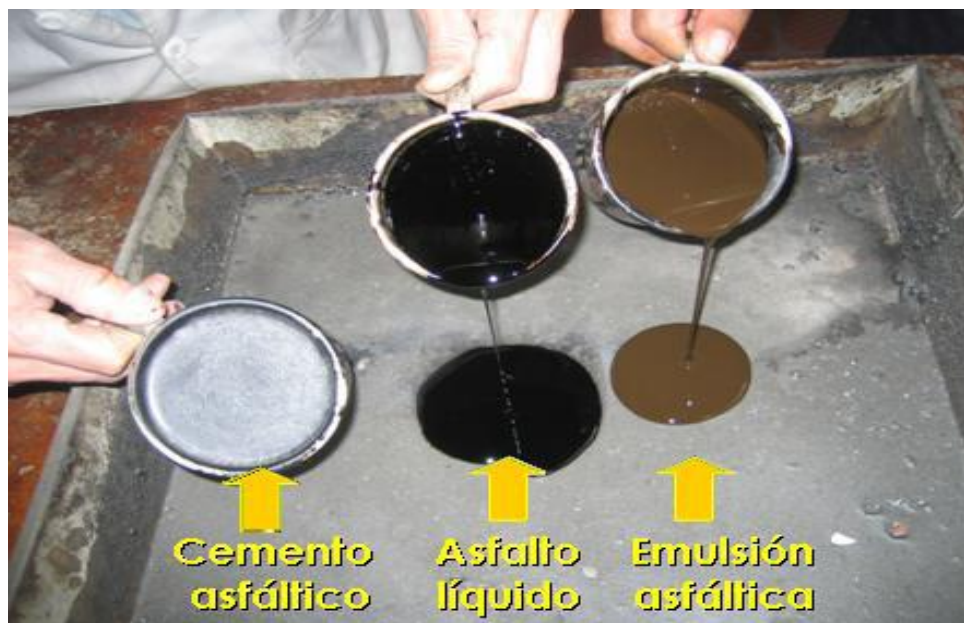


Figura 2.15 Tipos de asfaltos más usuales

2.8.- EL ASFALTO Y EL CLIMA

Tabla 2.2 Asfalto y el clima

USO DE CEMENTOS ASFÁLTICOS GRADUADOS POR PENETRACIÓN EN FUNCIÓN AL CLIMA					
Pavimentación	CLIMA				
	Muy Cálido	Cálido	Moderado	Frio	Frígido
AEROPUERTOS					
Pistas de despegue	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Caminos auxiliares	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Aparcamientos	60-70	60-70	60-70	85-100	85-100
CARRETERAS					
Tráfico pesado y muy pesado	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Tráfico medio ligero	40-50	60-70	60-70	85-100	120-150
CALLES					
Tráfico pesado y muy pesado	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
	40-50	60-70	85-100	85-100	120-150

Trafico medio ligero					
CAMINOS PARTICULARES					
Industriales	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Comerciales Estac. Serv.	40-50	60-70	60-70	85-100	85-100
Residenciales	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
APARCAMIENTOS					
Industriales	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Comerciales	40-50	60-70	60-70	85-100	85-100
ZONA DE RECREO					
Pista de tenis	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
Terrenos de juego	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
BORDILLOS	40-50	40-50	60-70	85-100	85-100

Fuente: Manual del Asfalto USA y experiencia de aplicación en países de Europa y Sudamérica.

2.9.- TEMPERATURAS DE APLICACIÓN DEL ASFALTO

El asfalto es un material termoplástico cuya viscosidad disminuye al crecer su temperatura. La relación entre la temperatura y la viscosidad 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 del Asfalto recomienda que se tenga en cuenta la relación viscosidad-temperatura de cada material asfáltico antes de fijar la temperatura adecuada para el tipo de procedimiento constructivo empleado.

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

La temperatura más adecuada para el riego está comprendida normalmente entre 25 y 100 SSF. Se emplean las viscosidades más elevadas de este margen para sellado y penetración de superficies abiertas, y las más bajas para sellado y penetración de superficies cerradas.

A falta de datos adecuados sobre la relación viscosidad-temperatura puede emplearse la siguiente tabla, que da una orientación para la determinación de las temperaturas de aplicación.

Tabla 2.3 Temperaturas de aplicación del asfalto

Tipo y grado de asfalto		Temperatura de empleo recomendada en °C	
		Para mezcla	Para riego
Betunes asfálticos.	40-50	150-180	-
	60-70	135-165	140-175
	85-100	135-165	140-175
	120-150	135-165	140-175
	200-300	95-135	125-160
Asfaltos líquidos de tipo RC:	RC-0	10-50	18-58
	RC-1	25-52	45-83
	RC-2	25-52	60-99
	RC-3	50-80	77-115
	RC-4	65-95	83-125
	RC-5	80-110	100-140
Asfaltos líquidos de tipo MC:	MC-0	10-50	21-60
	MC-1	25-52	43-85
	MC-2	38-93	60-102
	MC-3	65-95	80-121
	MC-4	80-110	88-129
	MC-5	94-121	104-144
Asfaltos líquidos de tipo SC:	SC-0	10-50	21-60
	SC-1	25-93	43-85
	SC-2	65-93	60-102
	SC-3	80-121	80-121
	SC-4	80-121	88-129

	SC-5	94-135	104-144
Emulsiones asfálticas:	RS-1	-	24-54
	RS-2	-	43-71
	MS-2	38-71	38-71
	SS-1	24-54	24-54
	SS-1h	24-54	24-54

Fuente: The Asphalt Institute's, Manual del Asfalto

2.10.- RENDIMIENTO APROXIMADO DE LOS ASFALTOS DE PAVIMENTACIÓN

El siguiente cuadro nos muestra el rendimiento aproximado de los asfaltos de acuerdo a su aplicación; al respecto es importante indicar que se trata de una guía aproximada. Para el efecto de cálculos de mayor exactitud es importante considerar los siguientes aspectos: diseño en función, tipo de mezcla y otros factores como: clase de suelo, clima, terreno, intensidad del tránsito y material disponible para la mezcla.

Tabla 2.3 Rendimiento aproximado del asfalto

CLASE DE ASFALTO	USO	RENDIMIENTO
CEMENTO ASFÁLTICO 40-50 PEN, 60-70 PEN, 85-100 PEN y 120-150 PEN	MEZCLA EN CALIENTE	30 gl/m ³ mezcla
	CONCRETO ASFÁLTICO	4 – 7% peso total de la mezcla
ASFALTO LIQUIDO RC-250	ADHESIÓN NUEVA CARPETA ASFÁLTICA Y EXISTENTE	0.05 gl/m ²
	SELLADO	0.3 gl/m ²
	MEZCLA ASFÁLTICA EN FRIO	1.5 - 2.0 gl/m ²
	PINTURA IMPERMEABILIZANTE	1 gl/ 5 a 10 m ² (según espesor de película)

Fuente: Manual del Asfalto USA y experiencia de aplicación en países de Europa y Sudamérica.

2.11.- ASFALTOS MODIFICADOS

Existen casos en que las características de las mezclas asfálticas, obtenidas con los cementos asfálticos convencionales no son capaces de resistir la acción conjunta del tránsito y el clima, siendo necesaria la utilización de ligantes modificados que presenten mejores propiedades reológicas, un mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica.

Las mezclas asfálticas elaboradas con estos ligantes modificados presentan altos valores de stiffness a temperaturas altas de servicio, lo que disminuye los ahuellamientos y bajos stiffness a baja temperatura, permitiendo disminuir el riesgo de la aparición prematura de fisuras. De igual manera, el grado de afinidad ligante agregado en presencia de agua se mejora sustancialmente.

Algunas de estas propiedades pueden mejorarse mediante la utilización de ligantes más duros, sin embargo esto reducirá su flexibilidad a temperatura ambiente y proveerá al ligante de un mayor grado de fragilidad a bajas temperaturas.

Para mejorar las propiedades citadas, sin producir efectos negativos secundarios, se están empleando a nivel mundial los cementos asfálticos modificados con polímeros.

El empleo de materiales poliméricos en la tecnología de los pavimentos data de hace muchos años, pero a partir del año 1960 en que se utilizaron en Holanda los geotextiles, sus aplicaciones ha incrementado en otras ramas de la ingeniería.

2.11.1.- RAZONES TECNICAS PARA LA UTILIZACION DE ADITIVOS Y MODIFICADORES EN LAS MEZCLAS ASFALTICAS

Con la utilización de los modificadores y aditivos se puede lograr:

- Mejorar el stiffness del cemento asfáltico a altas temperaturas de servicio, minimizando el riesgo de ahuellamiento.
- Obtener mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio para minimizar la aparición de fisuras asociadas a los cambios térmicos.

- Mejorar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas.
- Mejorar la afinidad ligante-agregado pétreo con el fin de reducir el riesgo de stripping.
- Mejorar la resistencia a la abrasión de las mezclas asfálticas.
- Rejuvenecer el cemento asfáltico.
- Minimizar los problemas durante el proceso de colocación y compactación de la mezcla asfáltica.
- Mejorar las características elásticas del cemento asfáltico.
- Permitir un mayor espesor de película de ligante alrededor de las partículas de agregado con el fin de incrementar la durabilidad de la mezcla.
- Reducir la probabilidad de exudación del cemento asfáltico.
- Disminuir los espesores de la estructura de pavimento.
- Mejorar el comportamiento general de toda la estructura del pavimento.

2.11.2.- LA MEZCLA ASFÁLTICA IDEAL

Una mezcla asfáltica ideal debe tener las siguientes características:

- Baja rigidez o viscosidad a las temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra.
- Alta rigidez a las temperaturas altas de servicio para reducir el ahuellamiento.
- Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperatura.
- Buenas características adherentes en presencia de humedad, con el propósito de reducir el stripping.

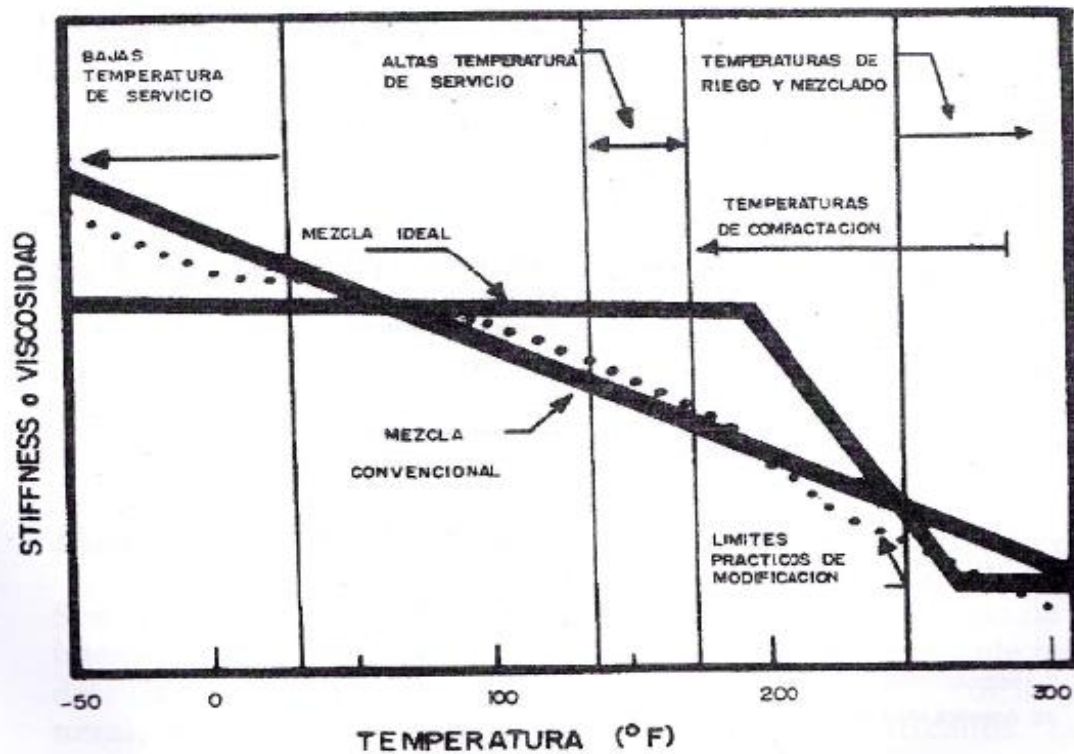


Figura 2.16 Características deseadas de una mezcla asfáltica

En el pasado, algunas de estas propiedades se podían obtener con los cementos asfálticos tradicionales. En la actualidad, con el incremento del volumen del tránsito, el aumento de las sobrecargas de los vehículos pesados, el aumento de la presión de inflado y la aparición de nuevos crudos, hacen necesario el uso de modificadores y aditivos para obtener mezclas que cumplan con la mayoría de estos requisitos.

Tabla 7.1. Clasificación genérica de los aditivos y modificadores de cementos asfálticos

TIPO	EJEMPLO GENERICO
1. Filler	<ul style="list-style-type: none"> • Filler mineral: Polvillo de trituración Limos Cemento Portland Cenizas volantes
2. Extendedores .	<ul style="list-style-type: none"> • Carbón • Azufre • Lignina
3. Caucho	<p>POLIMEROS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caucho natural • Estireno butadieno SBR • Policloropreno • SBS
a. Látex natural b. Látex sintético c. Copolímeros d. Caucho reutilizado	
4. Plásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Polipropileno • Polietileno • Policloruro de vinilo • Poliolefinas
5. Combinación	<ul style="list-style-type: none"> • Mezcla de polímeros 3 y 4
6. Fibras	<ul style="list-style-type: none"> • Natural: asbestos • Hechos por el hombre: poliéster, fibra de vidrio, celulosa, minerales
7. Oxidantes	<ul style="list-style-type: none"> • Sales de manganeso
8. Antioxidantes	<ul style="list-style-type: none"> • Carbón • Sales de calcio • Compuestos con plomo • Aceites rejuvenecedores
9. Hidrocarburos	<ul style="list-style-type: none"> • Limos
10. Agentes antistripping	<ul style="list-style-type: none"> • Aminas
11. Misceláneas	<ul style="list-style-type: none"> • Siliconas • Cloruro de calcio granulado

Figura 2.17 Tipos de modificadores

2.113.- PROBLEMAS CLIMÁTICOS

El principal reto de un asfalto modificado implica la resistencia a la deformación permanente bajo altas temperaturas de servicio y el resquebrajamiento que ocurre en bajas temperaturas de servicio, por ejemplo países como Suecia y Canadá requieren temperaturas promedio mucho menores que países más cercanos al ecuador, en

climas desérticos, la temperatura máxima es alta, pero el cambio de temperatura repentino afecta también las propiedades de relajación del material que a la larga se manifiestan en fallas en el pavimento.

Altas temperaturas e intenso tráfico representan un reto para el funcionamiento de estos asfaltos modificados con polímero u otros aditivos. El estudio de estos asfaltos se concentra en su reología, algunos modelos como el Modelo de Wagner se han utilizado para describir el comportamiento reológico de estos materiales. A altas temperaturas el asfalto se comporta como un fluido newtoniano, sin embargo, una vez modificado con polímero, el comportamiento presente es no newtoniano, lo cual complica el estudio del mismo y su predicción para climas fríos y calientes.

Ecuaciones constitutivas se aplican con el fin de estudiar el comportamiento reológico, sin embargo, los estudios sobre el tema aún son escasos.

2.11.4.- LOS POLÍMEROS

Los polímeros son sustancias macromoleculares naturales o sintéticas, obtenidas a partir de moléculas más sencillas por reacciones poliméricas, de allí su denominación de polímeros.

Por lo tanto, un polímero es un compuesto con un elevado peso molecular, cuya estructura se representa por la repetición de pequeñas unidades.

Los polímeros naturales como las proteínas, los ácidos nucleicos, los polisacáridos y el caucho natural, son producto de la actividad vital de los organismos.

Por su parte, los polímeros sintéticos, son obtenidos de manera más simple, por la unión de moléculas sencillas denominadas monómeros.

2.11.4.1.- CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS

Existen muchos tipos de polímeros, por lo que su dosificación y sistematización resulta muy compleja. Atendiendo a su estructura se clasifican en termoplásticos, termoendurecibles y elastómeros.

2.11.4.1.1.- POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

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

2.11.4.1.2.- POLIMEROS TERMOENDURECIBLES

Se forman por la reacción química de dos componentes: la base y el endurecedor, dando lugar a una estructura entrecruzada, por lo que no pueden ser recuperados para volver a transformarse. Entre los más comunes se encuentran las resinas fenólicas, las resinas epoxi, las resinas de poliéster, las resinas de poliuretano, etcétera.

2.11.4.1.3.- LOS ELASTOMEROS O CAUCHOS

Son polímeros lineales amorfos, generalmente insaturados. Sometidos a un proceso de vulcanización adquieren una estructura parcialmente reticulada, la cual se confiere las propiedades elásticas.

Los cauchos de uso más generalizado son: el caucho natural, los cauchos de etileno-propileno, los cauchos de butadieno-estireno, los cauchos de policloropreno, los elastómeros termoplásticos de butadieno-estireno.

Los polímeros más utilizados para modificar los cementos asfálticos son el caucho natural, los copolímeros de etilenoacetato de vinilo y los elastómeros termoplásticos de butadieno-estireno.

2.11.5.- APLICACIONES COMERCIALES

Los asfaltos modificados con polímero u otros aditivos, encuentran aplicaciones prácticas y algunas patentes han sido ya utilizadas para tender carreteras y autopistas con estos materiales, tanto de mezclas tibias como de mezclas calientes, mientras que las emulsiones asfálticas, aun no pueden ser aplicadas en autopistas que resistan una alta carga vehicular y altas temperaturas, principalmente debido a la separación de fases con el agregado pétreo.

2.12.- MEZCLA ASFÁLTICA

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

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

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

2.12.1.- TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo a diferentes parámetros, entre ellos tenemos los siguientes tipos de mezclas asfálticas:

2.12.1.1.- POR FRACCIONES DEL AGREGADO PÉTREO EN LA MEZCLA

- **Masilla Asfáltica:** Polvo mineral más el ligante.
- **Mortero Asfáltico:** Agregado fino más masilla.
- **Concreto Asfáltico:** Agregado grueso más mortero.
- **Macadam Asfáltico:** Agregado grueso más ligante asfáltico.

2.12.1.2.- POR LA TEMPERATURA DE PUESTA EN OBRA

➤ Mezclas Asfálticas en Caliente

Fabricadas con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

➤ Mezclas Asfálticas en Frío

El ligante es una emulsión asfáltica (aunque en algunos lugares se usan los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

2.12.1.3.- POR LA PROPORCIÓN DE VACÍOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

Este aspecto es de importancia fundamental para que no aparezcan deformaciones plásticas con el paso de las cargas y por las variaciones térmicas.

- **Mezclas Cerradas o Densas:** Con una proporción de vacíos no mayor al 6 %.
- **Mezclas Semi-Cerradas o Semi-Densas:** La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- **Mezclas Abiertas:** Con una proporción de vacíos mayor de 12 %.

- **Mezclas Porosas o Drenantes:** Con una proporción de vacíos superior al 20 %.

2.12.1.4.- POR EL TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO PÉTREO

- **Mezclas Gruesas:** el tamaño máximo del árido es mayor a 10 mm.
- **Mezclas Finas:** son microaglomerados o morteros asfálticos; éstas son mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que se extiende la mezcla (del doble al triple del tamaño máximo).

2.12.1.5.- POR LA ESTRUCTURA DEL AGREGADO PÉTREO

- **Mezclas con Esqueleto Mineral:**

Provistas de un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

- **Mezclas sin Esqueleto Mineral:**

No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

2.11.1.6.- POR LA GRANULOMETRÍA

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

2.13.- DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MÉTODO MARSHALL

2.13.1.- CONSIDERACIONES GENERALES

Las mezclas asfálticas están formadas por un material pétreo bien graduado y cemento asfáltico como ligante. Se elaboran en una planta que calienta el material pétreo a una temperatura de 140 ó 150 °C y el cemento asfáltico a una temperatura de 110 a 130 °C.

Después que el material pétreo esté caliente y seco se mezclan sus componentes de acuerdo a una composición granulométrica aprobada, incorporándole a continuación el cemento asfáltico en una cantidad previamente definida.

Las mezclas terminadas se extienden en capas uniformes en el espesor y ancho requeridos, para luego ser compactadas a temperaturas superiores a los 90 °C.

Un pavimento de concreto asfáltico debe cumplir los siguientes objetivos principales:

- Suficiente estabilidad en la mezcla como para satisfacer las exigencias del servicio y las demandas del tránsito sin distorsiones o desplazamientos.
- Suficiente asfalto para asegurar la obtención de un pavimento durable, que resulte del recubrimiento completo de las partículas de agregado pétreo, impermeabilizando y ligando las mismas entre sí, bajo una compactación adecuada.
- Suficiente trabajabilidad como para permitir una eficiente operación constructiva en la elaboración de la mezcla y su compactación.
- Suficientes vacíos en la mezcla compactada, para proveer una reserva que impida, al producirse una pequeña compactación adicional, afloramientos de asfalto y pérdidas de estabilidad.

2.13.2. FACTORES QUE DEBEN CONTROLARSE EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Para que una carpeta sea estable, duradera, impermeable y antiderrapante, se deben controlar los siguientes factores:

- Granulometría del material pétreo
- Contenido de asfalto

➤ Características del cemento asfáltico

- GRANULOMETRÍA: Existen varias composiciones granulométricas del material pétreo, de acuerdo a las características de la obra y a la especificación técnica utilizada. Las mezclas con un contenido de partículas pétreas de mayor tamaño tienen mayor estabilidad. El tamaño máximo de las partículas no debe ser mayor a $\frac{2}{3}$ del espesor de la carpeta.
- CONTENIDO DE ASFALTO: El contenido óptimo para la preparación de la mezcla debe ser el necesario para cubrir con una película de asfalto la superficie de las partículas pétreas, sin llenar completamente los vacíos, ya que éstos deben ser llenados con las partículas más finas.
Por una parte la mezcla debe contener un porcentaje mínimo de vacíos para evitar las exudaciones del asfalto, que pueden provocar la formación de surcos u ondulaciones; por otra parte deberá tener un porcentaje máximo de vacíos, ya que si este valor se excede, se puede ocasionar el endurecimiento del asfalto por efecto de los agentes atmosféricos, dando como resultado una carpeta quebradiza.
- CONSISTENCIA Y CALIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO: Se debe elegir el cemento asfáltico más adecuado a las condiciones climatológicas del lugar donde se encuentra la obra. Un asfalto muy duro puede dar lugar a un pavimento quebradizo con problemas de desintegración y exceso de agrietamientos. En Cochabamba el cemento asfáltico más comúnmente usado es el de penetración 85 - 100.

2.13.3.- TEMPERATURA DE MEZCLA

Tiene una mayor incidencia en el endurecimiento del asfalto. Por ejemplo, en un asfalto de buena calidad, un aumento de 50° F en su temperatura, produce una disminución de 20 puntos en la penetración.

2.13.4.- CANTIDAD DE ASFALTO EN LA MEZCLA

Una de las principales funciones del asfalto es mantener los agregados ligados bajo los efectos abrasivos del tránsito, en un amplio límite de temperaturas. Esto solo puede alcanzarse si hay una cantidad suficiente de asfalto para ligar estos agregados.

El ensayo de abrasión de California, que mide la resistencia del asfalto contra el desgaste, demuestra que la cantidad de asfalto es más importante que sus características.

Es importante que el pavimento conserve su flexibilidad a bajas temperaturas, ya que la abrasión y desintegración aumentan con la fragilidad. Además de la resistencia a la abrasión, el pavimento debe también ser resistente a las roturas, las cuales se producen por la falta de flexibilidad o por los esfuerzos de contracción a bajas temperaturas. Para contrarrestar la fragilidad se recomienda:

- Uso de asfaltos de baja susceptibilidad térmica.
- Uso de un asfalto tan blando, como la compatibilidad con la estabilidad lo permita.
- Uso de gruesas películas de asfalto.

2.13.5.- MÉTODO MARSHALL

2.13.5.1.- CONSIDERACIONES PRELIMINARES

El Método de dosificación Marshall desarrollado por el Ing. Bruce Marshall, inicialmente fue utilizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Norteamericano, actualmente es el método más utilizado para la elaboración de fórmulas de mezcla.

El criterio para conseguir una mezcla satisfactoria está basado en requisitos mínimos de estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos.

Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas preparadas en caliente, utilizando el equipo Marshall, determina características físicas de las mezclas y analiza los parámetros que definen el contenido de asfalto. La estabilidad se determina empleando el principio de corte en compresión semi-confinada, sometiendo a la muestra a esfuerzos de compresión diametral a una temperatura de 60 °C (140 °F). La aplicación de esfuerzos y la rotura de las muestras se consiguen con un dispositivo especialmente proyectado para las pruebas de estabilidad.

El valor de estabilidad representa la resistencia estructural de la mezcla compactada y está afectada principalmente por el contenido de asfalto, la composición

granulométrica y el tipo de agregado. El valor de estabilidad es un índice de la calidad del agregado.

Además, la mezcla debe tener la fluidez necesaria para que pueda compactarse a la densidad exigida y producir una textura superficial adecuada. El valor del Flujo representa la deformación producida en el sentido del diámetro del espécimen antes de que se produzca su fractura. Este valor es un indicador de la tendencia para alcanzar una condición plástica y consecuentemente de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica a deformarse bajo la acción de las cargas que por ella transiten.

El contenido óptimo de asfalto se determina, de acuerdo a recomendación del Instituto del Asfalto (Manual MS - 2), a través de la media aritmética de los porcentajes que llevan a:

- La máxima estabilidad,
- La máxima densidad de la mezcla y
- Al volumen de vacíos de aire especificado.

Esta media debe ser verificada en relación al valor de la Fluencia y a los vacíos del agregado mineral (VAM), a fin de asegurar que la mezcla contenga un volumen de asfalto (V_b) suficiente, sin que el volumen de vacíos de aire (V_v) sea reducido a un valor inaceptable. Si no se cumplen las especificaciones, la granulometría del agregado debe ser modificada.

2.13.5.2- CRITERIOS PARA EL PROYECTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Se debe establecer los criterios que se van a considerar para la preparación de la mezcla, de acuerdo a las especificaciones técnicas que regirán el proyecto:

- Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla total
- Porcentaje de vacíos llenados con el asfalto
- Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral
- Valor mínimo de la estabilidad
- Rango de valores límite de fluencia

Estos criterios se deben ajustar a los valores de proyecto, correspondientes al nivel de tráfico establecido (liviano, mediano y pesado).

- Tráfico liviano ESALs $> 10^4$

- Tráfico mediano ESALs de 10^4 a 10^6

- Tráfico Pesado ESALs $> 10^6$

Es conveniente, en forma previa, analizar la susceptibilidad de la mezcla al agua, para determinar su comportamiento con relación al desplazamiento de la película de ligante por el agua (“stripping”), que depende del porcentaje de vacíos de aire, a través de los cuales la humedad debe ser secada.

El resultado final de la etapa de diseño es una tabla donde se muestra, para cada nivel de compactación, el rango de contenidos de asfalto que satisface cada uno de los criterios seleccionados. El proyectista puede ajustar los criterios establecidos al principio, sobre la base de su experiencia personal, hasta que la faja de contenidos de asfalto sea razonable.

2.13.5.3.- DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO MARSHALL

- El método Marshall usa muestras de prueba normalizadas (briquetas) de 2 y $\frac{1}{2}$ ” de espesor por 4” de diámetro (64 x 102 mm).

- Se selecciona el agregado que cumpla con las especificaciones requeridas. El tipo y grado del asfalto, de acuerdo al tipo de agregado y las condiciones climáticas.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se preparan y compactan una serie de muestras de prueba (briquetas), con distintos porcentajes de asfalto cuyo rango de variación no debe ser mayor a 0,5%. Como mínimo se debe incluir dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo de contenido de asfalto estimado.

En la práctica se observa que el contenido óptimo de asfalto se encuentra alrededor del 6 %, con referencia al peso de los agregados pétreos. Mayores porcentajes deben conducir a una verificación cuidadosa del diseño de la mezcla.

Para verificar la idoneidad de los datos se deben hacer tres muestras (briquetas) por cada contenido de asfalto. Generalmente para un diseño, se deben tomar 6 porcentajes de asfalto diferentes, por lo cual se requerirán 18 briquetas. Adicionalmente se deben incluir 6 briquetas para determinar los efectos del agua en la estabilidad y el flujo. Aproximadamente para cada briqueta, se necesitan 1200 g de agregados, por lo cual la cantidad representativa de los agregados, debe tener un peso mínimo de 29 kg (65 lb). Además se requerirá aproximadamente un galón de asfalto.

2.13.5.4.- EQUIPO

Entre los elementos más importantes del equipo necesario para la elaboración de los núcleos de prueba, se pueden citar los siguientes:

- Horno y placa calentadora eléctrica, para calentar los materiales, Horno aireador para el curado de las mezclas.
- Termómetro blindado de vidrio o dial con varilla para lecturas entre 50 °F (10 °C) y 450 °F (232 °C).
- Balanza de 2 kg de capacidad, con aproximación a 0,1 g. Balanza de 5 kg con aproximación a 1 g.

- Pedestal para compactación, que consta de un soporte de madera, sobre el cual descansa una placa de acero de 12" x 12" x 1" (305 x 305 x 25 mm).
- Molde de compactación que consta de una base, molde encofrado y collar de extensión. El molde tiene un diámetro interior de 4" (101,6 mm) y una altura aproximadamente 3" (76 mm). La base y el collar están diseñados para intercambiarse ya sea a uno u otro lado del molde.
- Martillo de compactación, que consta de una barra achatada que cae deslizándose sobre una guía y un pisón de cara circular de 3 7/8" (98,4 mm). La barra pesa 10 libras (4,5 kg) y tiene una caída (guía) de 18" de altura.
- Soporte del molde, que consta de un dispositivo de tensión elástica, diseñado para acoplar el molde sobre el pedestal de compactación.
- Extractor de muestra o prensa para extraer la muestra (briqueta) ya compactada.
- Accesorios como cucharas, espátula, mezclador mecánico, baño de agua hirviendo, etc.

2.13.5.5.- PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA ENSAYO

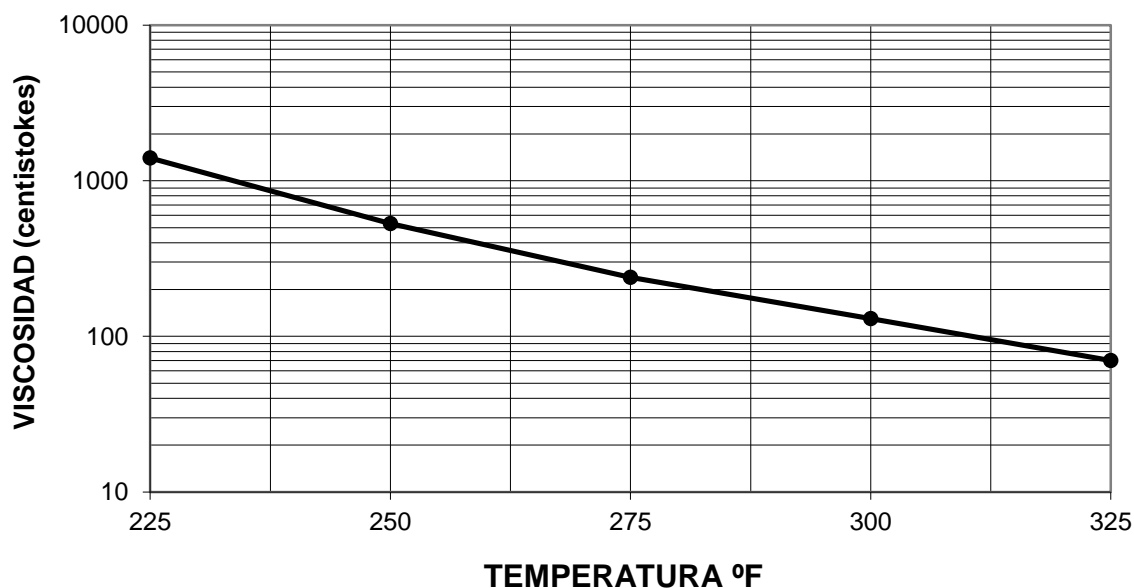
Número de muestras: Por lo menos 3 para cada contenido de asfalto.

Chequeo y preparación de agregados:

- Determinar la gradación de los agregados propuestos, de acuerdo a los métodos de ensayo C-117 y C-136 de la ASTM.
- Determinar el peso específico Bulk y el aparente de los agregados, de acuerdo a los métodos de ensayo C-127 y C-128 de la ASTM.
- Seleccionar la dosificación de agregados que cumpla con la curva de densidad máxima para el tamaño máximo de partículas, además que cumpla el requisito del porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.
- Calcular los pesos específicos Bulk y aparente de la combinación de agregados elegida.
- Determinación de la temperatura de mezclado y de compactación: Sobre la base de la curva Viscosidad-Temperatura, se elige la temperatura a la cual el

asfalto alcanzará una viscosidad cinemática de 170 ± 20 Centistokes para la temperatura de mezclado y 280 ± 30 Centistokes para la temperatura de compactación.

Figura 2.18 Curva Viscosidad – Temperatura para Cementos Asfálticos



Fuente: The Asphalt Institute's, Manual (MS-2).

2.13.5.6.- PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

Pesar por separado en bandejas, para cada muestra de ensayo, la cantidad adecuada de cada fracción que produzca una bachada que de cómo resultado una muestra compactada de $2,5 \pm 0,1$ " de espesor ($63,5 \pm 1,3$ mm).

Colocar las bandejas para el mezclado en el horno y calentarlas a una temperatura aproximada de 25 °F (13,9 °C), por encima de la de mezclado. Calentar el asfalto a una temperatura lo suficientemente alta para que fluya fácilmente, pero sin que ésta sea mayor que la de mezclado.

Colocar la bandeja de mezclado y su contenido en la balanza y pesar agregando el asfalto necesario. Luego se coloca el palustre en la bandeja y se determina el peso total de los componentes de la mezcla más el equipo de mezclado con aproximación a 0,2 g. S

e mezclan los agregados y el asfalto con el palustre hasta obtener una mezcla homogénea.

2.13.5.7.- COMPACTACIÓN DE LOS NÚCLEOS DE PRUEBA

Colocar toda la mezcla preparada dentro del molde, emparejando la mezcla con la espátula, unas 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en la parte central. Se quita el collar y se alisa suavemente la superficie, hasta obtener una forma ligeramente redondeada. Inmediatamente antes del proceso de compactación la temperatura de la mezcla debe estar muy cercana a los límites de la temperatura de compactación establecida.

Colocar nuevamente el collar de extensión, y ubicarlo en el pedestal de compactación. Se aplican 75 (35 ó 50) golpes con el martillo, según lo especificado para la categoría de tráfico. Se quitan la base y el collar se le da vuelta y se vuelva a armar el conjunto. Se aplica el mismo número de golpes a la cara opuesta de la muestra. Después de la compactación, se quita la base del molde y se expone la muestra a la temperatura ambiente dentro del molde. Se saca la muestra del molde por medio de un extractor.

2.13.5.8.- ENSAYO MARSHALL

El ensayo debe efectuarse después de transcurridas 16 horas de la compactación.

2.13.5.9.- PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Para complementar el diseño de la mezcla, se deben efectuar los siguientes ensayos y análisis:

a. En la mezcla sin compactar:

- Peso Específico efectivo.
- Peso Específico máximo.

b. En la muestra compactada:

- Peso Específico Bulk.
- Estabilidad y flujo a 60 °C.

- Análisis de densidad y Vacíos.

2.13.5.10.- DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

El contenido óptimo de asfalto se determina a partir de los datos obtenidos anteriormente, considerando los resultados de las curvas correspondientes a Estabilidad, Peso Unitario y Porcentaje de Vacíos, en las cuales se determina el contenido de asfalto para conseguir:

- Estabilidad máxima.
- Peso unitario máximo.
- El valor medio del porcentaje de vacíos según la tabla VII.2.

El contenido óptimo de asfalto será el promedio numérico de los contenidos de asfalto indicados anteriormente.

2.13.5.11.- CRITERIO PARA ELEGIR UNA MEZCLA SATISFACTORIA

Los criterios recomendados por el Instituto del Asfalto, para la adopción de un diseño de mezcla de concreto asfáltico, se resumen en las siguientes tablas VII.2 y VII.3.

Tabla 2.4 Especificaciones Marshall de diseño

Especificación del Método Marshall	Tráfico Liviano		Tráfico Mediano		Tráfico Pesado	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
No. de golpes	35		50		75	
Estabilidad						
Newtons	3336		5338		8006	
Libras	750		1200		1800	
Fluencia 0,25 mm (0,01")	8	18	8	16	8	14

% de vacíos	3	5	3	5	3	5
-------------	---	---	---	---	---	---

Fuente: The Asphalt Institute's, Manual (MS-2).

Tabla 2.5 Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral

Tamiz	Tamaño máx. nominal de partículas		Mínimo % de vacíos VAM
	Pulgadas	mm	
No. 16	0,0469	1,18	23,5
No. 8	0,093	2,36	21,0
No. 4	0,187	4,75	18,0
$\frac{3}{8}$	0,375	9,5	16,0
$\frac{1}{2}$	0,500	12,5	15,0
$\frac{3}{4}$	0,750	19,0	14,0
1	1,0	25,0	13,0
$1\frac{1}{2}$	1,5	37,5	12,0
2	2,0	50,0	11,5
$2\frac{1}{2}$	2,5	63,0	11,0

Fuente: The Asphalt Institute's, Manual (MS-2).

3.8.1.- ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MÉTODO MARSHAL

Previamente a la elaboración de las mezclas asfálticas se realizó una caracterización de los agregados a emplearse para verificar que cumplan con las especificaciones mínimas exigidas por las Normas cuyos ensayos se encuentran detallados en la parte de ANEXOS. Posteriormente se procedió a separarlos en tamaños con el máximo nominal que es de 3/4 “ que es un tamaño común en carpetas asfálticas.

3.8.1.1.- GRANULOMETRÍA

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa por cada tamiz y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control superior e inferior recomendadas por las Normas a usar. Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica del agregado a emplear. La siguiente tabla presenta los tamaños máximos nominales más utilizados así como sus líneas de control.

Tabla 3.2 Requisitos de granulometría del agregado pétreo ABC

Serie ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerancias fijas de proyecto
2"	50,8	100	....	....	....
1 1/2"	37,5	95 - 100	100	....	±7
1"	25	75 - 100	95 - 10	....	±7
3/4"	19	60 - 90	80 - 100	100	±7
1/2"	12,5	....	....	80 - 100	±7

3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	±7
N°4	4,75	25 - 50	28 - 60	44 - 72	±5
N°10	2	20 - 40	20 - 45	22 - 50	±5
N°40	0,425	13 - 30	10, - 32	8. - 26	±5
N°80	0,18	5. - 20	8. - 20	4. - 16	±3
N°200	0,075	1. - 8	3. - 8	2. - 10	±2

Fuente: Manual del Instituto del Asfalto

Tabla 3.3 Faja granulométrica utilizada (Mezcla densa)

FAJA "C"			
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Límite inferior	Límite superior
1"	25,00	100	100
3/4"	19,00	100	100
1/2"	12,50	80	100
3/8"	9,50	70	90
N°4	4,75	44	72
N°10	2,00	22	50
N°40	0,43	8	26
N°80	0,18	4	16
N°200	0,08	2	10

Fuente: Manual del Instituto del Asfalto

3.8.1.2.- PARAMETROS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Los parámetros de las mezclas asfálticas se seleccionaron de acuerdo a Normativas, las cuales establecen un tamaño máximo de agregado de 19 mm (3/4") y un porcentaje de asfalto entre 4,5 % a 9 % para el método Marshall.

3.8.1.3.1.- DOSIFICACIÓN

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 6.35 cm (2 ½") y 10,2 cm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

3.8.1.3.2.- COMPACTACIÓN

Un parámetro que se debe determinar antes de empezar la compactación, es el número de golpes por cada cara de la briqueta (método Marshall); para ello se requiere conocer el tipo de diseño determinado o adoptado para la mezcla.

Con estos parámetros se pudo determinar un número de 75 golpes por cada cara de la briqueta correspondiente a un tráfico pesado.

3.8.1.3.3.- ESPECIFICACIONES DE LA METODOLOGÍA

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en este capítulo. Un criterio consiste en determinar un contenido óptimo promedio obtenido de las gráficas de dicho diseño Marshall.

Si todos los criterios se cumplen se tendrán un diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitara hacer ajustes o rediseñar la mezcla.

Tabla 3.4 Faja granulométrica utilizada (Mezcla densa)

Características	
Numero de golpes por cada cara en la briqueta	75
Estabilidad (Lb)	1500
Flujo (1/100")	8 - 16
Vacíos en la mezcla (%)	3 - 5
Vacíos agregado mineral (%)	> 13

Vacíos ocupados por asfalto (%)	65 - 75
---------------------------------	---------

Fuente: Manual del Instituto del Asfalto

3.8.2.- PRUEBAS A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los diferentes tipos de pruebas a la mezcla asfáltica están divididos en dos fases, la primera, con el fin de evaluar las características volumétricas, en la segunda fase se valoraran los parámetros de resistencia de la mezcla asfáltica mediante pruebas mecánicas, con el fin de evaluar la influencia de la compactación bajo diversas condiciones de falla.

3.8.2.1.- PRUEBAS DE VOLUMETRÍA

Un factor que debe tenerse en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica es el de las proporciones volumétricas de los componentes, el ligante asfáltico y el agregado. A continuación se describen las pruebas que más influyen en los resultados de la volumetría.

3.8.2.2.1.- GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA (Gmb)

Esta densidad es la relación entre su peso en el aire y su volumen incluyendo los vacíos permeables. Si la briqueta tiene una absorción menor que 2% no se necesita parafinar la probeta.

3.8.2.3.- PRUEBAS MECÁNICAS

Tienen como finalidad evaluar la resistencia de la mezcla asfáltica compactada bajo diferentes condiciones y tipos de cargas utilizando equipos como la maquina Marshall.

3.8.2.3.1.- PRUEBA DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL

Esta prueba se realiza con el propósito de conocer los valores de cohesión (estabilidad) y fricción (flujo) de la mezcla asfáltica mediante la aplicación de una carga a deformación controlada de 50.8 mm⁷min. Esta prueba solamente se aplica para probetas fabricadas con el martillo Marshall; consiste en sumergir la probeta en baño maría a una temperatura de 60 °C por un tiempo de 30 a 40 min, para después ensayarla en la maquina Marshall; los valores obtenidos se utilizan para determinar el contenido óptimo de asfalto.

3.8.3.1.- DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

Para determinar el contenido óptimo de asfalto, se evaluó la granulometría de la faja “C”, con diferentes contenidos de asfalto (estimado ± 0.5 y 1 %): los resultados se observan en las siguientes gráficas, en la gráfica de estabilidad se determinar el porcentaje de asfalto para la mayor estabilidad al igual que en la densidad, para el porcentaje de asfalto con relación a vacíos se entra con los valores recomendados; todos los anteriores porcentajes de asfalto obtenidos de las gráficas se promedia dando como resultado el valor óptimo de asfalto en la mezcla.

2.14.- TRATAMIENTO DE AGUAS

En Ingeniería sanitaria, Ingeniería química e Ingeniería ambiental el término tratamiento de aguas es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico, físico-químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales llamadas, en el caso de las urbanas, aguas negras o residuales. La finalidad de estas operaciones es obtener unas aguas con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final.



Figura 2.20 Planta de tratamiento de agua potable Tabladita (Tarija)

Debido a que las mayores exigencias en lo referente a la calidad del agua se centran en su aplicación para el consumo humano y animal estos se organizan con frecuencia en tratamientos de potabilización y tratamientos de depuración de aguas residuales, aunque ambos comparten muchas operaciones.

2.14.1.- TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

Se denomina estación de tratamiento de agua potable o planta de tratamiento de agua potable, al conjunto de estructuras en las que se trata el agua de manera que se vuelva apta para el consumo humano o sea considerada agua potable. Existen diferentes tecnologías para potabilizar el agua, pero todas deben cumplir los mismos principios:

- Combinación de barreras múltiples (diferentes etapas del proceso de potabilización) para alcanzar bajas condiciones de riesgo.
- Tratamiento integrado para producir el efecto esperado.
- Tratamiento por objetivo (cada etapa del tratamiento tiene una meta específica relacionada con algún tipo de contaminante).

Si no se cuenta con un volumen de almacenamiento de agua potabilizada, la capacidad de la planta debe ser mayor que la demanda máxima diaria en el periodo de diseño. Además, una planta de tratamiento debe operar continuamente, aún con

alguno de sus componentes en mantenimiento; por eso es necesario como mínimo dos unidades para cada proceso de la planta.

2.14.2.- TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano.

El proceso fundamental para el control de la polución por aguas residuales ha sido tratar las aguas residuales en plantas de tratamiento que hagan parte del proceso de remoción de los contaminantes y dejar que la naturaleza lo complete en el cuerpo receptor. Para ello, el nivel de tratamiento requerido es función de la capacidad de auto purificación natural del cuerpo receptor. A la vez, la capacidad de auto purificación natural es función, principalmente, del caudal del cuerpo receptor, de su contenido en oxígeno, y de su "habilidad" para reoxigenarse. Por lo tanto el objetivo del tratamiento de las aguas residuales es producir efluente reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para su disposición o reutilización. Es muy común llamarlo depuración de aguas residuales para distinguirlo del tratamiento de aguas potables.

Las aguas residuales son generadas por uso doméstico, instituciones y locales comerciales e industriales. Éstas pueden ser tratadas dentro del sitio en el cual son generadas (por ejemplo: tanques sépticos u otros medios de depuración) o bien pueden ser recogidas y llevadas mediante una red de tuberías y eventualmente bombas a una planta de tratamiento municipal. Los esfuerzos para recolectar y tratar las aguas residuales domésticas de la descarga están típicamente sujetos a regulaciones y estándares locales, estatales y federales (regulaciones y controles). A menudo ciertos contaminantes de origen industrial presentes en las aguas residuales requieren procesos de tratamiento especializado.

Típicamente, el tratamiento de aguas residuales comienza por la separación física inicial de sólidos grandes (basura) de la corriente de aguas domésticas o industriales empleando un sistema de rejillas (mallas), aunque también pueden ser triturados esos materiales por equipo especial; posteriormente se aplica un desarenado (separación de sólidos pequeños muy densos como la arena) seguido de una sedimentación primaria (o tratamiento similar) que separe los sólidos suspendidos existentes en el agua residual. Para eliminar metales disueltos se utilizan reacciones de precipitación, que se utilizan para eliminar plomo y fósforo principalmente. A continuación sigue la conversión progresiva de la materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias adecuadas, generalmente presentes en estas aguas. Una vez que la masa biológica es separada o removida (proceso llamado sedimentación secundaria), el agua tratada puede experimentar procesos adicionales (tratamiento terciario) como desinfección, filtración, etc. El efluente final puede ser descargado o reintroducido de vuelta a un cuerpo de agua natural (corriente, río o bahía) u otro ambiente (terreno superficial, subsuelo, etc.). Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento y neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada.

Estos procesos de tratamiento son típicamente referidos a un:

- Tratamiento primario (asentamiento de sólidos)
- Tratamiento secundario (tratamiento biológico de la materia orgánica disuelta presente en el agua residual, transformándola en sólidos suspendidos que se eliminan fácilmente)
- Tratamiento terciario (pasos adicionales como lagunas, micro filtración o desinfección)

2.14.2.1.- PROCEDENCIA DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son provenientes de tocadores, baños, regaderas o duchas, cocinas, etc.; que son desechados a las alcantarillas o cloacas. En muchas áreas, las aguas residuales también incluyen algunas aguas sucias provenientes de industrias y comercios. La división del agua casera drenada en aguas grises y aguas negras es más

común en el mundo desarrollado, el agua negra es la que procede de inodoros y orinales y el agua gris, procedente de piletas y bañeras, puede ser usada en riego de plantas y reciclada en el uso de inodoros, donde se transforma en agua negra. Muchas aguas residuales también incluyen aguas superficiales procedentes de las lluvias. Las aguas residuales municipales contienen descargas residenciales, comerciales e industriales, y pueden incluir el aporte de precipitaciones pluviales cuando se usa tuberías de uso mixto pluvial - residuales.

Los sistemas de alcantarillado que transportan descargas de aguas sucias y aguas de precipitación conjuntamente son llamados sistemas de alcantarillas combinado o mixto. La práctica de construcción de sistemas de alcantarillas combinadas es actualmente menos común en la actualidad en la mayoría de los sistemas el agua sucia y agua de lluvia son recolectadas y transportadas en sistemas de alcantarillas separadas, llamados alcantarillas sanitarias y alcantarillas de tormenta o de agua pluvial.

El sitio donde el proceso es conducido se llama Planta de tratamiento de aguas residuales.

2.14.2.2.- TRATAMIENTO POR LAGUNAJE

El lagunaje, entendido como la disposición de las aguas servidas en depresiones naturales o expresamente construidas para este fin, es un procedimiento eficiente para depurar las aguas servidas. El tratamiento de las aguas servidas de origen domiciliar e industrial es uno de los principales problemas que se presenta, derivado principalmente de las grandes concentraciones urbanas. El sistema de tratamiento por lagunas, está basado en varios tipos de lagunas conectadas en serie, en paralelo, o en una combinación de ambas, se le conoce, en algunas zonas de habla hispana como lagunaje, en otras zonas se les denomina balsas.

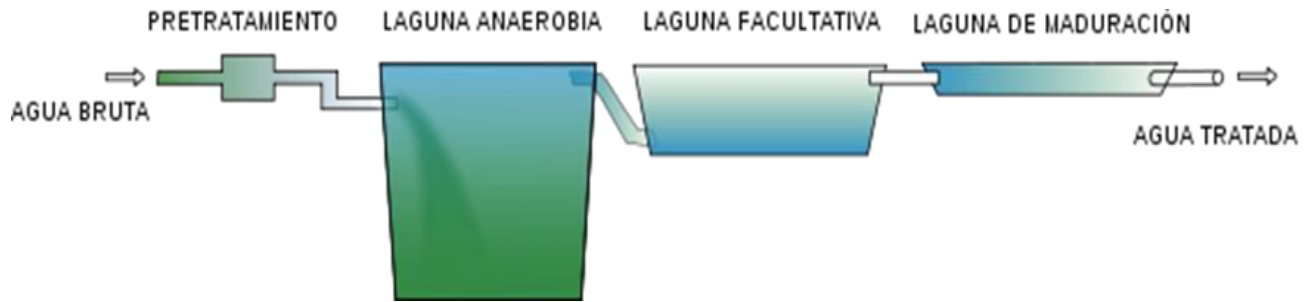


Figura 2.21 Esquema de un tratamiento por lagunaje

El tratamiento de lagunas proporciona el establecimiento necesario y fomenta la mejora biológica de almacenaje en charcos o lagunas artificiales. Se trata de una imitación de los procesos de autodepuración que somete un río o un lago al agua residual de forma natural. Estas lagunas pueden ser anaerobias, generalmente asociadas al tratamiento primario; aerobias, asociadas al tratamiento secundario, y terciario.

El sistema de lagunaje es barato y fácil de mantener pero presenta los inconvenientes de necesitar gran cantidad de espacio y de ser poco capaz para depurar las aguas de grandes núcleos.

2.14.2.2.1.- FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DESEMPEÑO DE LAS LAGUNAS

Estudios realizados del comportamiento de los diferentes tipos de lagunas, para el tratamiento de las aguas residuales, se ha detectado que los siguientes factores tienen importancia en el desempeño de la purificación del agua servida:

- Fotosíntesis
- Ph
- Profundidad de la laguna
- Nutrientes
- Sedimentación de lodos
- Vientos

- Sulfuros
- Oxígeno disuelto
- Radiación solar
- Temperatura
- Infiltración
- Evaporación
- Geometría de la laguna
- DBO
- Sólidos disueltos
- Tiempo de retención

2.14.2.2.2.- TRATAMIENTO DE LOS LODOS

Los sólidos primarios gruesos y los biosólidos secundarios acumulados en un proceso del tratamiento de aguas residuales se deben tratar y disponer de una manera segura y eficaz. Este material a menudo se contamina inadvertidamente con los compuestos orgánicos e inorgánicos tóxicos (por ejemplo: metales pesados). El propósito de la digestión es reducir la cantidad de materia orgánica y el número de los microorganismos presentes en los sólidos que causan enfermedades. Las opciones más comunes del tratamiento incluyen la digestión anaerobia, la digestión aerobia, y el abonamiento.

2.14.2.2.3.- POTENCIALES IMPACTOS AMBIENTALES

Los contaminantes de las aguas servidas municipales, o aguas servidas domésticas, son los sólidos suspendidos y disueltos que consisten en: materias orgánicas e inorgánicas, nutrientes, aceites y grasas, sustancias tóxicas, y microorganismos patógenos. Los desechos humanos sin un tratamiento apropiado, eliminados en su punto de origen o recolectados y transportados, presentan un peligro de infección parasitaria (mediante el contacto directo con la materia fecal), hepatitis y varias enfermedades gastrointestinales, incluyendo el cólera y tifoidea (mediante la

contaminación de la fuente de agua y la comida). Cabe mencionar que el agua de lluvia urbana puede contener los mismos contaminantes, a veces en concentraciones sorprendentemente altas.

2.15.- PROCEIDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.7.- ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN AL LIGANTE

Una vez realizadas las mezclas, se sometieron en laboratorio a los ensayos de caracterización más comunes en nuestro medio que son penetración, viscosidad Saybolt Furol, ductilidad, punto de ablandamiento, punto de inflamación y peso específico; todo esto para estudiar las diferencias en comparación con el asfalto de referencia 85-100

3.7.1.- ENSAYO DE PENETRACIÓN (ASTM D5 AASHTO T49-57)



Figura 3.6 Penetrómetro

El procedimiento que se sigue para este ensayo está basado en el manual de la ABC y es el siguiente:

- Calentar el asfalto a una temperatura de 160 °C.
- Transferir el asfalto a un recipiente de aproximadamente 3 onzas.
- Tapar y dejar enfriar a temperatura ambiente por un tiempo de 1 a 1 ½ horas.
- Colocar el recipiente en baño de agua a temperatura constante de 25 °C por un periodo de 1 a 1 ½ horas.
- Sacar el recipiente del agua y colocar sobre la plataforma del penetrómetro.
- Bajar la aguja hasta que la punta toque exactamente la superficie de la muestra a 1 cm del borde.
- Dejar caer la aguja para que penetre la muestra durante 5 segundos y tomar lectura de la penetración.
- Este mismo procedimiento se realizó todos los tipos de muestras, realizando tres lecturas para cada uno con el objetivo de obtener una lectura de penetración promedio.
- Las tres penetraciones en la superficie de la muestra se realiza a 1 cm del borde y separadas a 1 cm entre sí.

3.7.2.- ENSAYO DE VISCOSIDAD (AASHTO T72)



Figura 3.9 Viscosímetro Saybolt Furol

- Calentar la muestra de asfalto a 160 °C.
- Transferir la muestra a los tubos del viscosímetro previo tapado de los orificios de salida y regulado de temperatura constante a 135 °C como lo indica la Norma.
- Colocar los matraces de viscosidad de 60 ml.
- A la temperatura de 135 °C quitar el tapón del orificio, al mismo tiempo cronometrar el tiempo que tarda en rebasar la marca de 60 ml.
- También se realizaron ensayos de viscosidad para temperaturas de 145°C, 155°C, 165°C y 175°C con la finalidad de observar el comportamiento del ligante modificado con respecto al de referencia.
- Se realizaran tres ensayos para cada tipo de muestra, con el objetivo de obtener una lectura promedio de viscosidad para cada temperatura de ensayo.

3.7.3.- ENSAYO DE DUCTILIDAD A 25°C (ASTM D113 AASHTO T51-00)



Figura 3.19 Ductilómetro

- Calentar la muestra de asfalto a 160 °C.
- Vaciar a los moldes que están sobre una placa de bronce amalgamada, como también las partes laterales del molde se amalgaman.
- Dejar enfriar a temperatura ambiente por un periodo de 1 a 1 ½ horas.
- Enrazar con una espátula caliente la superficie de la muestra.
- Colocar la placa, molde y la muestra a un baño de temperatura constante de 25°C por un periodo de 1 a 1 ½ horas.
- Colocar los moldes a los orificios del ductilómetro.
- Colocar el indicador en cero.
- La velocidad será regulada a 5 cm por minuto.
- Lectura directa en cm al final de la prueba o ruptura de la muestra ensayada.
- De igual manera el mismo procedimiento se realizó para todos los tipos de muestras.

3.7.4.- ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO (ASTM D36 AASHTO T53-96)



Figura 3.22 Equipo para el ensayo de punto de ablandamiento

- Calentar el asfalto a 160 °C.
- Transferir el asfalto (160 °C) al anillo que se encuentra sobre una plancha amalgamada.
- Dejar enfriar por un periodo de 1 a 1 ½ horas.
- Enrazar la muestra del anillo con una espátula caliente.
- Colocar el anillo más el asfalto con el soporte dentro de un vaso de precipitación con agua destilada.
- Bajar la temperatura del agua a 4 °C y mantener esta temperatura durante 15 minutos.
- Calentar el agua del vaso a una velocidad de 5 °C grados por minuto con la esfera sobre la muestra.
- Efectuar la lectura del termómetro cuando la esfera traspase el anillo y recorra 25,4 mm de la parte inferior del anillo al fondo del vaso

- Este mismo procedimiento se realizara para todos los tipos de muestra.

3.7.5.- ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN (ASTM D 1310-01 AASHTO T79-96)



Figura 3.25 Equipo para realizar el ensayo del punto de inflamación

- Calentar el asfalto a 160 °C.
- Traspasar la muestra hasta la línea de llenado.
- Colocar el termómetro con el bulbo suspendido a 0.6 cm del fondo.
- Calentar la muestra uniformemente de modo que la velocidad este entre 14 °C y 17 °C.
- Aplicara una llama pequeña de fuego cuando la muestra aproximadamente en 200 °C, se repite esta operación cada 2 °C hasta que se inflame.

- A la temperatura que se produce una llamarada en cualquier punto en la superficie de la muestra se llama punto de inflamación.
- No requiere de cálculo por ser el resultado de la lectura directa del termómetro.
- El mismo procedimiento se realizó para todos los tipos de mezclas preparados.

3.8.- INFLUENCIA DEL LIGANTE MODIFICADO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

3.9.- TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

En los ensayos de caracterización del ligante asfáltico normal como del ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual, se realizaron en un número de tres ensayos correspondientes por cada tipo de muestra, dicho número de ensayos se tomó en base a lo que establece el Manual de la ABC que se debe de realizar un mínimo de tres ensayos, para obtener un valor promedio más cercano al valor real.

Para procesar los datos obtenidos de los ensayos de caracterización se usaron tablas para su respectiva tabulación, una medida de tendencia central como es la media para obtener valores más representativos, correlaciones para analizar el comportamiento de las variables y diagramas de barras para observar la variación de las características de los diferentes tipos de muestras de ligante normal y de ligante modificado; también a objeto de comparación con los valores establecidos por la Norma para cada ensayo respectivamente.

En el ensayo de penetración, para evaluar si las tres lecturas son aceptables, se tomó como referencia los criterios de precisión recomendados por el Manual de la ABC que usa la siguiente tabla para aceptar o descartar valores obtenidos del ensayo, aquellos valores que excedan este rango establecido son descartados.

Tabla 3.5 Diferencia máxima entre mediciones

PENETRACION	0 a 49	50 a 149	150 a 249	250 a 500
Máxima diferencia entre la mayor y la menor determinación	2	4	12	20

Fuente: Manual de la ABC Volumen 4

En el caso del punto de ablandamiento serán descartados aquellos datos, cuando la diferencia de temperatura a la cual las dos bolas llegan a tocar la base sea mayor a 1 °C de diferencia entre ellas.

En Manual de la ABC establece que los valores de repetitividad de ensayos de punto de inflamación, serán aceptables cuando la diferencia no sea mayor a 8 °C.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL LIGANTE ASFÁLTICO

3.1.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Con base en el Manual de la ABC volumen 4 que trata de los ensayos a suelos y materiales, se realizó los ensayos de caracterización del ligante asfáltico normal 85-100 y del ligante asfáltico modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual.

Los ensayos de caracterización al ligante asfáltico como penetración, punto de ablandamiento, ductilidad, punto de inflamación y peso específico tanto al cemento asfáltico de referencia 85–100, como al ligante asfáltico modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual fueron realizados en el Laboratorio de Asfaltos de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

El ensayo de viscosidad Saybolt Furol fue realizado en el Laboratorio de Asfaltos del Servicio Departamental de Caminos (SEDECA).

La investigación se llevó a cabo realizando los ensayos de caracterización a un cemento asfáltico normal y a otros tipos de muestras modificadas con diferentes porcentajes en peso (5%, 10%, 15% y 20%) de residuos de plantas de tratamiento tanto de agua potable y residual, en un numero de tres ensayos para cada tipo de muestra, todo esto se basó en una investigación similar que se realizó en el país de Brasil intitulada Evaluación de la Consistencia del Ligante Asfáltico con Adición de Residuos Sólidos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable PTA y de Agua Residual PTAR.

Los resultados obtenidos de la caracterización al ligante modificado con varios porcentajes en peso de residuos de plantas de tratamiento fueron comparados con los

resultados del ligante de referencia para observar la modificación del comportamiento del ligante modificado.

3.2.- MATERIALES EMPLEADOS EN LA MEZCLA

El tipo de asfalto, seleccionado para la modificación con residuos de plantas de tratamiento de agua potable (PTA) y agua residual (PTAR) fue el cemento asfáltico 85-100, proveniente de Brasil de la marca BETUNEL, que es el que se utiliza comúnmente para la pavimentación de las carreteras en nuestro medio Tarija.

Para la modificación del asfalto se empleó los sedimentos resultantes del proceso de tratamiento de las aguas, de las plantas de tratamiento de agua potable y residual que se encuentran en la zona de Tabladita y San Luis de la ciudad de Tarija.



Figura 3.1 Planta de tratamiento de agua potable (Zona Tabladita)



Figura 3.2 Planta de tratamiento de agua residual (por lagunaje-Zona San Luis)

3.3.- MUESTREO DE LOS MATERIALES

3.3.1.- MUESTREO DEL RESIDUO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTA)

Los residuos sólidos de la plantas de tratamiento de agua potable, fueron extraídos de la planta de tratamiento de agua potable del sistema que abastece de agua a la ciudad de Tarija, que se encuentra ubicado en la zona de Tabladita; dicho material fue extraído de las acumulaciones que existen como resultado de las limpiezas periódicas que se realizan al sistema, el material extraído es depositado en recipiente hermético para evitar su contaminación con otros materiales y su posterior transporte a laboratorio.

3.3.2.- MUESTREO DEL RESIDUO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR)

El muestreo de los residuos sólidos de plantas de tratamiento de agua residual, se los realizó tomando como guía el manual de ensayos de suelos y materiales sueltos de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

- De la laguna de oxidación de la planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Tarija, teniéndose una laguna en proceso de secado desde hace dos años con fines de mantenimiento; al presentar una forma casi circular de manera superficial se eligieron dos puntos para la extracción de muestras.
- Previamente a la extracción de muestra de la superficie, se realiza un desbroce de aproximadamente 1 cm con el objetivo de limpiar el lugar para remover el material que fue arrastrado por la acción del viento que es diferente al material de estudio.
- Se realiza la excavación de calicatas con el uso de un pico y pala en los dos puntos elegidos que se mencionaron anteriormente, con el objetivo de obtener una muestra representativa de manera vertical.

- Al momento de ir cavando las calicatas se toman tres muestras de material, una muestra a nivel de la superficie, otra muestra a la profundidad de 40 cm y la última del fondo de la calicata, ya que la altura total aproximada del material depositado por sedimentación en la laguna es de 80 cm.
- El material extraído es depositado en recipientes herméticos para su posterior transporte a laboratorio.



Figura 3.3 Muestreo de los lodos de agua residual

3.3.3.- MUESTREO DEL CEMENTO ASFÁLTICO

El cemento asfáltico es de procedencia Brasileira de la marca BETUNEL, es un cemento asfáltico de penetración 85-100 que es el más usual en nuestro medio en pavimentación debido a las condiciones de clima y temperatura.



Figura 3.4 Cemento asfáltico (Alcaldía de la ciudad de Tarija)

3.4.- PROCESO DE SECADO DE LOS LODOS

3.4.1.- PROCESO DE SECADO AL AIRE LIBRE

Los residuos tanto de las plantas de tratamiento de agua potable como la de agua residual, fueron secados al aire libre por un lapso de tiempo de aproximadamente 10 días, con el objetivo de eliminar parte de la humedad presente en los mismos.

3.4.2.- PROCESO DE INCINERACIÓN DE LOS LODOS

Después del secado al aire libre, los lodos de plantas de tratamiento de agua potable y agua residual fueron secados en horno a una temperatura de 500 °C, con el objetivo de transformar la materia orgánica a ceniza la materia orgánica presente en los lodos.

3.5.- PROCESO DE MOLIENDA Y TAMIZADO DE LOS RESIDUOS

Una vez secado e incinerado, tanto los residuos de las plantas de tratamiento de agua potable como de agua residual fueron molidos de manera manual con el propósito de obtener material pasante el tamiz N°200 (partículas de tamaño menor a 0.075mm) que será el que se use en diferentes porcentajes como elemento modificador del ligante asfáltico.



Figura 3.5 Tamiz N°200 para el tamizado de los residuos

3.6.- PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

Una vez secos, molidos y tamizado los residuos de tal manera que se tenga material con partículas de tamaño menor a 0.075 mm (Tamiz N°200); las modificaciones realizadas consistieron en agregar 5%, 10%, 15% y 20% en peso de residuos tanto de las plantas de tratamiento de agua potable y residual, obteniendo varios tipos de mezclas, tal como se muestra en la siguiente tabla:

MUESTRA TIPO I: Cemento asfáltico (referencia)

Tabla 3.1 Descripción del tipo de muestra, tamaño de la partícula y tiempo de mezclado

TIPO DE LODO	MUESTRA	%p/p	%p/p C.A.	Tp (mm)	Tm (min)
PTA	TIPO II	5	95	0,075	20
	TIPO III	10	90	0,075	20
	TIPO IV	15	85	0,075	20
	TIPO V	20	80	0,075	20
PTAR	TIPO VI	5	95	0,075	20
	TIPO VII	10	90	0,075	20
	TIPO VIII	15	85	0,075	20
	TIPO IX	20	80	0,075	20

Fuente: Elaboración propia

El proceso de mezclado consistió en calentar el asfalto de referencia 85-100 a una temperatura de $190 \pm 1^\circ\text{C}$ antes de agregar los residuos de plantas de tratamiento de agua. Una vez alcanzada la temperatura requerida en el cemento asfáltico, se inició la preparación de los diferentes tipos de muestras mediante un mezclado por un tiempo de 20 min a fin de asegurar el mezclado homogéneo.

3.7.- ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN AL LIGANTE

3.7.1.- ENSAYO DE PENETRACIÓN (ASTM D5 AASHTO T49-57)



Figura 3.6 Penetrómetro

3.7.1.1.- CEMENTO ASFÁLTICO DE REFERENCIA 85-100: MUESTRA TIPO I

PENETRACIÓN a 25°C (dmm)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
89	90	88

Valor menor = 88 dmm

Valor mayor = 90 dmm

Diferencia = 2 dmm

Diferencia máxima = 4 dmm (tabla 2.5)

Como $2 < 4$ los tres valores son aceptables

$$\text{Promedio} = \frac{89 + 90 + 88}{3}$$

Promedio = 89 dmm

Nota: Para los demás ensayos se realizó el mismo procedimiento de verificación si los datos son aceptables o no y también se obtuvo un valor promedio.

3.7.1.2.- LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTA)

TIPO II: 95 % C.A. + 5 % PTA

PENETRACIÓN a 25°C (dmm)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
88	85	89

Promedio = 87,33 dmm

TIPO III: 90 % C.A. + 10 % PTA

PENETRACIÓN a 25°C (dmm)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
87	86	84

Promedio = 85,67 dmm

TIPO IV: 85 % C.A. + 15 % PTA

PENETRACIÓN a 25°C (dmm)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
82	85	83

Promedio = 83,33 dmm

TIPO V: 80 % C.A. + 20 % PTA

PENETRACIÓN a 25°C (dmm)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
80	79	77
Promedio = 78,67 dmm		

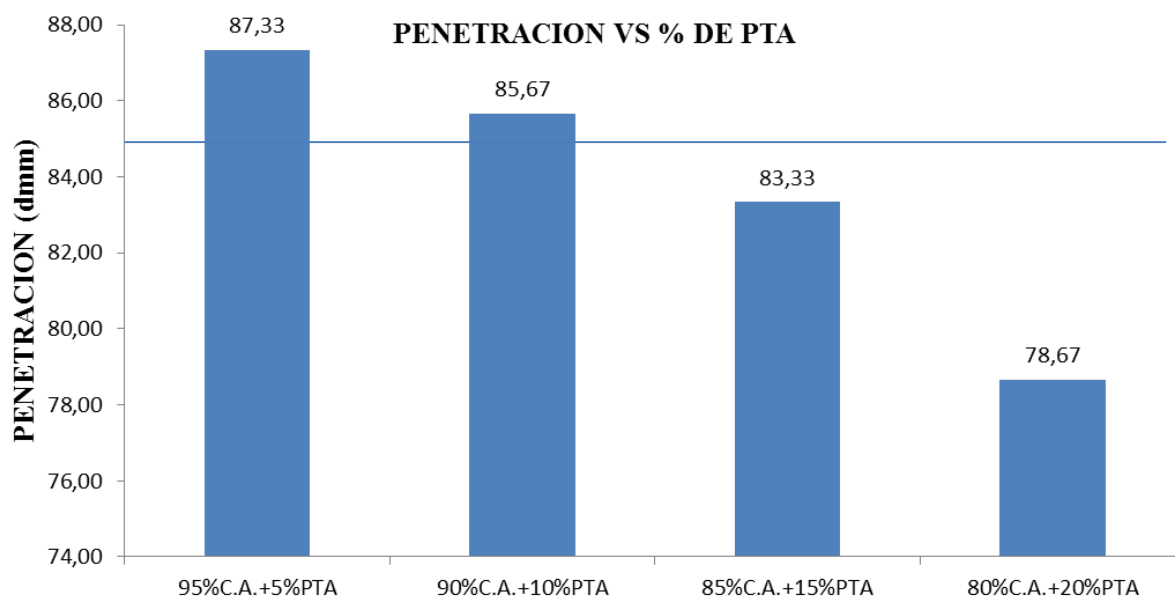


Figura 3.7 Comportamiento de la penetración con relación al % de PTA

3.7.1.3.- LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR)

TIPO VI: 95 % C.A. + 5 % PTAR

PENETRACIÓN a 25°C (dmm)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
87	88	88
Promedio = 87,67 dmm		

TIPO VII: 90 % C.A. + 10 % PTAR

PENETRACIÓN a 25°C (dmm)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
86	88	85

Promedio = 86,33 dmm

TIPO VIII: 85 % C.A. + 15 % PTAR

PENETRACIÓN a 25°C (dmm)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
84	86	85

Promedio = 85,00 dmm

TIPO IX: 80 % C.A. + 20 % PTAR

PENETRACIÓN a 25°C (dmm)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
80	81	78

Promedio = 79,67 dmm

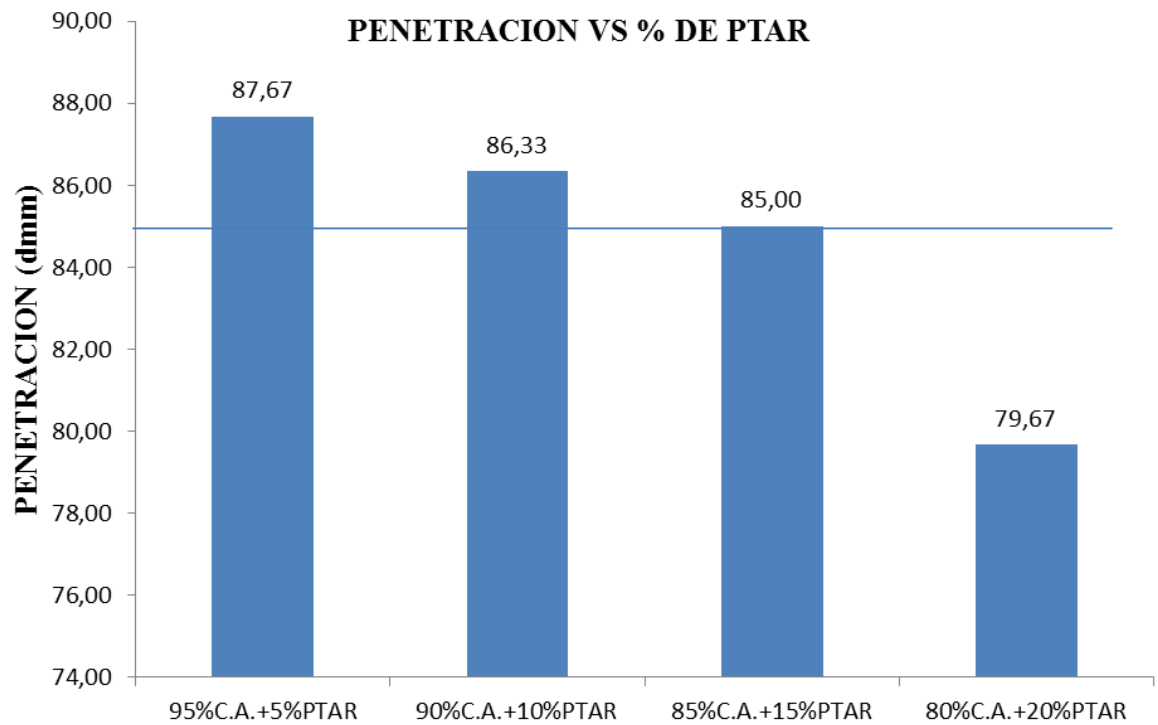


Figura 3.8 Comportamiento de la penetración con relación al % de PTAR

Según Norma 85 – 100 dmm

3.7.2.- ENSAYO DE VISCOSIDAD (AASHTO T72)



Figura 3.9 Viscosímetro Saybolt Furol

3.7.2.1.- CEMENTO ASFÁLTICO DE REFERENCIA 85-100: MUESTRA TIPO I

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (SSF)		
	Ensayo N°1	Ensayo N°1	Promedio
135	155	159	157,0
145	95	92	93,5
155	52	56	54,0
165	40	41	40,5
175	35	32	33,5

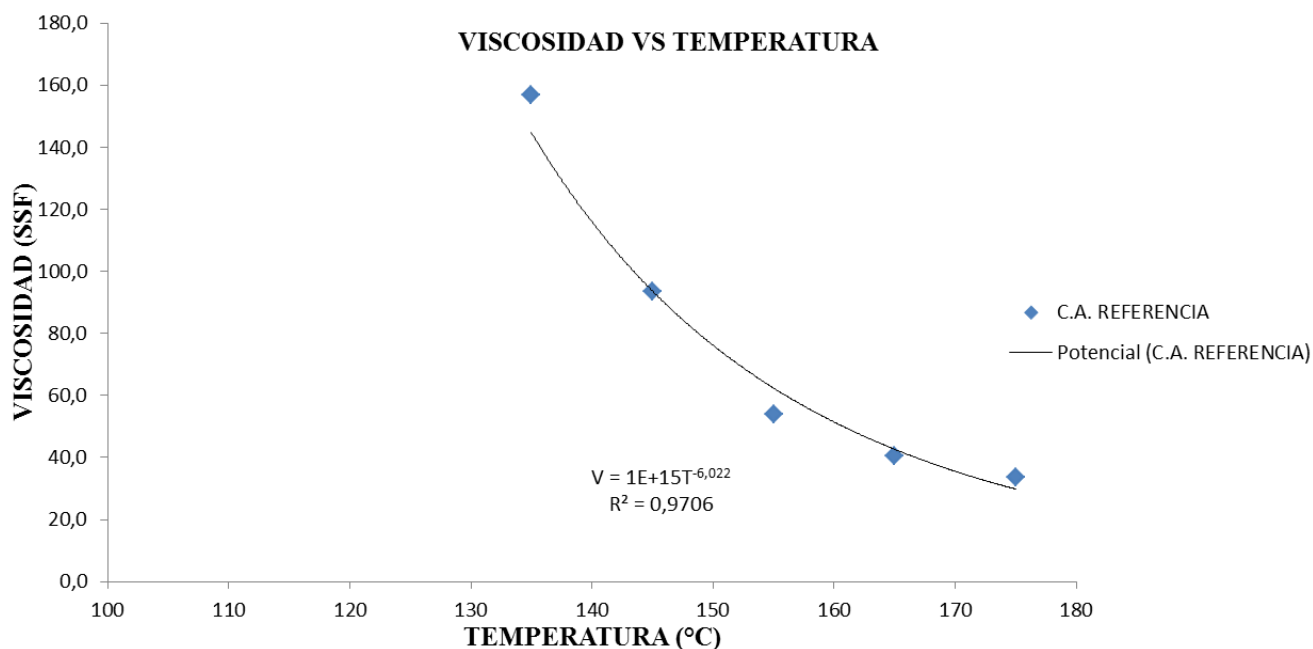


Figura 3.10 Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para el cemento asfáltico de referencia 85-100

3.7.2.2.- LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTA)

TIPO II: 95 % C.A. + 5 % PTA

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (SSF)		
	Ensayo N°1	Ensayo N°1	Promedio
135	192	198	195,0
145	115	121	118,0
155	62	71	66,5
165	58	53	55,5
175	42	36	39,0

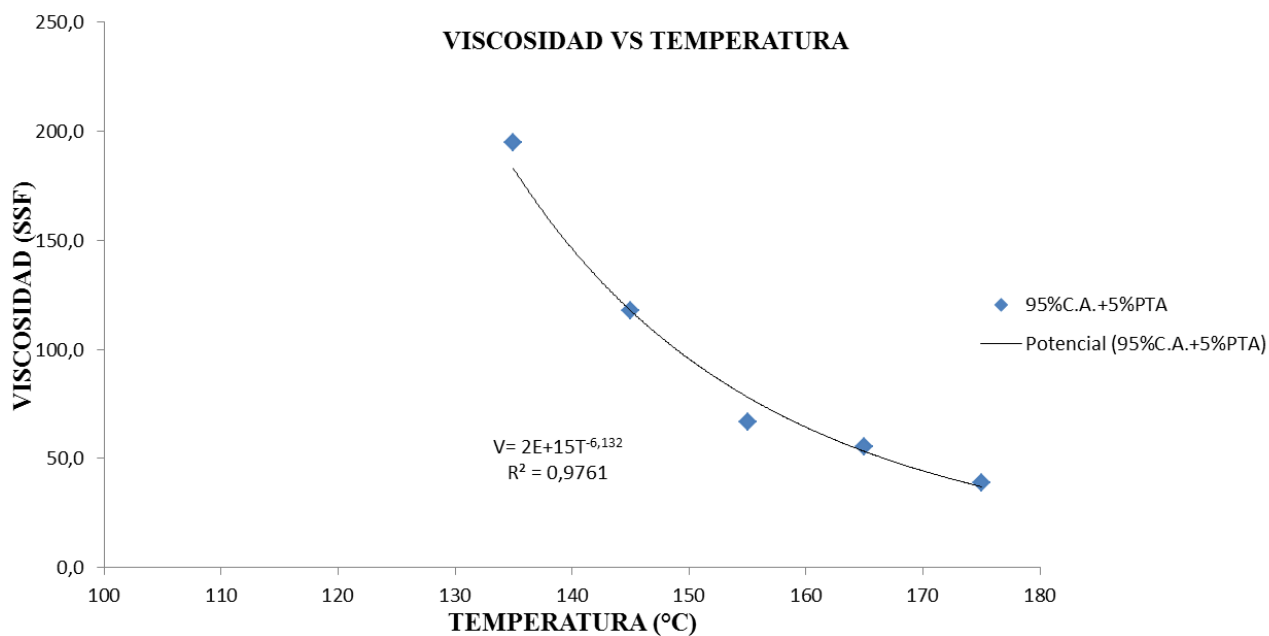


Figura 3.11 Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO II (PTA)

TIPO III: 90 % C.A. + 10 % PTA

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (SSF)		
	Ensayo N°1	Ensayo N°1	Promedio
135	225	230	227,5
145	144	138	141,0
155	82	75	78,5
165	65	69	67,0
175	42	44	43,0

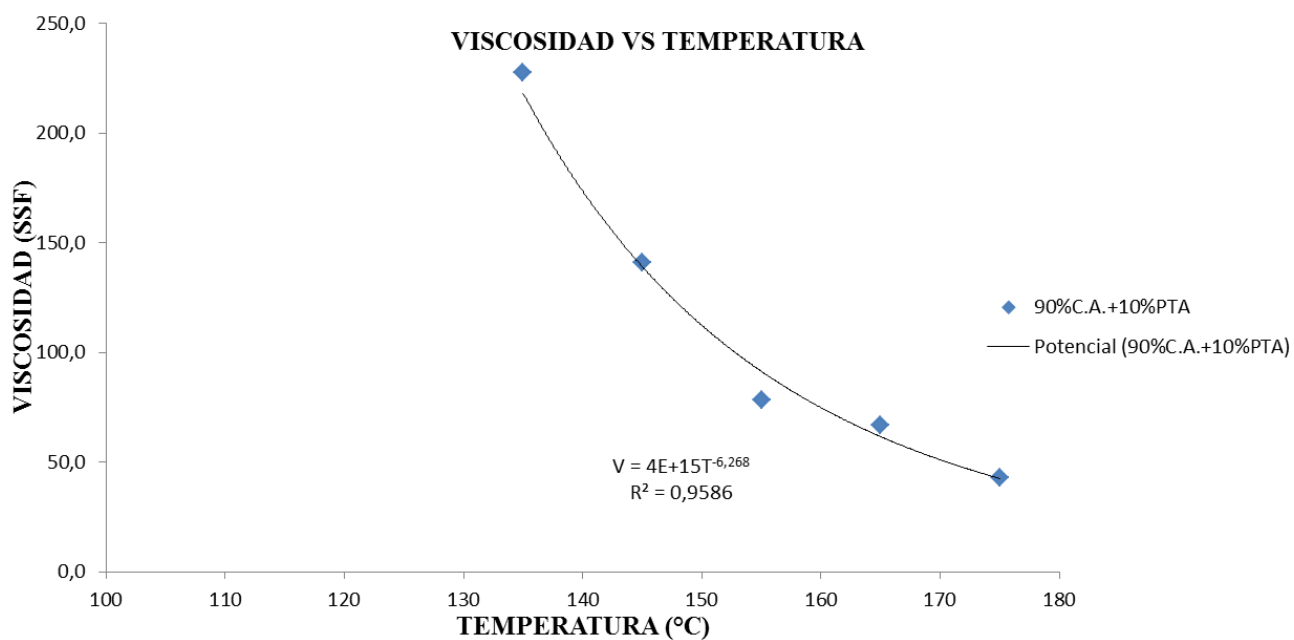


Figura 3.12 Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO III (PTA)

TIPO IV: 85 % C.A. + 15 % PTA

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (SSF)		
	Ensayo N°1	Ensayo N°1	Promedio
135	260	266	263,0
145	160	167	163,5
155	92	88	90,0
165	76	81	78,5
175	46	48	47,0

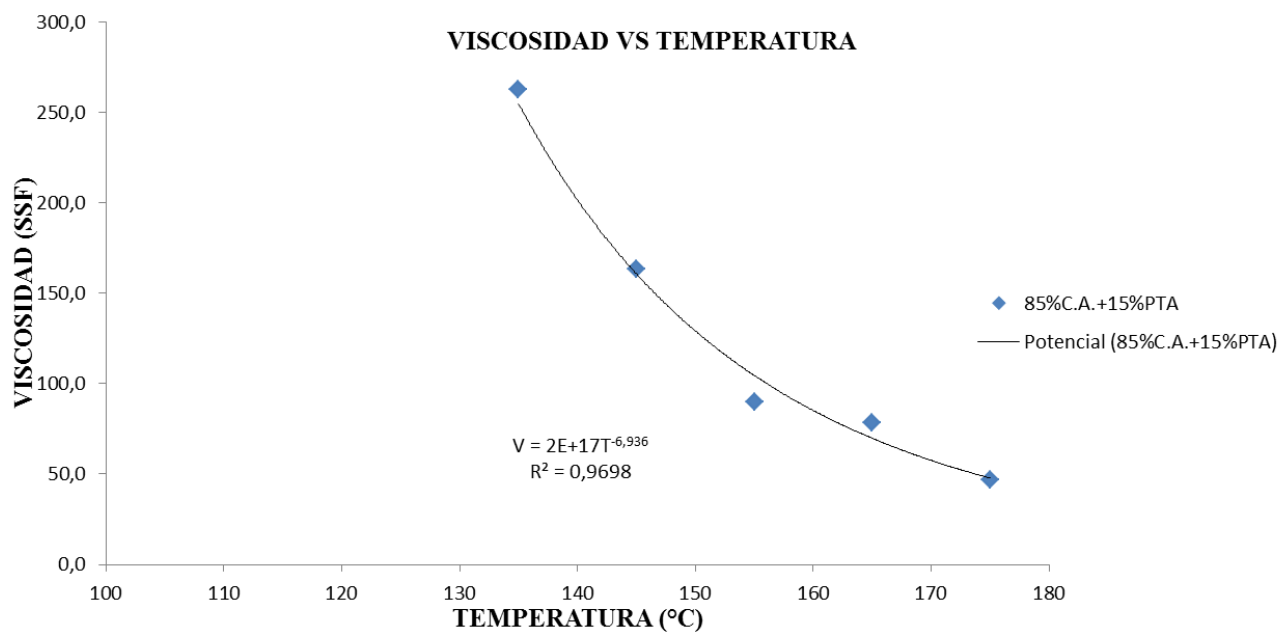


Figura 3.13 Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO IV (PTA)

TIPO V: 80 % C.A. + 20 % PTA

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (SSF)		
	Ensayo N°1	Ensayo N°1	Promedio
135	295	302	298,5
145	190	185	187,5
155	106	98	102,0
165	87	94	90,5
175	54	49	51,5

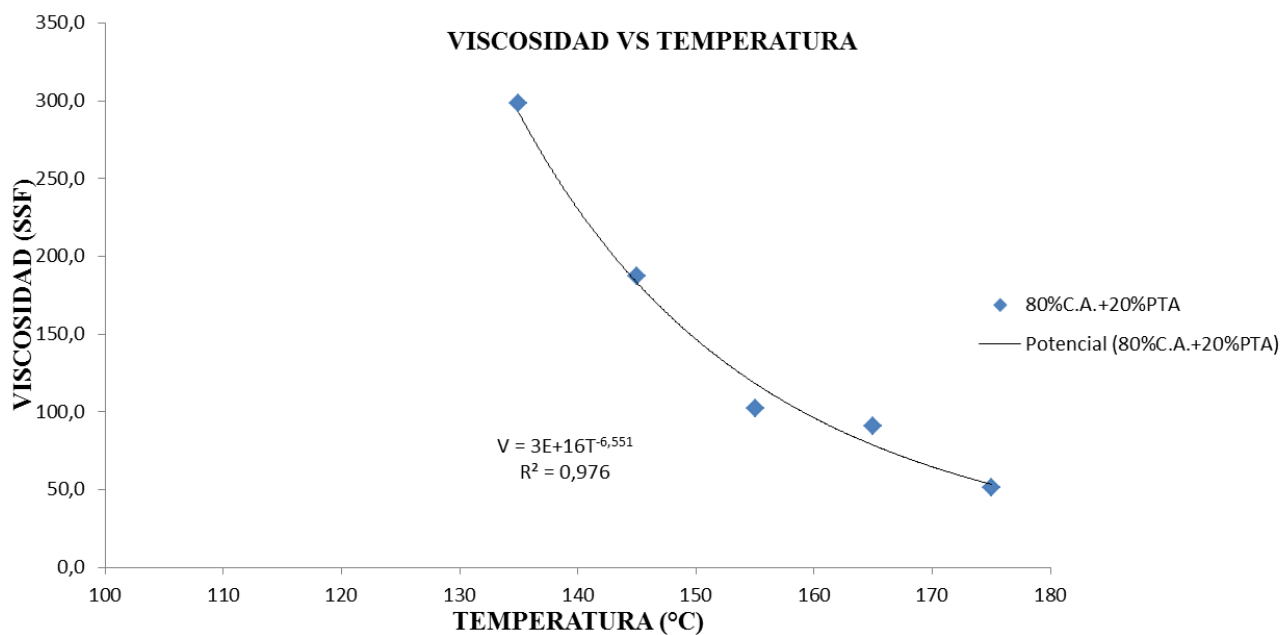


Figura 3.14 Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO V (PTA)

3.7.2.3.- LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR)

TIPO VI: 95 % C.A. + 5 % PTAR

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (SSF)		
	Ensayo N°1	Ensayo N°1	Promedio
135	187	190	188,5
145	113	110	111,5
155	55	65	60,0
165	49	46	47,5
175	34	40	37,0

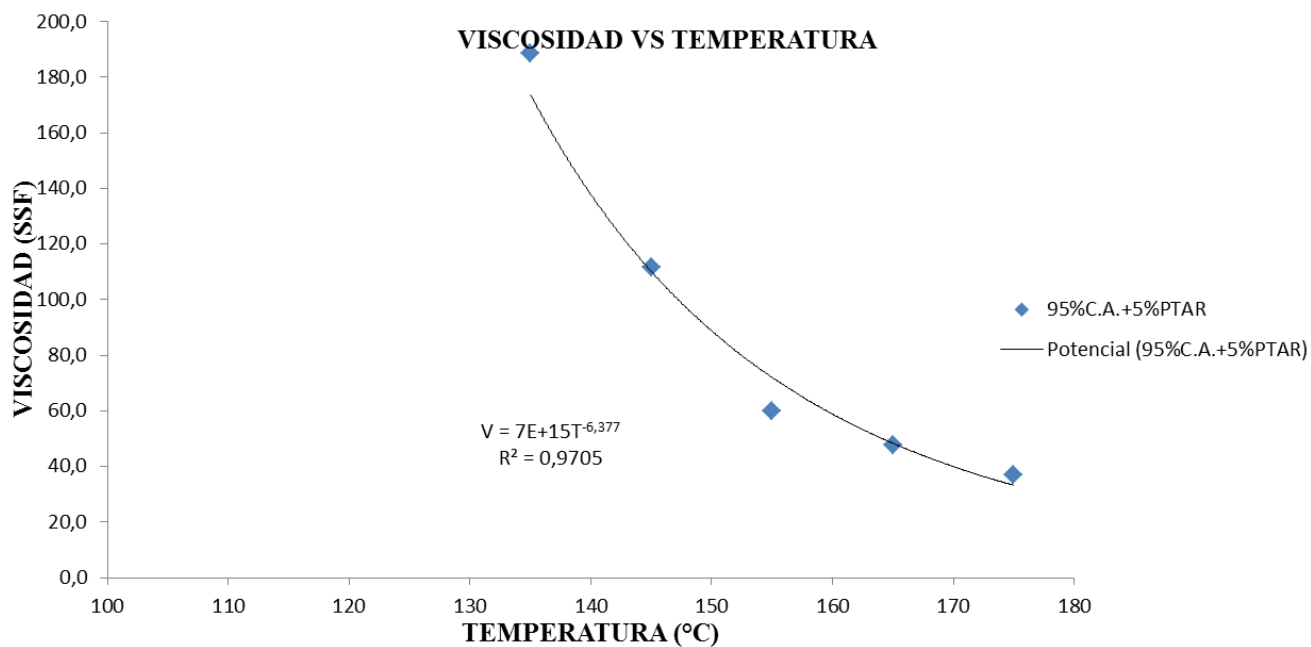


Figura 3.15 Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO VI (PTAR)

TIPO VII: 90 % C.A. + 10 % PTAR

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (SSF)		
	Ensayo N°1	Ensayo N°1	Promedio
135	210	220	215,0
145	124	129	126,5
155	66	64	65,0
165	58	53	55,5
175	36	40	38,0

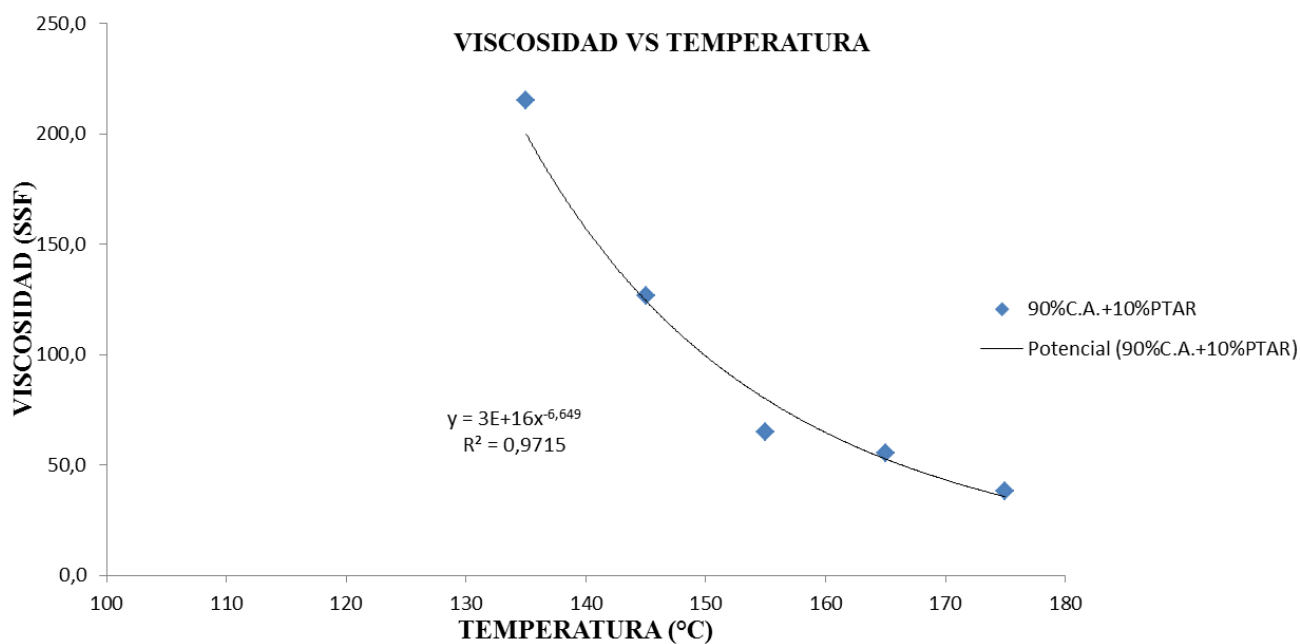


Figura 3.16 Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO VII (PTAR)

TIPO VIII: 85 % C.A. + 15 % PTAR

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (SSF)		
	Ensayo N°1	Ensayo N°1	Promedio
135	245	240	242,5
145	138	143	140,5
155	69	71	70,0
165	65	60	62,5
175	38	41	39,5

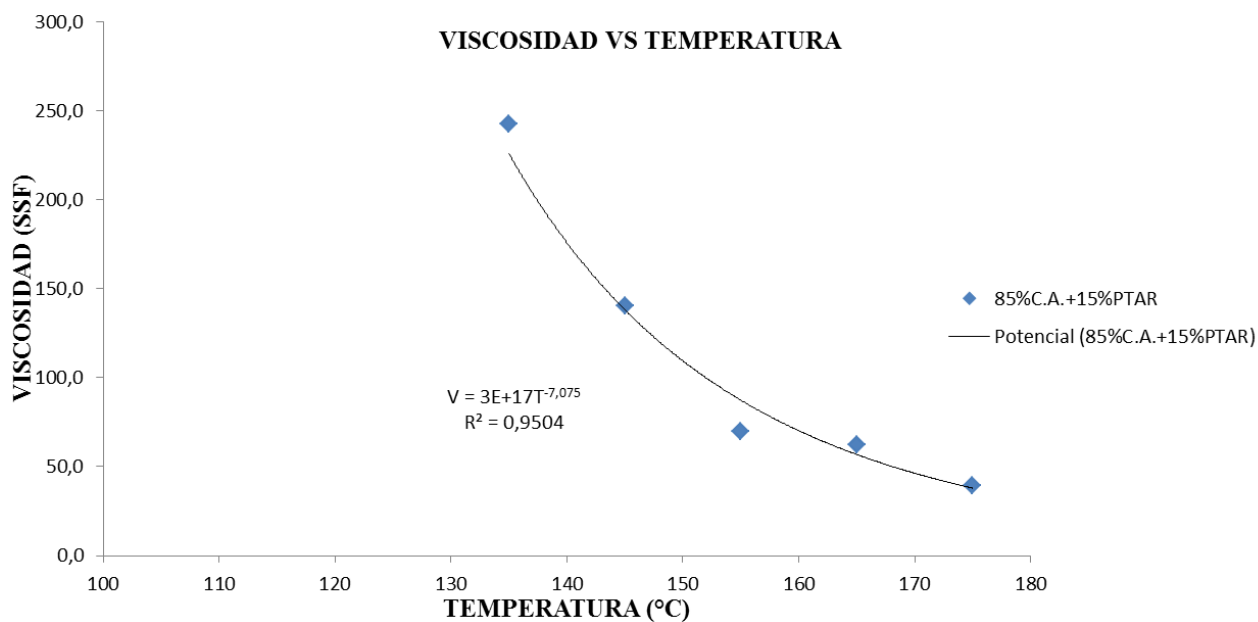


Figura 3.17 Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO VIII (PTAR)

TIPO IX: 80 % C.A. + 20 % PTAR

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (SSF)		
	Ensayo N°1	Ensayo N°1	Promedio
135	268	270	269,0
145	155	158	156,5
155	79	73	76,0
165	75	62	68,5
175	39	45	42,0

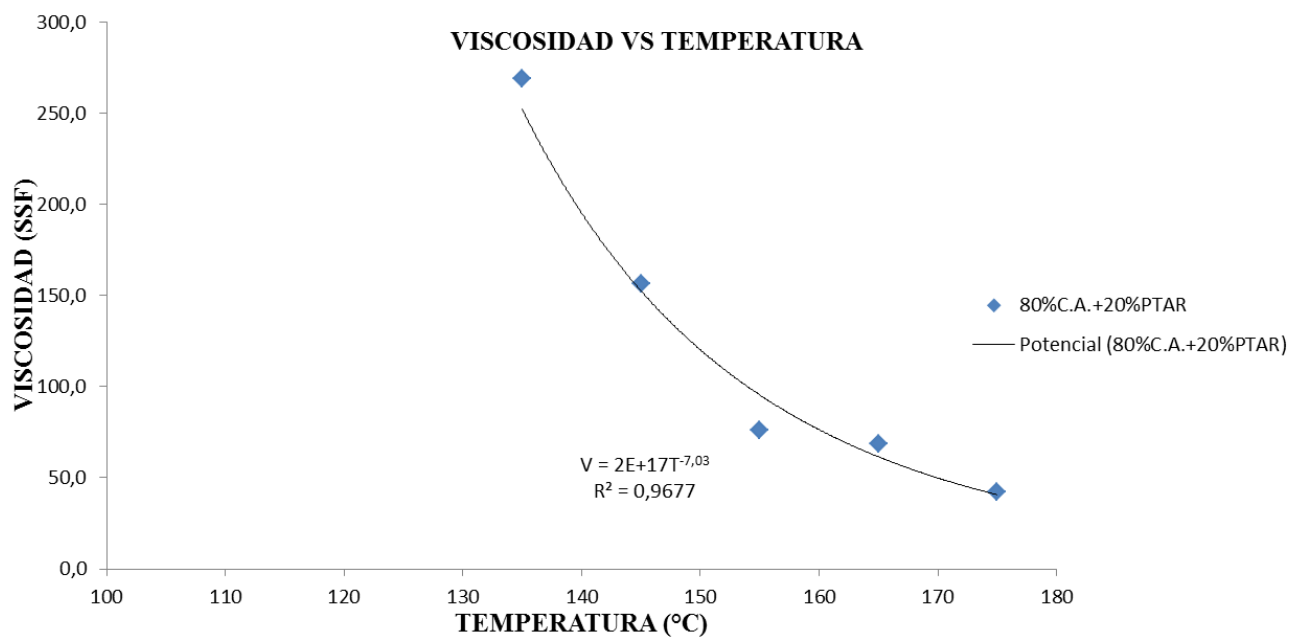


Figura 3.18 Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO IX (PTAR)

Según Norma Mínimo 85 SSF a los 135 °C

3.7.3.- ENSAYO DE DUCTILIDAD A 25°C (ASTM D113 AASHTO T51-00)



Figura 3.19 Ductilómetro

3.7.3.1.- CEMENTO ASFÁLTICO DE REFERENCIA 85-100: MUESTRA TIPO I

DUCTILIDAD a 25 °C (cm)		
Lectura N°1	Lectura N°2	Lectura N°3
138	132	140

$$\text{Promedio} = \frac{138 + 132 + 140}{3}$$

$$\text{Promedio} = 137 \text{ cm}$$

3.7.3.2.- LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTA)

TIPO II: 95 % C.A. + 5 % PTA

DUCTILIDAD a 25 °C (cm)		
Lectura N°1	Lectura N°2	Lectura N°3
121	118	126
Promedio	122	cm

TIPO III: 90 % C.A. + 10 % PTA

DUCTILIDAD a 25 °C (cm)		
Lectura N°1	Lectura N°2	Lectura N°3
117	117	111
Promedio	115	cm

TIPO IV: 85 % C.A. + 15 % PTA

DUCTILIDAD a 25 °C (cm)		
Lectura N°1	Lectura N°2	Lectura N°3
88	95	95
Promedio	93	cm

TIPO V: 80 % C.A. + 20 % PTA

DUCTILIDAD a 25 °C (cm)		
Lectura N°1	Lectura N°2	Lectura N°3
62	68	60
Promedio	63	cm

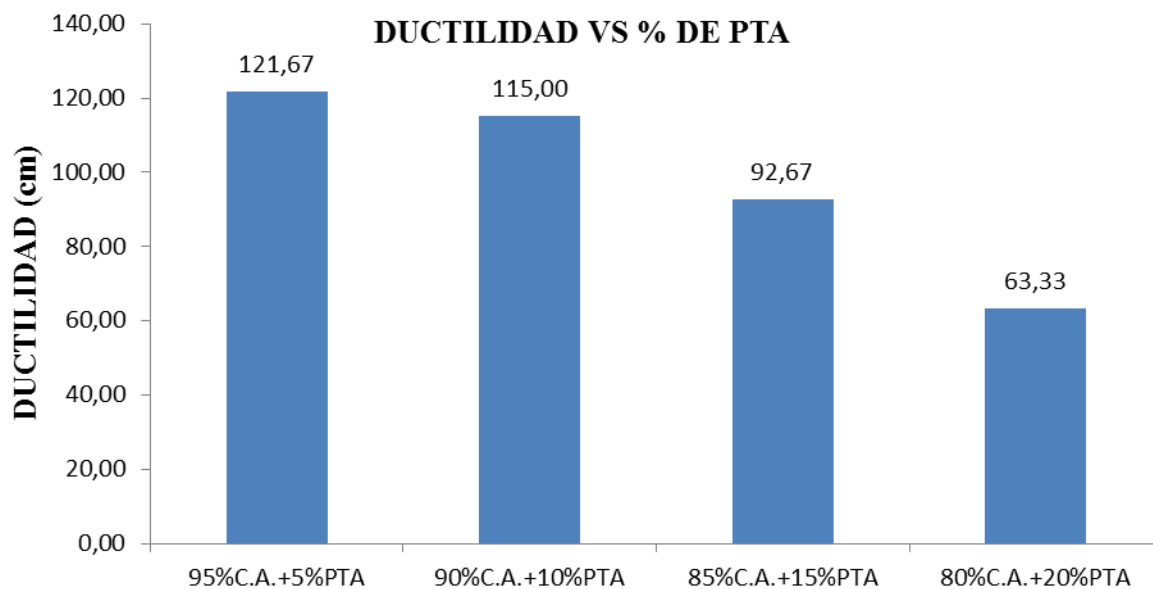


Figura 3.20 Variación de la ductilidad con relación al % de PTA

3.7.3.3.- LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR)

TIPO VI: 95 % C.A. + 5 % PTAR

DUCTILIDAD a 25 °C (cm)		
Lectura N°1	Lectura N°2	Lectura N°3
115	112	118
Promedio 115 cm		

TIPO VII: 90 % C.A. + 10 % PTAR

DUCTILIDAD a 25 °C (cm)		
Lectura N°1	Lectura N°2	Lectura N°3
102	108	105
Promedio 105 cm		

TIPO VIII: 85 % C.A. + 15 % PTAR

DUCTILIDAD a 25 °C (cm)		
Lectura N°1	Lectura N°2	Lectura N°3
88	80	86
Promedio		85 cm

TIPO IX: 80 % C.A. + 20 % PTAR

DUCTILIDAD a 25 °C (cm)		
Lectura N°1	Lectura N°2	Lectura N°3
52	52	58
Promedio		54 cm

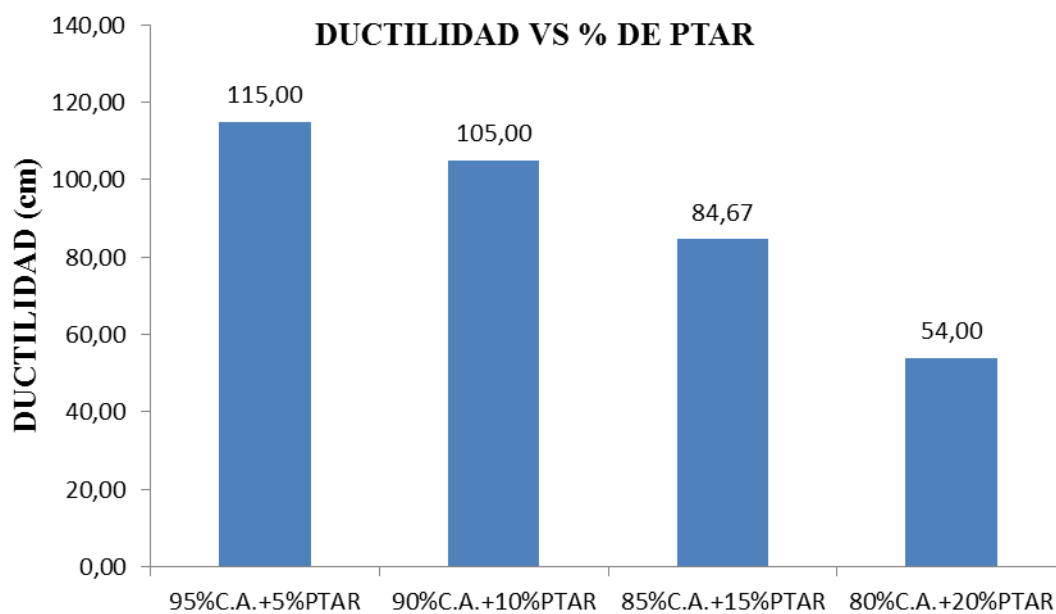


Figura 3.21 Variación de la ductilidad con relación al % de PTAR

Según Norma Mínimo 100 cm.

3.7.4.- ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO (ASTM D36 AASHTO T53-96)

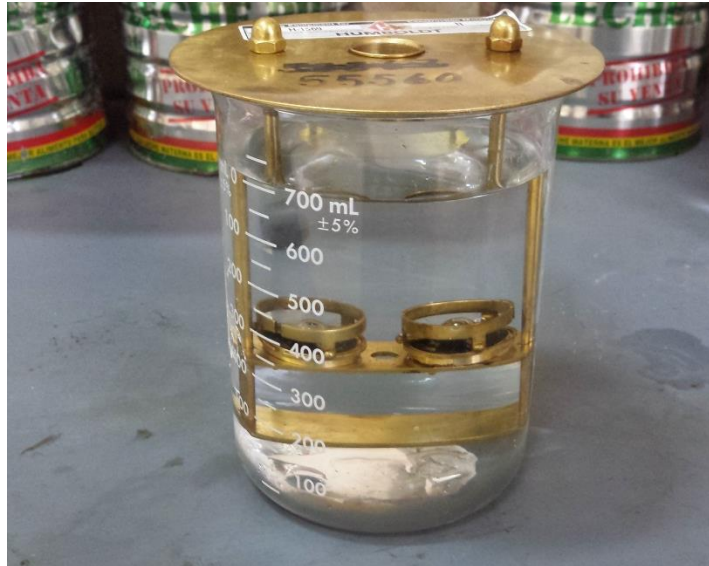


Figura 3.22 Equipo para el ensayo de punto de ablandamiento

3.7.4.1.- CEMENTO ASFÁLTICO DE REFERENCIA 85 – 100: MUESTRA TIPO I

PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
44	45	45

$$\text{Promedio} = \frac{44 + 45 + 45}{3}$$

$$\text{Promedio} = 44,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.7.4.2.- LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

TIPO II: 95 % C.A. + 5 % PTA

PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
44	46	46
Promedio = 45,33 °C		

TIPO III: 90 % C.A. + 10 % PTA

PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
46	47	45
Promedio = 46,00 °C		

TIPO IV: 85 % C.A. + 15 % PTA

PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
47	47	48
Promedio = 47,33 °C		

TIPO V: 80 % C.A. + 20 % PTA

PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
48	49	48
Promedio = 48,33 °C		

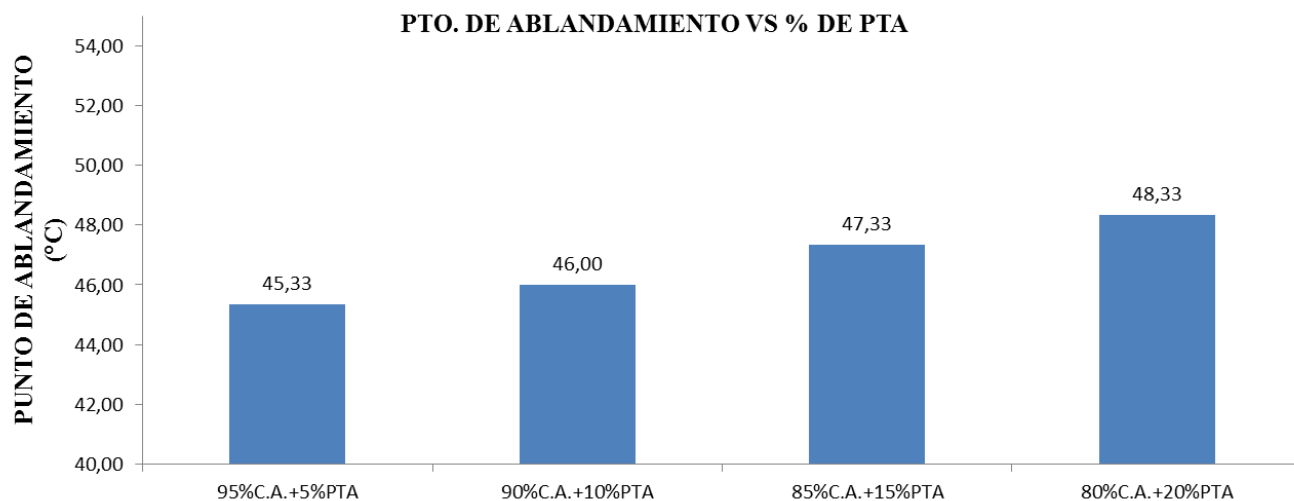


Figura 3.23 Variación del punto de ablandamiento en función al % de PTA

3.7.4.3.- LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

TIPO VI: 95 % C.A. + 5 % PTAR

PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
43	44	45

Promedio = **44,00** °C

TIPO VII: 90 % C.A. + 10 % PTAR

PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
46	46	47

Promedio = **46,33** °C

TIPO VIII: 85 % C.A. + 15 % PTAR

PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
47	46	47

Promedio = 46,67 °C

TIPO IX: 80 % C.A. + 20 % PTAR

PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
48	47	47

Promedio = 47,33 °C

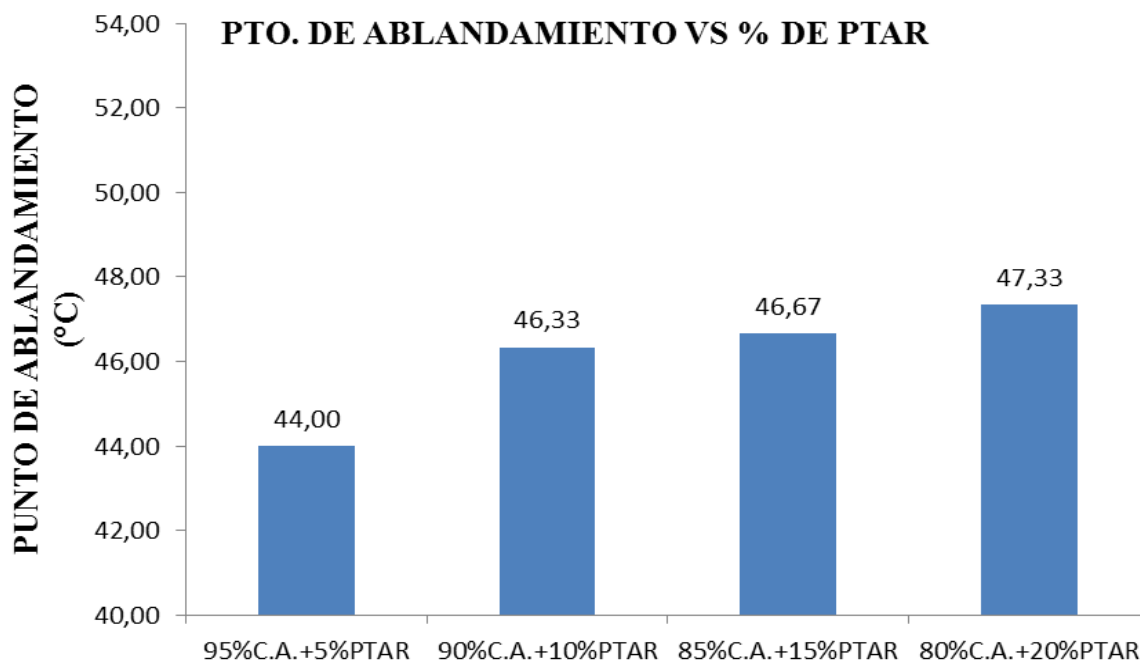


Figura 3.24 Variación del punto de ablandamiento en función al % de PTAR

Según Norma Mínimo 43 °C y Máximo 53 °C

3.7.5.- ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN (ASTM D 1310-01 AASHTO T79-96)



Figura 3.25 Equipo para realizar el ensayo del punto de inflamación

3.7.5.1.- CEMENTO ASFÁLTICO DE REFERENCIA 85 – 100: MUESTRA TIPO I

PUNTO DE INFLAMACION (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
258	261	262

Valor menor = 258 °C

Valor mayor = 262 °C

Diferencia = 4 ° C < 8 °C valores aceptables

$$\text{Promedio} = \frac{258 + 261 + 262}{3}$$

$$\text{Promedio} = 260,33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.7.5.2.- LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTA)

TIPO II: 95 % C.A. + 5 % PTA

PUNTO DE INFLAMACION (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
265	266	268

$$\text{Promedio} = 266,33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

TIPO III: 90 % C.A. + 10 % PTA

PUNTO DE INFLAMACION (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
269	270	271

$$\text{Promedio} = 270,00 \text{ } ^\circ\text{C}$$

TIPO IV: 85 % C.A. + 15 % PTA

PUNTO DE INFLAMACION (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
271	272	274

$$\text{Promedio} = 272,33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

TIPO V: 80 % C.A. + 20 % PTA

PUNTO DE INFLAMACION (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
274	276	275

Promedio = 275,00 °C

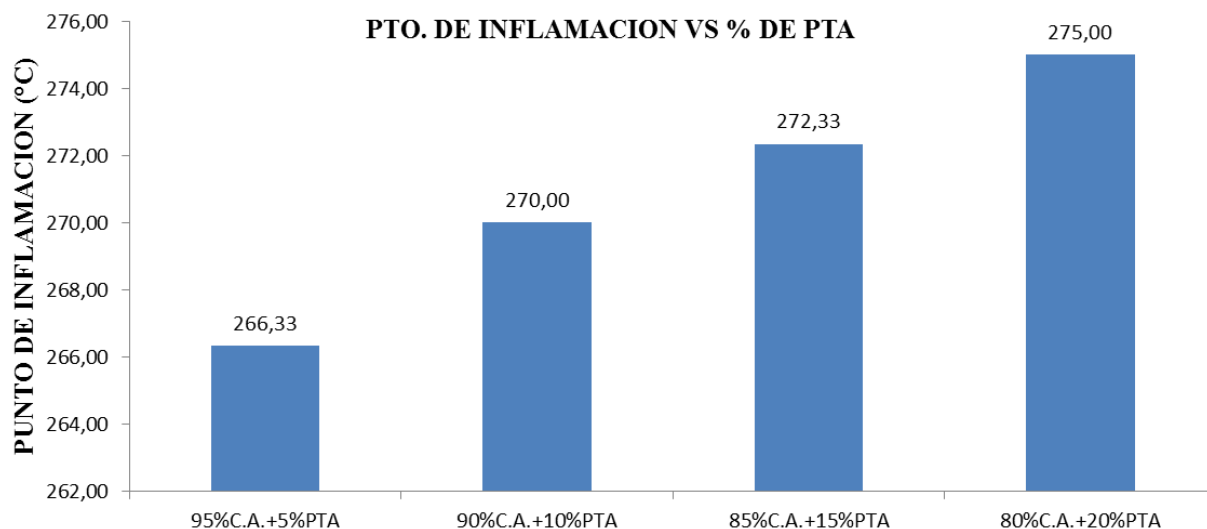


Figura 3.26 Variación del punto de inflación con relación al % de PTA

3.7.5.3.- LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR)

TIPO VI: 95 % C.A. + 5 % PTAR

PUNTO DE INFLAMACION (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
265	264	264

Promedio = 264,33 °C

TIPO VII: 90 % C.A. + 10 % PTAR

PUNTO DE INFLAMACION (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
267	265	265

Promedio = 265,67 °C

TIPO VIII: 85 % C.A. + 15 % PTAR

PUNTO DE INFLAMACION (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
266	266	266

Promedio = 266,00 °C

TIPO IX: 80 % C.A. + 20 % PTAR

PUNTO DE INFLAMACION (°C)		
Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
267	269	267

Promedio = 267,67 °C

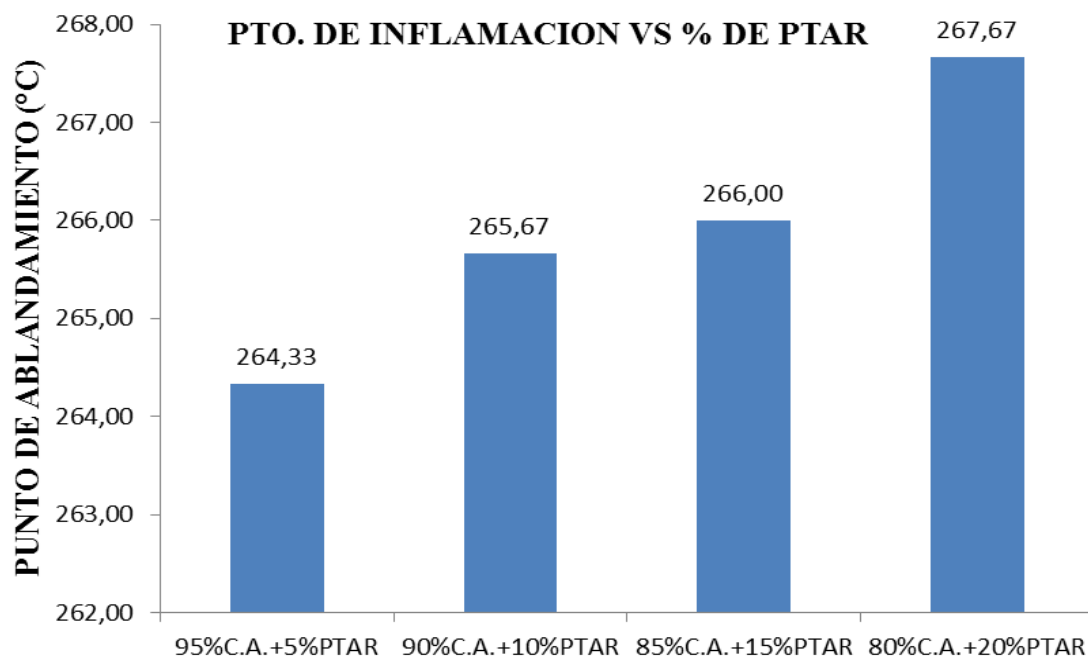


Figura 3.27 Variación del punto de inflación con relación al % de PTAR

Según Norma Mínimo 232 °C

3.8.- RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

3.8.1.- RESULTADOS DEL LIGANTE DE REFERENCIA

ENSAYO	UNIDAD	C.A. NORMAL
Penetración a 25 °C	dmm	89,00
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	SSF	157,00
Ductilidad a 25°C	cm	136,67
Punto de Ablandamiento	°C	44,67
Punto de inflamación	°C	260,33

Fuente: Elaboración Propia

3.8.2.- RESULTADOS DEL LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS PTA

ENSAYO	UNIDAD	TIPO DE MUESTRA			
		TIPO II	TIPO III	TIPO IV	TIPO V
Penetración a 25 °C	dmm	87,33	85,67	83,33	78,67
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	SSF	195,00	227,50	263,00	298,50
Ductilidad a 25°C	cm	121,67	115,00	92,67	63,33
Punto de Ablandamiento	°C	45,33	46,00	47,33	48,33
Punto de inflamación	°C	266,33	270,00	272,33	275,00

Fuente: Elaboración Propia

3.8.3.- RESULTADOS DEL LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS PTAR

ENSAYO	UNIDAD	TIPO DE MUESTRA			
		TIPO VI	TIPO VII	TIPO VIII	TIPO IX
Penetración a 25 °C	dmm	87,67	86,33	85,00	79,67
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	SSF	188,50	215,00	242,50	269,00
Ductilidad a 25°C	cm	115,00	105,00	84,67	54,00
Punto de Ablandamiento	°C	44,00	46,33	46,67	47,33
Punto de inflamación	°C	264,33	265,67	266,00	267,67

Fuente: Elaboración Propia

3.9.- INFLUENCIA DEL LIGANTE MODIFICADO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

3.9.1.- ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MÉTODO MARSHAL

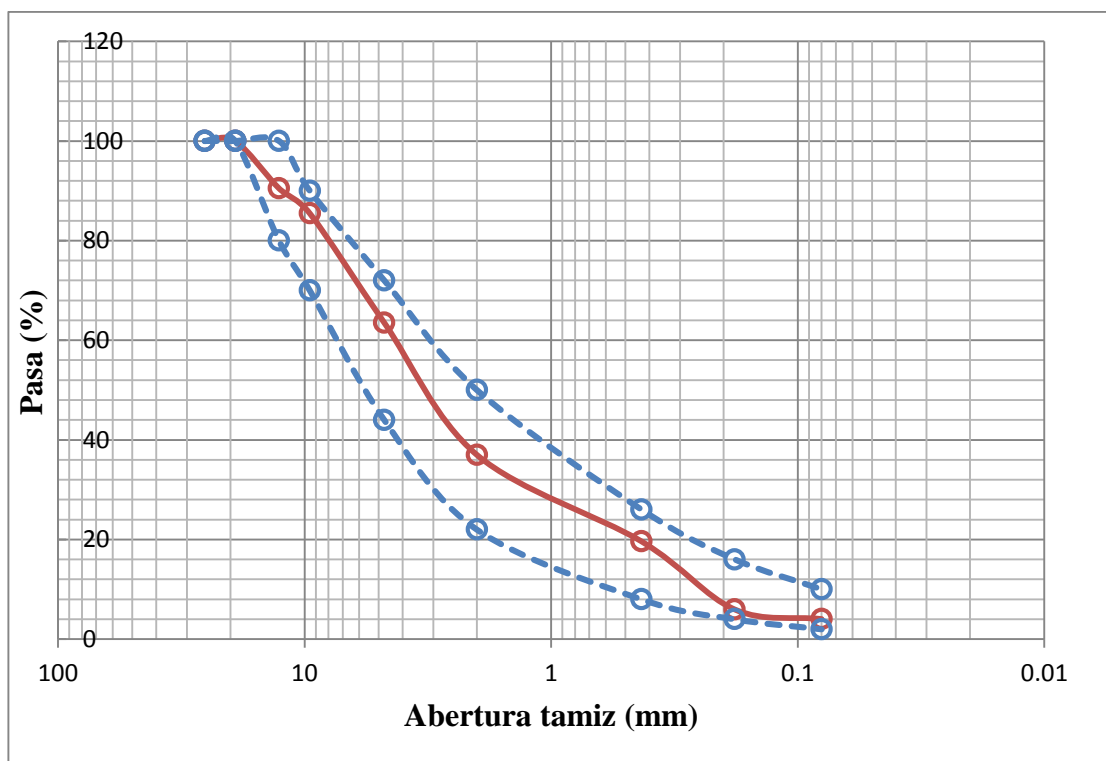
Previamente a la elaboración de las mezclas asfálticas se realizó una caracterización de los agregados a emplearse para verificar que cumplan con las especificaciones mínimas exigidas por las Normas cuyos ensayos se encuentran detallados en la parte de ANEXOS. Posteriormente se procedió a separarlos en tamaños con el máximo nominal que es de 3/4 " que es un tamaño común en carpetas asfálticas.

3.9.1.1.- GRANULOMETRÍA

Tabla 3.3 Faja granulométrica utilizada (Mezcla densa)

FAJA "C"				
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Pasa (%)	Límite inferior	Límite superior
1"	25,00	100	100	100
3/4"	19,00	100	100	100
1/2"	12,50	90,49	80	100
3/8"	9,50	85,46	70	90
N°4	4,75	63,51	44	72
N°10	2,00	36,99	22	50
N°40	0,43	19,62	8	26
N°80	0,18	5,95	4	16
N°200	0,08	4,03	2	10

Fuente: Manual del Instituto del Asfalto



7	2,36	1,73	18,39	90,60	2100	12,5
---	------	------	-------	-------	------	------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 Resultados ensayo Marshall ligante asfáltico modificado con residuos de plantas de tratamiento

Asfalto (%)	Densidad (gr/cm ³)	Vm (%)	VAM (%)	VCA (%)	Estabilidad (Lb)	Flujo (mm)
4,5	2,40	4,20	14,91	71,86	2423	10,3
5	2,41	3,05	15,01	79,67	2612	10,4
5,5	2,41	2,38	15,52	84,69	2601	11,5
6	2,39	2,49	16,70	85,08	2349	12,8
6,5	2,37	2,56	17,83	85,62	1864	13,0
7	2,36	2,34	19,08	87,74	1556	13,5

Fuente: Elaboración propia

NOTA: Los anteriores cuadros son un resumen de los resultados obtenidos del ensayo Marshall, cuyo procedimiento se encuentra más detallado en la parte de **ANEXOS**.

3.9.2.1.- DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

3.9.2.1.1.- MEZCLA ASFÁLTICA CON LIGANTE 85 – 100 NORMAL

Tabla 3.7 Contenido de C.A. óptimo para ligante normal 85-100

Descripción	Referencias	% C.A.
Estabilidad (lb)	Pto. máximo	5,19
Fluencia (1/100")	0,12	6,4
Densidad (gr/cm ³)	Pto. máximo	5,77
% Vacíos en la mezcla	4%	4,93
% Vacíos de agregado mineral	> 13 %	5,1
% Vacíos ocupados por el C.A.	70%	4,72

% C.A: optimo = 5,44

Fuente: Elaboración propia

3.9.2.1.2.- MEZCLA ASFÁLTICA CON LIGANTE MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA

Tabla 3.8 Contenido de C.A. óptimo para ligante modificado

Descripción	Referencias	% C.A.
Estabilidad (lb)	Pto. máximo	5,12
Fluencia (1/100")	0,12	5,81
Densidad (gr/cm ³)	Pto. máximo	5,07
% Vacíos en la mezcla	4%	4,52
% Vacíos de agregado mineral	> 13 %	5,1
% Vacíos ocupados por el C.A.	70%	4,39

% C.A: optimo = 4,90

Fuente: Elaboración propia

NOTA: Las gráficas de donde fueron obtenidos los porcentajes de asfalto tanto para el ligante normal 85-100 como para el modificado con residuos de plantas de tratamiento se encuentran en **ANEXOS**.

3.9.2.2.- PARÁMETROS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.9.2.2.1.-- LIGANTE ASFÁLTICO 85-100

Tabla 3.9 Resultados ensayo Marshall ligante normal 85-100

Contenido óptimo de asfalto (%)	5,44
Estabilidad (Lb)	2504
Fluencia (1/100")	11,4
Densidad (gr/cm ³)	2,25
Vacíos en la mezcla (%)	2,96
Vacíos de agregado mineral (%)	15.2
Vacíos ocupados por asfalto (%)	71

Fuente: Elaboración propia

3.9.2.2.2.- LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO CON RESIDUOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA

Tabla 3.10 Resultados ensayo Marshall ligante modificado

Contenido óptimo de C.A. (%)	4,90
Estabilidad (Lb)	2587
Fluencia (1/100")	10,8
Densidad (gr/cm ³)	2,27
Vacíos en la mezcla (%)	3,21
Vacíos de agregado mineral (%)	14,49
Vacíos ocupados por asfalto (%)	68

Fuente: Elaboración propia

3.10.- ANÁLISIS DE VOLÚMENES Y COSTOS DE MATERIALES

3.10.1.- VOLÚMENES DE MATERIALES

A continuación se realiza una determinación de los volúmenes de materiales necesarios por kilómetro de vía, para la mezcla asfáltica con ligante normal y con ligante modificado, considerando una carpeta de 5 cm de espesor y 7 m de ancho de calzada.

Volumen de carpeta por km = base*espesor*largo = 0.05m*7m*1000m

Volumen de carpeta por km = 350 m³

Peso de la mezcla por km = Densidad*Volumen = 2250kg/m³*350m³

Peso de la mezcla por km = 787500 kg

3.10.1.1.- MEZCLA ASFÁLTICA CON LIGANTE NORMAL 85-100

➤ Cemento Asfáltico

Cemento asfáltico (contenido óptimo 5,44 %) = 5,44%*787500kg/100

Cemento asfáltico = 42840 kg por km

Cemento asfáltico = $\text{Peso/Peso específico} = 42840\text{kg}/1010\text{kg/m}^3$

Cemento asfáltico = 42,41 m³ por km

➤ **Grava 3/4"**

Grava 3/4" = $0,48 \text{ m}^3/\text{m}^3$ mezcla asfáltica

Grava 3/4" = $0,48 \text{ m}^3/\text{m}^3$ mezcla asfáltica*350m³mezcla asfáltica

Grava 3/4" = 168 m³ por km

➤ **Grava 3/8"**

Grava 3/8" = $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ mezcla asfáltica

Grava 3/8" = $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ mezcla asfáltica*350m³mezcla asfáltica

Grava 3/8" = 122,50 m³ por km

➤ **Arena**

Arena = $0,49 \text{ m}^3/\text{m}^3$ mezcla asfáltica

Arena = $0,49 \text{ m}^3/\text{m}^3$ mezcla asfáltica*350m³mezcla asfáltica

Arena = 171,50 m³ por km

MATERIAL POR KM DE VÍA		
MATERIAL	UNIDAD	MEZCLA ASFÁLTICA-LIGANTE NORMAL
CEMENTO ASFÁLTICO	kg	42840
RESIDUO PTA	kg	-----
GRAVA 3/4"	m3	168
GRAVA 3/8"	m3	122,5
ARENA	m3	171,5

Fuente: Elaboración propia

3.10.1.2.- MEZCLA ASFÁLTICA CON LIGANTE MODIFICADO (15% RESIDUO Y 85% C.A.)

➤ Cemento Asfáltico Modificado

Cemento asfáltico modificado (contenido óptimo 4,90 %) = $4,90\% * 787500 \text{kg}/100$

Cemento asfáltico modificado = 38587 kg por km

Cemento asfáltico normal 85-100 = $85\% * 38587 \text{kg}/100$

Cemento asfáltico normal 85-100 = 32798,95 kg por km

Residuo planta de tratamiento = $15\% * 38587 \text{kg}/100$

Residuo planta de tratamiento = 5788 kg por km

La cantidad de agregados es la misma que para la mezcla con ligante normal, ya que ambas mezclas se realizaron bajo mismas condiciones de granulometría.

Grava 3/4" = 168 m³ por km

Grava 3/8" = 122,50 m³ por km

Arena = 171,50 m³ por km

MATERIAL POR KM DE VÍA		
MATERIAL	UNIDAD	MEZCLA ASFÁLTICA-LIGANTE MODIFICADO
CEMENTO ASFÁLTICO	kg	32798,9
RESIDUO PTA	kg	5788
GRAVA 3/4"	m ³	168
GRAVA 3/8"	m ³	122,5
ARENA	m ³	171,5

Fuente: Elaboración propia

3.10.2.- ANÁLISIS DE COSTOS DE MATERIALES POR KM DE VÍA

3.10.2.1.- MEZCLA ASFÁLTICA CON LIGANTE NORMAL

Unidad: m³

MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	COSTO TOTAL
CEMENTO ASFÁLTICO	Ton	42,84	11345	486019,8
GRAVA 3/4"	m ³	168	162	27216
GRAVA 3/8"	m ³	122,5	162	19845
ARENA	m ³	171,5	145	24867,5
TOTAL MATERIALES (Bs)				557948,3

Fuente: Elaboración propia

3.10.2.2.- MEZCLA ASFÁLTICA CON LIGANTE MODIFICADO

Unidad: m³

MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	COSTO TOTAL
CEMENTO ASFÁLTICO	Ton	32,79	11345	372002,55
RESIDUO PTA	Ton	5,7	1000	5700
GRAVA 3/4"	m ³	168	162	27216
GRAVA 3/8"	m ³	122,5	162	19845
ARENA	m ³	171,5	145	24867,5
TOTAL MATERIALES (Bs)				449631,05

Fuente: Elaboración propia

3.11.- CARACTERIZACIÓN DEL AGENTE MODIFICADOR

Para la caracterización de los residuos de plantas de tratamiento tanto de agua potable como de agua residual, la identificación de elementos se llevó a cabo mediante el ensayo de Fluorescencia de Rayos X, cuyo ensayo se desarrolló en el Laboratorio de Física de la UAJMS, cuyos resultados se presentan a continuación.

3.11.1.- CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE PTA

Application	<Omnian>
Sequence	1 of 1
Position	8
Measurement time	15-dic-2014 12:36:27

Normalisation factor	2,271
Minimum He Flow (l/min)	0,52

Compound	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Zn	Rb
Conc	1,034	14,065	58,756	0,681	7,628	0,903	1,475	241,6	0,214	14,826	370,0	577,1
Unit	%	%	%	%	%	%	%	ppm	%	%	ppm	ppm

Compound	Sr	Sn	Ba	Pb
Conc	385,8	930,3	0,145	226,9
Unit	ppm	ppm	%	ppm

3.11.1.- CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PTAR

Application	<Omnian>
Sequence	1 of 1
Position	5
Measurement time	15-dic-2014 11:57:43

Normalisation factor	2,432
Minimum He Flow (l/min)	0,52

Compound	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu
Conc	0,810	9,210	58,647	5,003	3,553	0,123	5,420	3,950	1,095	591,2	11,600	370,4
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	%	ppm

Compound	Zn	Rb	Sr	Zr	Sn	Ba	Pb
Conc	780,9	418,0	283,9	761,1	905,8	0,130	477,5
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm

3.12.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para poder realizar un análisis de resultados se vio conveniente analizar los resultados de un cemento asfáltico convencional de penetración 85-100 más usual en nuestro medio, para poder llevar a cabo una comparación técnica de los resultados y basándose también en las especificaciones establecidas por las normas para ver si

cumplen con dichas especificaciones para ser usados en pavimentación; ya que sin estos no se puede llegar a apreciar las características y ventajas que nos proporciona utilizar un cemento asfáltico modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual.

3.12.1.- PENETRACIÓN

Los resultados del ensayo de penetración a 25 °C muestran, que la adición de los residuos sólidos de plantas de tratamiento de agua potable PTA y de agua residual PTAR al cemento asfáltico normal, producen una disminución de la penetración al ir aumentando el porcentaje de residuos en la mezcla con relación a la penetración en el ligante de referencia que da como resultado una penetración de 89 dmm. Esta disminución de la penetración nos da a entender un aumento en la consistencia del ligante modificado, proporcionándonos un ligante más duro a una misma temperatura. Este aumento de la consistencia y grado de dureza se puede atribuir a la interacción de los residuos con el ligante.

El ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable dan una mayor dureza al ligante modificado es decir una menor penetración que en el ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua residual esto debido a las diferencias que hay en su composición.

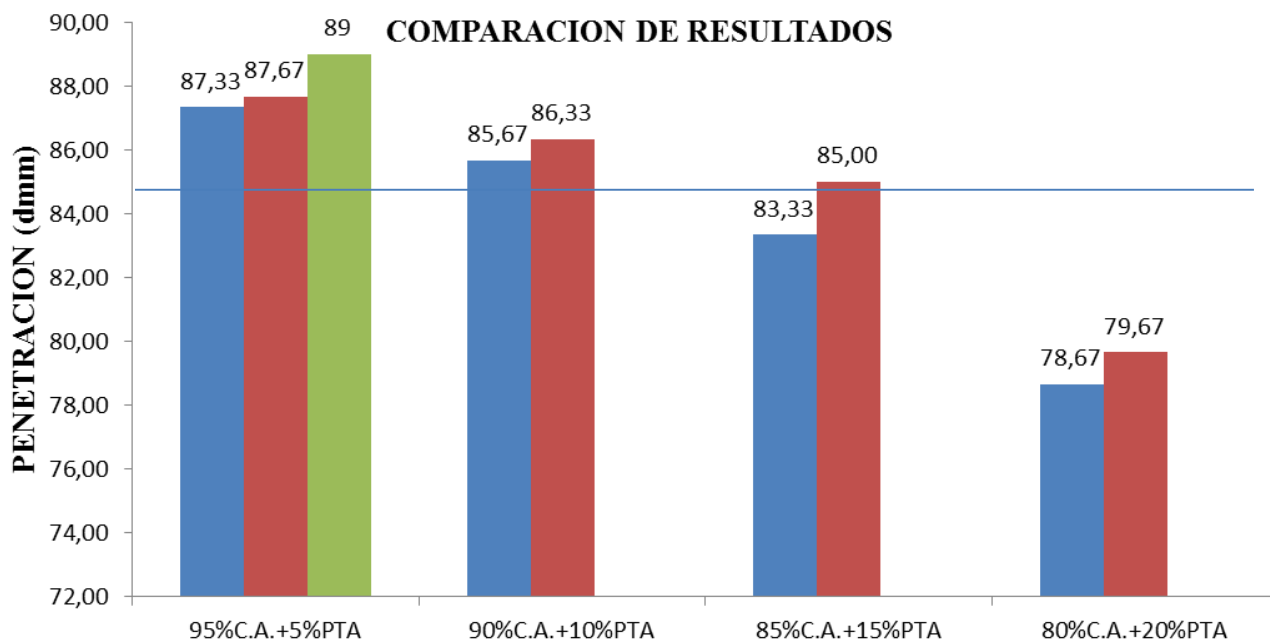


Figura 3.29 Comparación de resultados del ensayo de penetración

3.12.2.- VISCOSIDAD (SAYBOLT FUROL)

Al evaluar la viscosidad de cemento asfáltico se observa que esta va disminuyendo a medida que la temperatura de ensayo aumenta; al determinar la viscosidad de los diferentes tipos de muestras preparadas con diferentes porcentajes en peso de residuos de plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual se nota un aumento de la viscosidad a mayor porcentaje de residuos adicionados para una misma temperatura de ensayo. De igual manera se observa que los residuos de plantas de tratamiento de agua potable producen un aumento mayor de viscosidad que el residuo de plantas de tratamiento de agua residual y el ligante asfáltico de referencia.

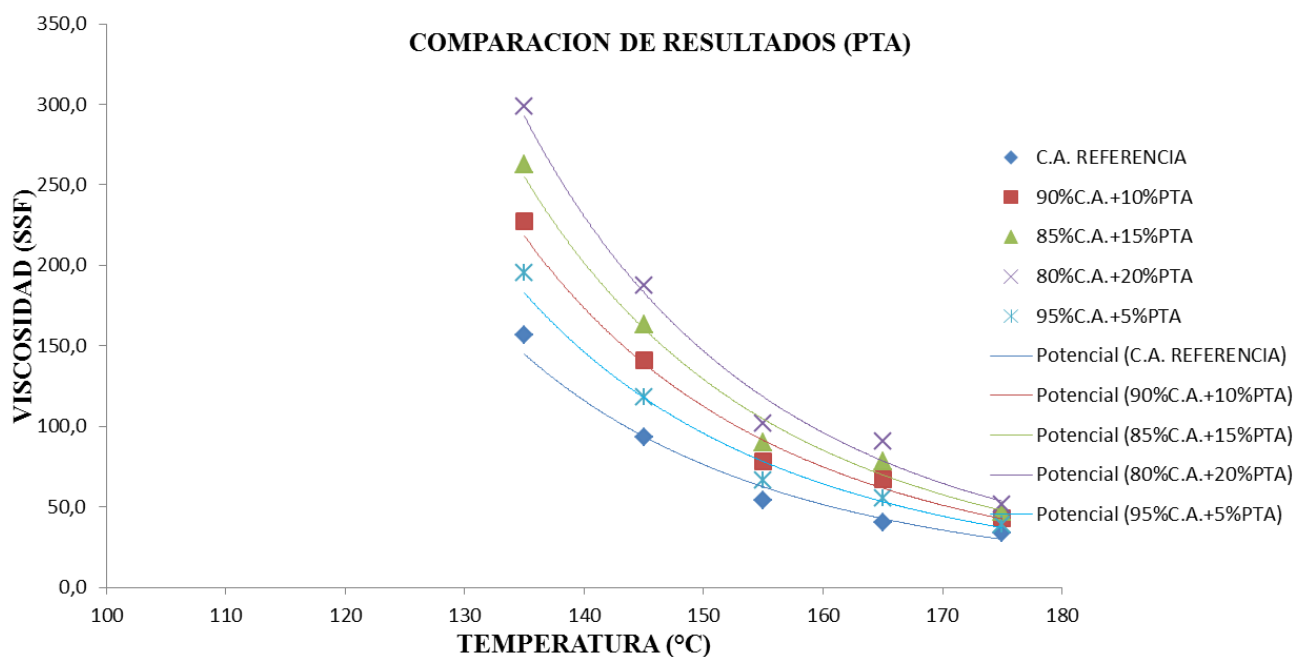


Figura 3.30 Comparación de resultados del ensayo viscosidad (PTA)

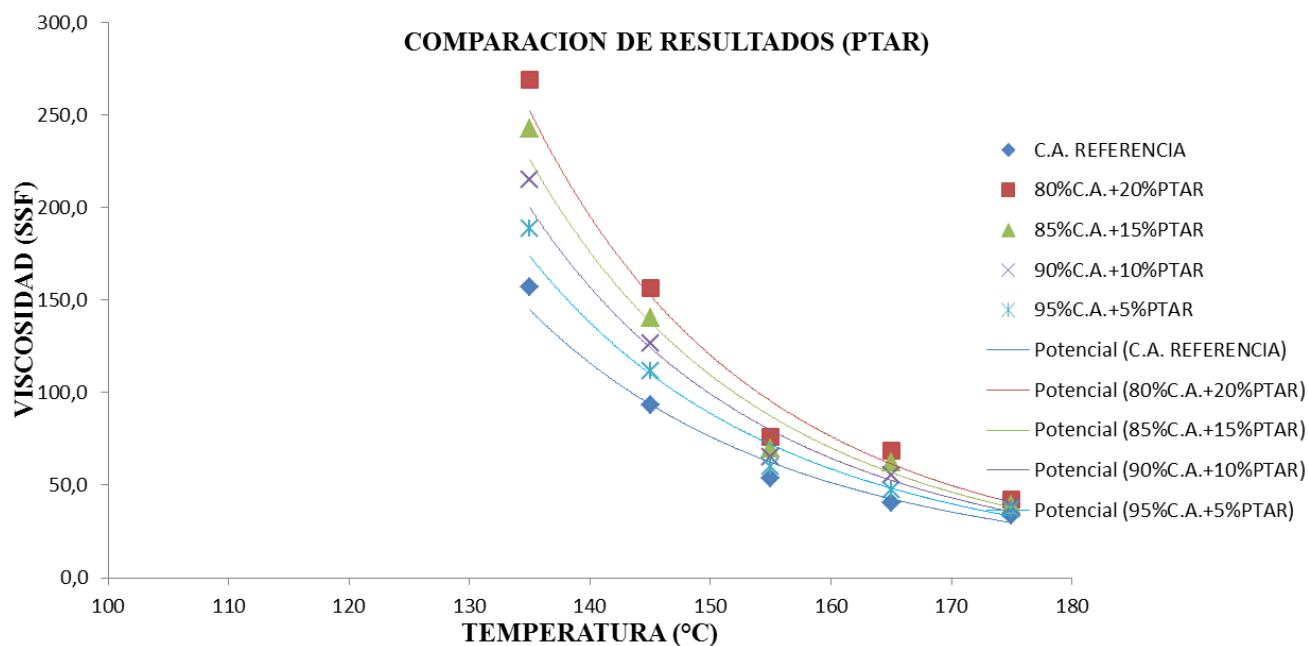


Figura 3.31 Comparación de resultados del ensayo viscosidad (PTAR)

3.12.3.- DUCTILIDAD

En cuanto a la ductilidad de los diferentes tipos de muestra se observa que al adicionar los residuos de plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual, la ductilidad en comparación con el ligante de referencia, va disminuyendo a medida que se va aumentando la concentración de residuos en el ligante modificado, es decir el material va perdiendo plasticidad y elasticidad. La disminución de la ductilidad es mayor en el ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua residual que el modificado con residuos de agua potable, esto se puede deber a la presencia en los residuos de materiales poco compatibles con el ligante asfáltico que afectan directamente a la ductilidad, también se puede atribuir al tamaño de las partículas del residuo.

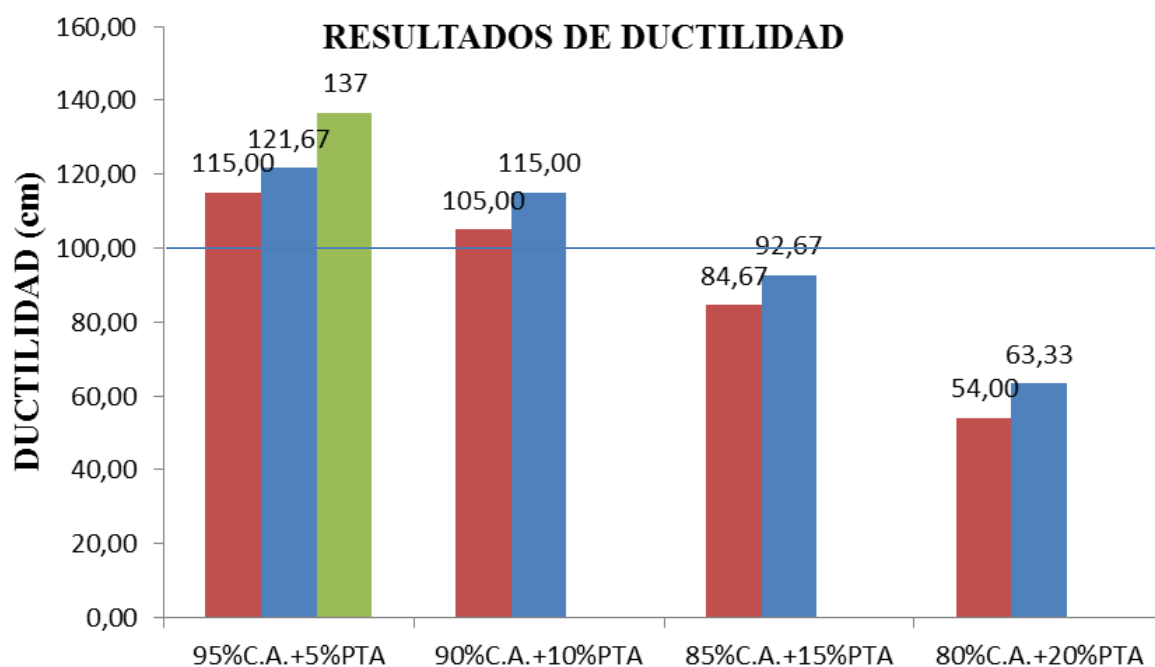


Figura 3.32 Comparación de resultados del ensayo ductilidad

3.12.4.- PUNTO DE ABLANDAMIENTO

El punto de ablandamiento va incrementando a medida que la cantidad de residuos presente en el ligante modificado se aumenta, esto en comparación con el ligante de referencia y el porcentaje de residuos. Es decir que se aumenta la consistencia del ligante modificado. Al igual que en los otros ensayo se observa un mayor punto de ablandamiento en el ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable que el modificado con el de residuos de planta de tratamiento de agua residual y este mayor con referencia al ligante de referencia.

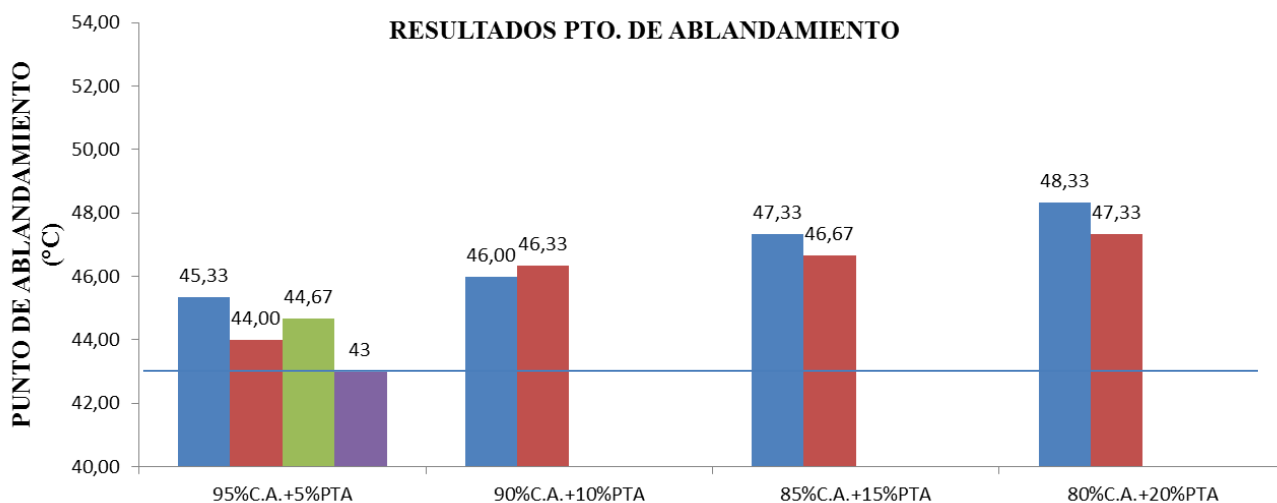


Figura 3.33 Comparación de resultados del ensayo del punto de ablandamiento

3.12.5.- PUNTO DE INFLAMACIÓN

Los resultados del punto de inflamación nos indican que al adicionar los residuos de las plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual, provocan que el punto de inflamación se encuentre a mayor temperatura que el ligante de referencia. Esto puede ser atribuible a que los residuos fueron incinerados y toda la materia orgánica y combustible fue transformada. Todos los valores cumplen con las especificación de que el punto de inflamación debe de ser mayor a 232 °C.

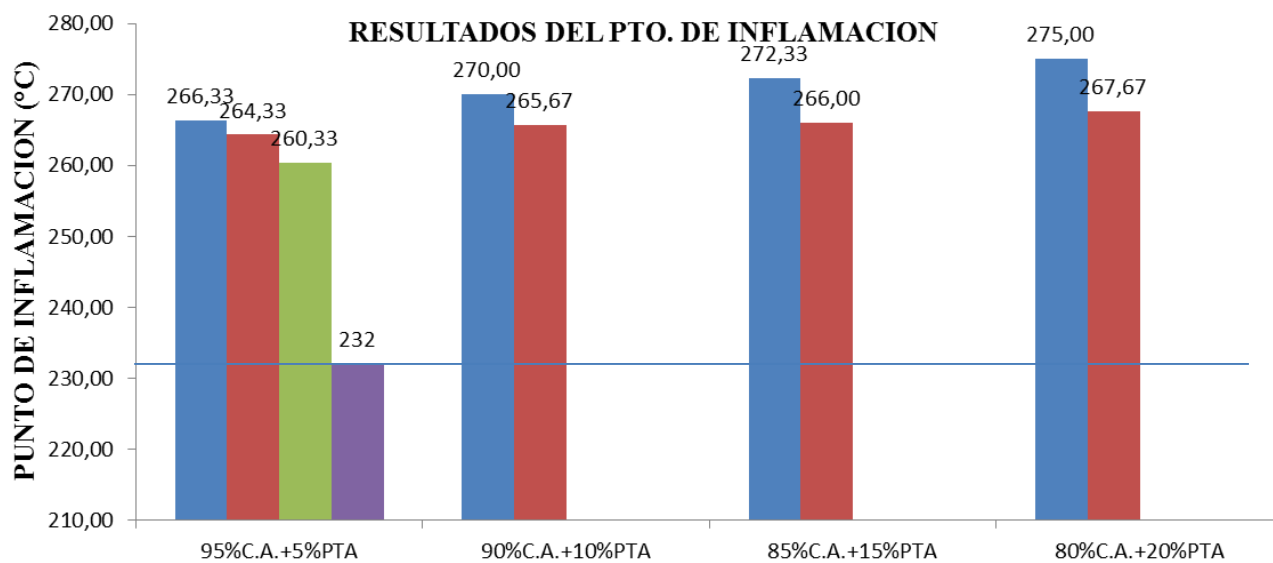


Figura 3.34 Comparación de resultados del ensayo de punto de inflamación

3.12.6.- ENSAYO MARSHALL

Tabla 3.11 Comparación de resultados

Características	Especificaciones	C.A. 85-100	C.A. Modificado
Contenido óptimo de C.A. (%)	4, -9	5,44	4,90
Estabilidad (Lb)	>1500	2504	2587
Fluencia (1/100")	8. - 16	11,4	10,8
Densidad (gr/cm ³)	.....	2,25	2,27
Vacíos en la mezcla (%)	3. - 5	2,96	3,21
Vacíos de agregado mineral (%)	> 13	14,49	15,2
Vacíos ocupados por asfalto (%)	65 - 75	71	68

En la tabla anterior se realiza una comparación de resultados obtenidos para una mezcla realizada con cemento asfáltico normal 85-10 y para otra mezcla realizada con ligante asfáltico modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua, en donde se puede evidenciar de la variación de algunas propiedades más que otras al emplear este ligante asfáltico modificado.

Se puede observar que el contenido de cemento asfáltico óptimo es menor en la mezcla con ligante modificado que en la mezcla con ligante normal.

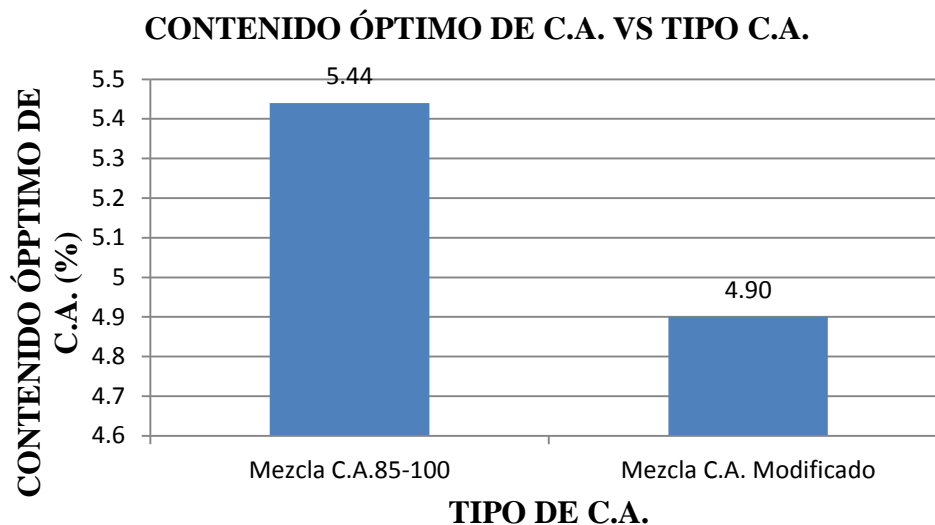


Figura 3.35 Comparación de resultados contenido óptimo de C.A. vs tipo de C.A.

La estabilidad es mayor en aquella mezcla asfáltica con ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua, que en la mezcla asfáltica con ligante normal, reflejándose la influencia del aumento de la consistencia del ligante asfáltico al ser modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua.

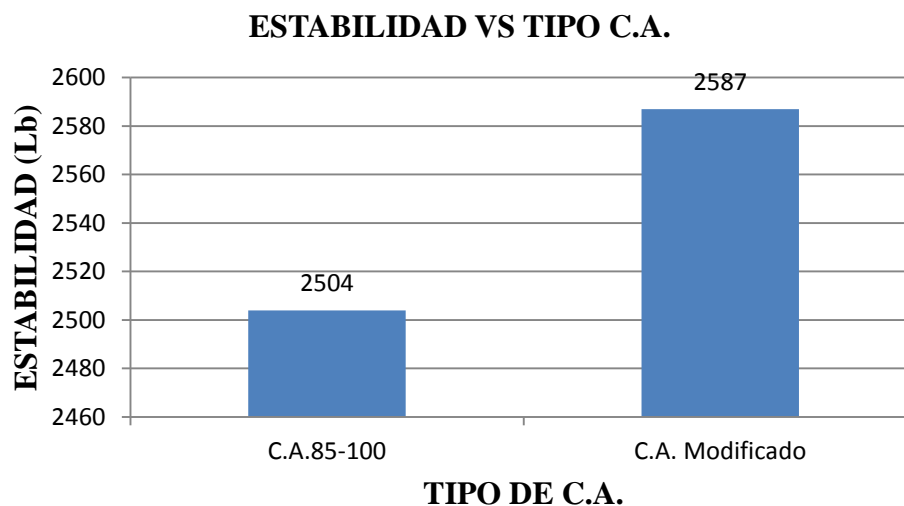


Figura 3.36 Comparación de resultados Estabilidad vs tipo de C.A.

Al aumentar la consistencia del ligante asfáltico modificado se puede apreciar una disminución de la fluencia en la mezcla asfáltica, dando como resultado una mezcla más rígida y dura de menor susceptibilidad térmica

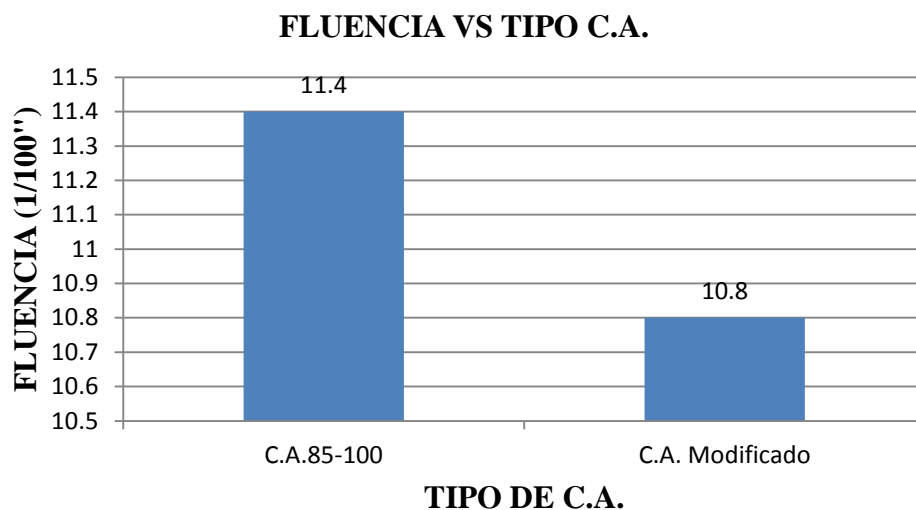


Figura 3.37 Comparación de resultados Fluencia vs tipo de C.A.

En la siguiente grafica de comparación se puede apreciar un aumento en la densidad de la mezcla, esto debido también a que el ligante modificado presenta una mayor densidad que el ligante normal.

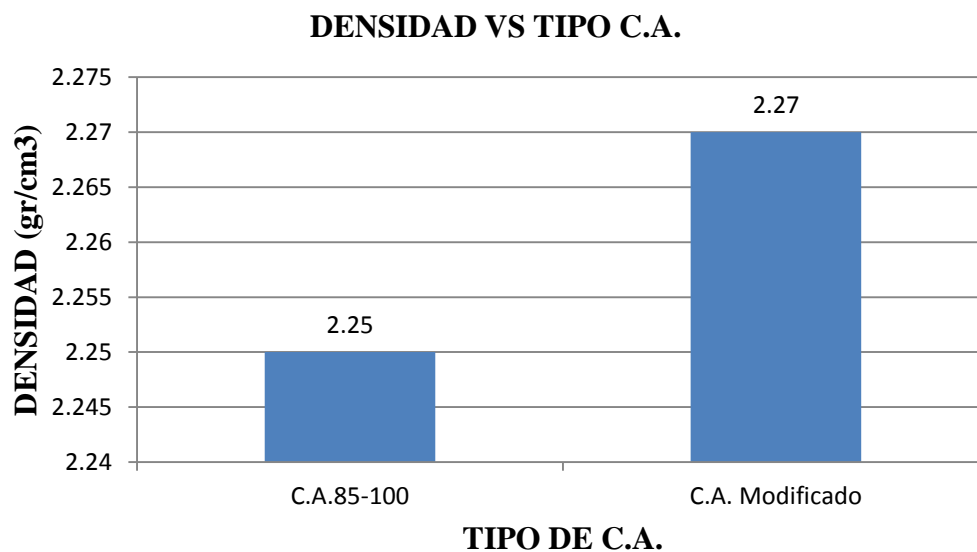


Figura 3.38 Comparación de resultados Densidad vs tipo de C.A.

Los vacíos en la mezcla tienden a aumentar en la mezcla con ligante modificado en comparación a aquella mezcla preparada con ligante normal, esto debido a la mayor viscosidad del ligante modificado.

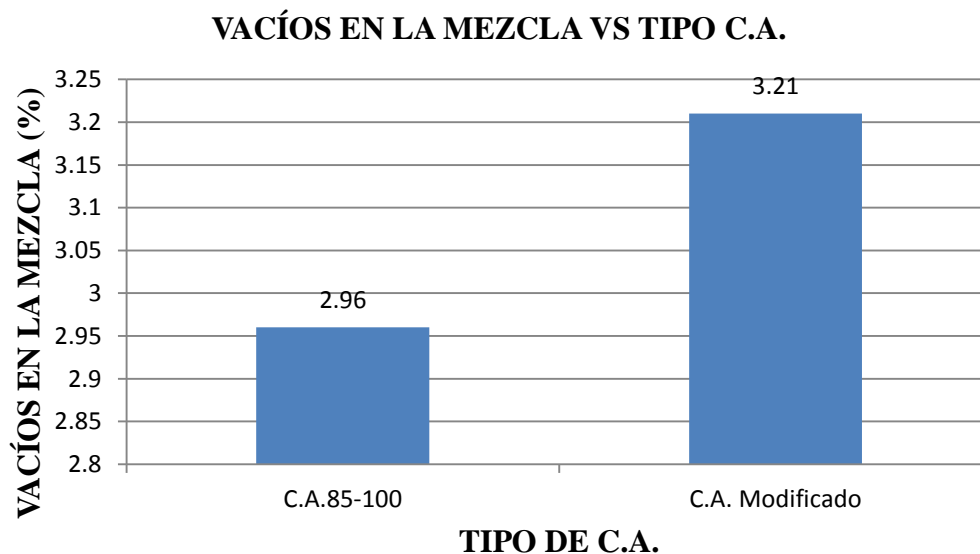


Figura 3.39 Comparación de resultados Vacíos en la mezcla vs tipo de C.A.

En los vacíos del agregado mineral no se presenta mucha diferencia en una mezcla con respecto a la otra mezcla, puesto que este volumen depende más que todo de la granulometría del agregado pétreo usado para el diseño de las mezclas.

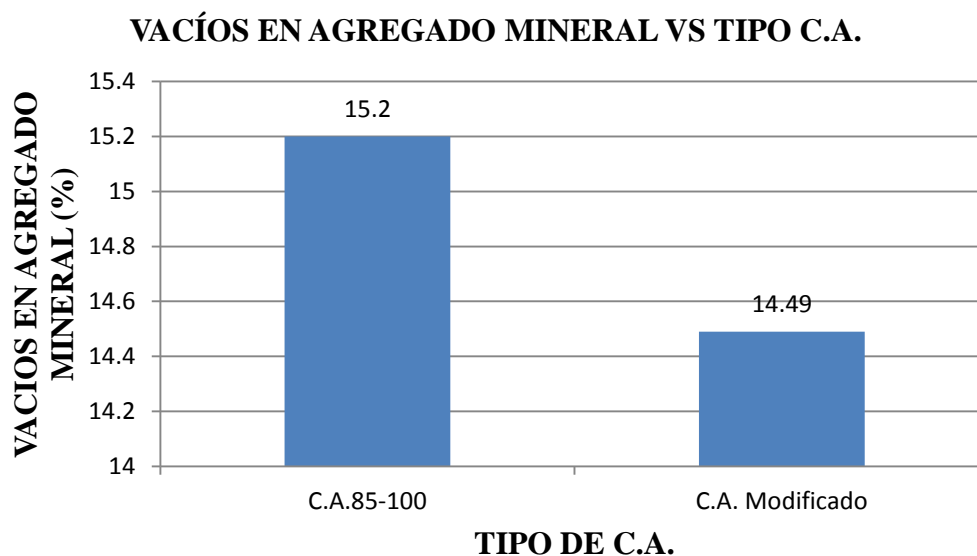


Figura 3.40 Comparación de resultados Vacíos agregado mineral vs tipo de C.A.

Los vacíos ocupados en la mezcla con ligante modificado son menores que en la mezcla con ligante normal, esto debido a que el ligante es más viscoso y consistente.

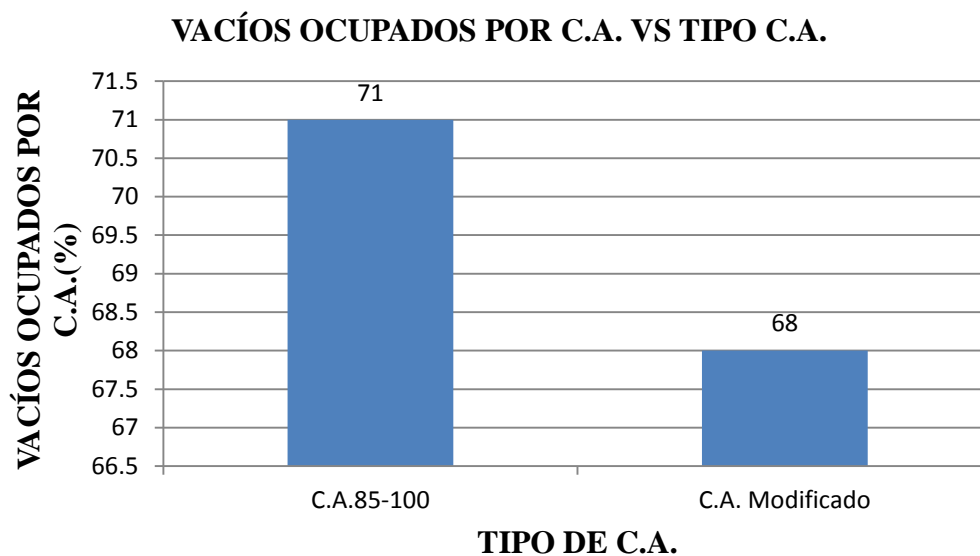


Figura 3.41 Comparación de resultados Vacíos ocupados por asfalto vs tipo de C.A.

3.12.6.- ANÁLISIS DE VOLÚMENES Y COSTOS

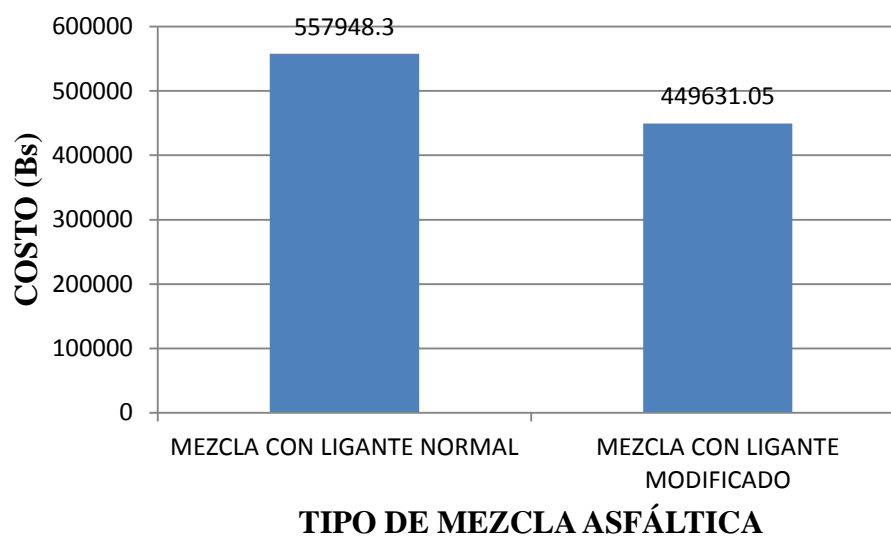
En la siguiente tabla se puede evidenciar la cantidad de los materiales que componen la mezcla asfáltica necesarios para un kilómetro de vía tanto para una mezcla con ligante normal y otra con ligante modificado, en donde se observa que una mezcla asfáltica con ligante modificado requiere menor cantidad de ligante asfáltico, por ende esta mezcla es más económica que una mezcla con ligante normal para una misma combinación granulométrica como se observa en el diagrama de barras de la parte de abajo.

MATERIAL POR KM DE VÍA			
MATERIAL	UNIDAD	MEZCLA ASFÁLTICA-LIGANTE NORMAL	MEZCLA ASFÁLTICA-LIGANTE MODIFICADO
CEMENTO ASFÁLTICO	kg	42840	32798,9
RESIDUO PTA	kg	-----	5788
GRAVA 3/4"	m ³	168	168
GRAVA 3/8"	m ³	122,5	122,5
ARENA	m ³	171,5	171,5

Fuente: Elaboración propia

TIPO	COSTO (Bs)/KM
MEZCLA CON LIGANTE NORMAL	557948,3
MEZCLA CON LIGANTE MODIFICADO	449631,05

Fuente: Elaboración propia



CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.- CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio correspondiente a la evaluación de la consistencia del ligante asfáltico modificado con la adición de residuos sólidos de plantas de tratamiento de agua potable PTA y de agua residual PTAR; en base a los resultados obtenidos y el análisis de los mismos, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Al inicio de este estudio se plantearon objetivos, los cuales se cumplieron a cabalidad, ya que con este trabajo se da a conocer una alternativa de uso o de disposición de los residuos que son generados por las plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual.
- Al aumentar la concentración de residuos en el ligante modificado para un valor mayor al 20% la mezcla se torna poco manejable, ya que existe sedimentación de los sólidos al calentar el asfalto para su uso.
- Cuando se va aumentando la concentración de residuos en el ligante (5 a 20%p/p), también se observa un aumento de su consistencia, presentando una disminución de la penetración, aumento de la viscosidad y aumento del punto de ablandamiento.
- También la adición de los residuos provoca una disminución de la ductilidad, haciendo que este se torne en un material mal frágil al aumentar la concentración de residuos en el ligante.
- En punto de inflamación del ligante modificado con residuos se encuentra a mayor temperatura que en ligante normal, esto puede ser atribuible a la presencia de los residuos que al ser calcinados perdieron a todos aquellos materiales inflamables.
- En base a la evaluación de las características del ligante modificado, se concluyó que el mejor comportamiento físico-químico se da para una

modificación con un 15% de residuo en peso presente en el ligante modificado.

- La inclusión de los residuos de plantas de tratamiento de agua en el ligante asfáltico disminuye la susceptibilidad térmica, esto se ve reflejado en la disminución de la penetración, un aumento del punto de ablandamiento y viscosidad, lo que contribuye a que el asfalto tenga un buen desempeño trabajando a altas temperaturas.
- En cuanto más fino es el material, es decir que las partículas del agente modificador cuanto más pequeñas sean, la interacción con el ligante asfáltico es mayor reflejándose en el aumento de consistencia del ligante asfáltico modificado.
- También en cuanto mayor es el tiempo de mezclado, se da la posibilidad de un mayor grado de interacción, porque se puede deducir que aún existen las posibilidades de lograr un mayor enlace inter molecular en la mezcla.
- El incremento en la viscosidad del ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual, en comparación al ligante normal, se atribuye al proceso de interacción intermolecular que ocurre entre el ligante asfáltico y el residuo.
- Existe cierta afinidad entre el ligante asfáltico y los residuos de plantas de tratamiento de agua, ya que estos últimos poseen materia orgánica la cual es de estructura química parecida con la del ligante.
- De acuerdo a la caracterización de los residuos de plantas de tratamiento de agua potable y agua residual, se tiene la presencia de elementos como aluminio, manganeso, calcio, potasio, fosforo, cromo magnesio, hierro, zinc, rubidio y azufre de entre los cuales tal vez pudiera tener efectos negativos en el ligante asfaltico, pero la cantidad presente en el residuo es demasiado poca como para considerar ello y además se tendría que realizar un estudio más profundo para vez la combinación del mismo dentro del residuo.
- Los agregados usados para la mezcla asfáltica, cumplen con las diferentes especificaciones de calidad establecidos por el Manual de la ABC.

- El contenido óptimo de ligante asfáltico es menor en una mezcla con ligante modificado que en una mezcla con ligante normal, para una carga casi igual, misma granulometría y calidad de los agregados pétreos.
- El ligante asfáltico en la mezcla asfáltica, provoca un aumento de la estabilidad comparada con una mezcla con ligante normal, reflejándose la influencia del aumento en la consistencia del ligante.
- Al aumentar la viscosidad en el ligante modificado, hace que este a altas temperaturas sea menos plástico y por ende presente menores deformaciones al aplicar una carga sobre este a comparación del ligante normal.
- También el ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua, se podrán obtener mezclas asfálticas con menores deformaciones o flujo cuando estas sean sometidas a la acción de cargas producidas por el tránsito vehicular.
- Por tanto se podrían obtener pavimentos con mejores respuestas a los cambios térmicos y disminuyendo los costos de mantenimiento.
- El ligante modificado provoca una disminución de los vacíos ocupados por cemento asfáltico y un aumento del porcentaje de vacíos en la mezcla, esto debido a su mayor consistencia que el ligante normal.
- El ligante modificado mejora la rugosidad, resistencia a la tensión y mejora la resistencia a la fatiga a altas temperaturas.
- Del análisis de costos, se concluye que una mezcla asfáltica con ligante modificado es más económica que una mezcla con ligante normal, esto debido a que en ligante modificado una parte de él es ocupado por los residuos adicionados de las plantas de tratamiento de agua.

4.2.- RECOMENDACIONES

Algunas de las recomendaciones más importantes y relevantes que se pueden dar son las siguientes:

- Al tratarse de materiales en el cual el control de la temperatura es muy estricto, se recomienda contar con termómetros estandarizados pues la variación de este puede causar una mala realización de los ensayos y por consiguiente resultados incorrectos.
- Al incinerar los lodos de plantas de tratamiento, más que todo de agua residual, se produce la generación de gases de olores fuertes, los cuales pudieran ser controlados a través del perfeccionamiento del proceso de combustión y de utilización de filtros.
- Se recomienda realizar por lo menos tres muestras, para cada ensayo de caracterización, con la finalidad de obtener datos más representativos, minimizando el efecto de los errores que se pudieron haber cometido en la realización de dichos ensayos.
- El recomendable cuando se vaya a calentar el asfalto modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable y residual, esta temperatura no exceda los 200 °C puesto que a valores mayores se produce cambios volumétricos importantes en el ligante y la modificación de su estructura molecular.
- Usar otro método de molienda de los residuos para obtener partículas mucho más pequeñas, para que tengan una mejor afinidad con el ligante asfáltico.
- Incrementar el tiempo de mezclado para tener mezclas lo más homogéneas posible y con un mayor grado de interacción intermolecular entre el residuo y el asfalto
- Realizar un mayor número de ensayos variando la concentración de residuos en el ligante en un intervalo menor al realizado del 5 %, para obtener con mayor precisión el porcentaje adecuado de residuo para la modificación del asfalto.
- Es recomendable el uso de este ligante modificado en la preparación de mezclas asfálticas en caliente.

- Se recomienda realizar otros estudios, adicionando los residuos de plantas de tratamiento al agregado pétreo, es decir que vaya a sustituir una parte del agregado empleado en la mezcla asfáltica.