

## CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

### **1.1 INTRODUCCIÓN.**

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de carreteras, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico al paquete estructural para que sean soportadas por este. Se tiene que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de una carretera:

- La función Resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción.
- La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores de la carretera, (Pavimentos), para que estas resulten confortables.

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 a este. Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico, estos componentes son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad de alguno de ellos afecta el conjunto.

El tipo de mezcla asfáltica a ser estudiada en este trabajo se clasifica por la proporción de vacíos en la misma. Este parámetro suele ser imprescindible para que no se

produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas. La mezcla a ser estudiada es una Mezcla Asfáltica Porosa o Drenante en la cual la proporción de vacíos varía desde un 16% hasta un máximo de 25%, siendo recomendable que ronde entre un 20% y 25%.

Las mezclas asfálticas drenantes, fueron inicialmente desarrolladas en los Estados Unidos de Norteamérica entre los 40's, donde se empleaban como capas de pequeño espesor (2.5 cm aprox.) con el objetito de renovar la textura superficial de los pavimentos deslizantes. Este empleo no suponía, sin embargo, un aprovechamiento integral de sus posibilidades y no se tenía en cuenta, al menos de una forma específica, la mejora para la comodidad y seguridad de conducción que supone la capacidad drenante.

En Europa las mezclas asfálticas drenantes fueron desarrolladas en Francia en 1968 donde la experiencia mostro que al cabo de diez años, aun colmadas (bloqueo por la acumulación de sedimentos), mantenían una buena rugosidad superficial y un aceptable drenaje superficial. A mediados de los años setenta, la utilización de asfaltos modificados con polímeros permitió mejorar sus características reo lógicas (características plásticas, elásticas y viscosas) y de adherencia aumentando su cohesión y disminuyendo su susceptibilidad térmica. No obstante, debido a la confrontación entre ventajas y desventajas, el desarrollo de esta técnica en Francia fue prohibida, hasta 1985 cuando fue nuevamente retomada, pero fue España el primer país en estudiar con profundidad este tipo de mezclas.

Los estudios ya que se han realizado fueron enfocados al desarrollo de una metodología de diseño y control, en estos, intervinieron tanto la Dirección General de Carreteras como la Universidad y las Empresas Privadas de España, se iniciaron en los años 80's en la provincia de Santander y fueron dirigidos por la Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos de Santander, como resultado de estos estudios se normalizaron los siguientes estudios.

- Determinación de la pérdida por desgaste de mezclas asfálticas mediante el empleo de la máquina de Los Ángeles (Ensayo Cántabro).
- Determinación de la permeabilidad in situ mediante el empleo del permeámetro.

Desde esa fecha, en España las mezclas asfálticas drenantes se utilizan en carreteras como capa de rodadura drenante, con espesores de 3 o 4 cm e incluso de 5 cm.

En Latinoamérica se observa el notorio uso que se le ha dado a estos estudios en la normativas propias de cada región que contemplan el diseño de mezclas asfálticas drenantes, mediante adaptaciones realizadas a las condiciones y materiales disponibles de cada región, países como Chile y Colombia, por ejemplo, donde se observa en sus respectivos documentos (Manual de Carreteras de Chile, normas INV Colombia) adaptaciones realizadas de los estudios españoles.

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

Las mezclas drenantes pueden constituirse tanto en caliente como en frío, empleando como ligantes los asfaltos puros o las emulsiones asfálticas modificadas y en los últimos años este tipo de mezclas ha adquirido un avance importante en el sistema de diseño e instalación en obra de mezclas bituminosas en caliente.

Para obtener un elevado contenido de huecos, en algunos casos superiores a 25%, es necesario que los contenidos de arena sean menores al 20%, en comparación con el contenido de 30 a 48% que posee una mezcla tradicional. Debido a esto, resistencia de la mezcla no se basa en la cohesión, sino en el rozamiento interno; esto genera ciertos esfuerzos críticos para determinadas cargas de tráfico (especialmente

tangenciales), provocando fenómenos de disgregación. Por ello es necesario realizar un cuidadoso desarrollo de la mezcla.

Las mezclas asfálticas drenantes constituyen un tipo particular de pavimento que fue inicialmente concebido para mejorar la circulación con lluvia y evitar el problema de aquaplaning o hidroplaneo.



Figura 1.1: Efecto del hidroplaneo.

La presencia de agua sobre el pavimento dificulta el contacto del neumático con la superficie del camino, dando lugar a que se produzca con mayor facilidad ocasiones para el deslizamiento y el vuelco de los vehículos que circulan a altas velocidades.

Con objeto de mejorar la adherencia neumático-pavimento con lluvia o en presencia de agua, se ha desarrollado este tipo de mezcla asfáltica que facilita la evacuación del agua a través de los poros o vacíos existentes en la carpeta asfáltica.

En el Departamento de Tarija, la construcción de carreteras con carpetas asfálticas se han realizado más que todo con mezclas densas o cerradas (Mezcla Tradicional) y los estudios realizados sobre las mezclas asfálticas drenantes o porosas en nuestro Departamento son muy escasos, es por eso que esta investigación tiene un propósito de informar acerca de las propiedades mecánicas de este tipo de mezclas, así como su ventajas y desventajas.

En la presente investigación se presentaran las bases teórico-experimentales acerca del diseño de las mezclas asfálticas drenantes, se pretende hacer énfasis en la determinación de un porcentaje de vacíos óptimo, la cual permita que las características deseadas de resistencia y estabilidad sean adecuadas y cumplan con los parámetros necesarios, utilizando materiales con los que contamos en nuestro medio.

Se pretende principalmente dar un aporte, que permita el interés en la realización de más investigaciones en cuanto a las mezclas asfálticas drenantes, ya que su utilización ha demostrado en experiencias del extranjero un importante número de ventajas sobre las mezclas densas o semi-densas, sin embargo dado los problemas habituales en los pavimentos de nuestro país, sobre todo en época de lluvia, como inundaciones, accidentes causados por el agua acumulada en la superficie del pavimento, vale comenzar a establecer un diseño de este tipo de mezclas utilizando materiales (agregados y asfaltos) propios de nuestro país y departamento para verificar las bondades que estas mezclas pueden aportar al mejoramiento de nuestros pavimentos, y si bien es cierto que en esta investigación únicamente se llevara a cabo el diseño de la mezcla drenante, representa un inicio importante en la introducción de estas en nuestro departamento.

## **1.2 FUNDAMENTACIÓN TEORICA.**

Con el pasar de los años, la Ingeniería Civil ha ido progresando para satisfacer las necesidades de los usuarios en muchos aspectos y ámbitos. La ingeniería caminera (o

de caminos) ha evolucionado con el pasar de los años y en esta evolución se han desarrollado nuevos métodos y técnicas de fabricación pavimentos en general.

El tema en el cual se centrara este trabajo es en las Mezclas Asfálticas Drenantes, las cuales en un principio fueron diseñadas para mejorar la circulación con lluvia de los vehículos. A diferencia de una mezcla asfáltica tradicional, estas mezclas cuentan con una proporción de vacíos mucho mayor, la cual permite que el agua drenase con mayor facilidad a través de la carpeta de manera que el contacto de los neumáticos con el pavimento sea mayor.

En Europa hay mezclas drenantes con granulometrías continuas o discontinuas, pero en España, generalizándose su empleo a parto del 1980 se dosifican con granulometrías continuas. Inicialmente se diseñaron con contenidos de huecos (vacíos) entre el 15 y el 18%, pero estas mezclas se colmataban muy rápidamente y actualmente se exige un porcentaje mínimo de 20% y es muy frecuente el del 22%. Se han desarrollado mezclas con porcentajes de vacíos de hasta un 28%.

Para conseguir el objetivo de dotar a la mezcla con un gran porcentaje de vacíos, debe reducirse drásticamente el contenido de mortero. Mientras que los porcentajes de áridos de tamaños inferiores a 2mm se encuentran entre el 31 y el 46% en las mezclas de rodadura tipo denso, en las mezclas drenantes normalizadas se encuentran entre el 9 y el 20% y en la práctica se va a contenidos del orden de 10-15% o incluso menores si se quiere conseguir vacíos en la mezcla superiores al 25%.

Se dispone de una única granulometría, PA-12, aunque se define como huso tipo 12, se trata de un huso abierto en su cabeza de manera que se puedan utilizar tamaños máximos de 12 mm. Desde los primeros momentos se utilizaron con estas mezclas ligantes modificados, tipo BM-3a o 3b (ligantes modificados con polímeros), para aumentar la resistencia a los desprendimientos que es el principal problema de estos materiales. Los contenidos del ligante son del orden del 4.5%.

Las mezclas drenantes presentan una mejor resistencia al deslizamiento que las convencionales a alta velocidad, y especialmente en presencia de agua, consecuencia de su capacidad de eliminación de agua y gran macrotextura. A baja velocidad la resistencia al deslizamiento es del mismo orden o menor que las mezclas convencionales por la menor microtextura, ya que en las mezclas drenantes esta se debe exclusivamente a los áridos gruesos al no haber prácticamente mortero en la superficie. Hay que tener en cuenta que la resistencia al deslizamiento en los primeros meses de servicio se puede ver impedida por la presencia de una película de ligante, lo que reduce la adherencia neumático-pavimento.

A continuación presentaremos algunas ventajas y desventajas de las mezclas drenantes:

- **Ventajas.-**

- Eliminación del Hidroplaneo (Aquaplaning).
- Resistencia al deslizamiento con pavimento mojado.
- Reducción de las proyecciones de agua.
- Menor deslumbramiento por los faros de los vehículos.
- Reducción del ruido al paso de vehículo.

- **Desventajas o limitaciones.-**

- Mayor costo inicial.
- Posible disminución de la vida útil.
- Pérdida de porosidad en el tiempo.
- Posibilidad de escurrimiento del ligante durante el transporte.
- Necesidad de un soporte adecuado, con geometría bien acabada e impermeable.
- Menor resistencia a aceites y combustibles.
- Drenaje lateral.

En análisis realizados en países como los Estados Unidos de Norteamérica, El Salvador, Francia, España, Chile y Colombia, Argentina, por mencionar algunos, se ha podido observar que el uso de este tipo de mezclas en carreteras con elevado tránsito vehicular ha mostrado resultados muy aceptables en cuanto a la calidad de tránsito que se brinda al usuario. Vale mencionar que en algunos de estos países citados anteriormente se ha utilizado asfalto modificado con polímeros, los cuales dan por resultado una mejoría considerable en las características de elasticidad, adherencia y cohesión de estos a un costo competitivo.

En estos países, las mezclas drenantes han demostrado que el porcentaje elevado de vacíos que estas permiten (20% - 25%) ayudan a la evacuación del agua de la superficie del pavimento mejorando la visión del conductor en épocas de lluvia así como su elevada macro textura favorece a la adherencia neumático-pavimento permitiendo de esta forma una conducción más segura.

Existen pequeñas diferencias en cuanto al contenido de vacíos aceptado para considerar una mezcla drenante en los países donde se ha estudiado este tipo de mezclas, en la siguiente tabla se muestran los contenidos de vacíos aceptado en algunos países.

Porcentaje de vacíos (%)		
País	Mayor del	Menor del
<b>España</b>	16	25
<b>Chile</b>	18	25
<b>Colombia</b>	20	25

Tabla 1.1: Fuente: "Ingeniería de pavimentos para carreteras" Alfonso Montejo Fonseca. (2006)

Se demostrar que al tener una mezcla drenante con un correcto porcentaje de vacíos y que cuente con características de resistencia y estabilidad requerida por norma pueda ser utilizada en nuestro medio, y pueda de esa manera convertirse en una alternativa de aplicación en un futuro pensando en brindar al usuario carreteras seguras y confiables.

Estas mezclas representan una opción nueva de capa de rodadura para pavimentos, estudiarlas y aprender de su comportamiento desde el momento de la selección de su granulometría para establecer el diseño de la mezcla es necesario, la información que ello brinde facilitara la investigación a las empresas o instituciones cuyas actividades involucren mezclas asfálticas ya sea en construcción, diseño o simplemente gestión, y que se encuentren comprometidas con la seguridad de los usuarios.

### **1.3 SITUACIÓN PROBLÉMICA.**

Actualmente en el Departamento de Tarija se utiliza una mezcla asfáltica tradicional densa o sémi-densa, la cual cuenta con un porcentaje de vacíos que varía de 3% - 7%, ahora bien, en épocas de lluvia podemos observar que las avenidas y calles de nuestro departamento se inundan, formando así varios espejos de agua, los cuales al no drenar correctamente proporcionan un cierto riesgo a los usuarios de las mismas.

Una mezcla asfáltica Drenante posee en cambio, una proporción de vacíos mucho más grande, la cual varía desde un 16% a 20-25% en algunos casos, proporcionando una capacidad drenante mucho mayor a la de una mezcla asfáltica tradicional, lo cual mejora la calidad de las vías y la seguridad de los usuarios de las mismas, sin embargo, el porcentaje de vacíos óptimo en este tipo de mezclas es desconocido en nuestro departamento y por lo tanto no sabemos las capacidades mecánicas que este tipo de mezclas poseerán cuando este porcentaje sea el óptimo.

### **1.4 PROBLEMA.**

¿Cuál será el porcentaje de vacíos óptimo en este tipo de mezclas asfálticas si utilizamos agregados disponibles en nuestro departamento, de manera que sus características mecánicas sean las adecuadas para su uso?

## **1.5 OBJETIVOS.**

### **1.5.1 GENERAL.**

- Elaborar una Mezcla Asfáltica Drenante con los agregados disponibles en nuestro departamento, para así obtener muestras que puedan ser sometidas a pruebas de laboratorio y así poder determinar el porcentaje de vacíos óptimo y que a su vez muestren características mecánicas (Estabilidad y Fluencia) adecuadas.

### **1.5.2 ESPECÍFICOS.**

- Recopilación de información acerca del uso de este tipo de Mezclas Asfáltica en el departamento de Tarija.
- Estudio y aplicación de técnicas para la creación de una Mezcla Asfáltica Drenante, la granulometría adecuada para este tipo de mezclas y la temperatura correcta de mezclado.
- Recopilación de información de los agregados regionales más comunes para su caracterización según su desempeño en la fabricación de mezclas asfálticas drenantes.
- Elaboración de briquetas para realizar los ensayos tipo Cántabro.
- Realización de ensayos de laboratorio para determinar el porcentaje de vacíos óptimo en este tipo de mezclas asfálticas.
- Realización de ensayos de laboratorio tipo Marshall para determinar la estabilidad y fluencia de la muestra con el porcentaje de asfalto y vacíos óptimos obtenidos.
- Evaluación de las características mecánicas de una mezcla asfáltica drenante con un porcentaje de vacíos óptimo en la misma.

## **1.6 HIPOTESIS.**

Las mezclas asfálticas drenante poseen un porcentaje de vacíos que varía de un 16 a un 25%, pero no conocemos con mayor cabalidad el porcentaje de vacíos con el cual la muestra asfáltica presenta mejores características mecánicas (Estabilidad y Fluencia), ahora bien, si la mezcla asfáltica drenante cuenta con un porcentaje óptimo, entonces las características mecánicas de la misma serán satisfactorias.

## **1.7 DISEÑO METODOLÓGICO.**

### **1.7.1 UNIDAD DE ESTUDIO U OBSERVACIÓN.**

En este trabajo la unidad de estudio se centrara en la mezclas asfálticas drenantes, de qué manera estas son diseñadas y cuales son su características mecánicas que presenten.

### **1.7.2 VARIABLES.**

**Variable Independiente:** El porcentaje de vacíos. Esta variable es muy importante, ya que nos mostrara la relación de vacíos óptima en una mezcla drenante.

**Variable Dependiente:** Las características mecánicas de la mezcla. Dependen directamente de la óptima relación de vacíos con la que cuente la mezcla drenante.

### **1.7.3 POBLACIÓN.**

Al ser un trabajo de investigación en el cual se busca determinar un porcentaje de vacíos óptimo en una mezcla asfáltica drenante, el principal factor que afectara en dicha investigación será el tipo de agregados que utilizaremos.

Se tomara como población a los agregados para este tipo de mezclas; usaremos solamente agregados disponibles en los bancos de nuestro Departamento.

#### **1.7.4 MUESTRA.**

La determinación de un porcentaje de vacíos óptimo, dependerá del tipo de agregados con los que contaremos y lo más importante el tipo de granulometría con la que trabajemos, es por eso que la muestra de este trabajo se basa en los agregados con diferentes granulometrías, las mismas que serán estudiadas en laboratorio y serán escogidas de acuerdo a la solicitud de este tipo de mezclas.

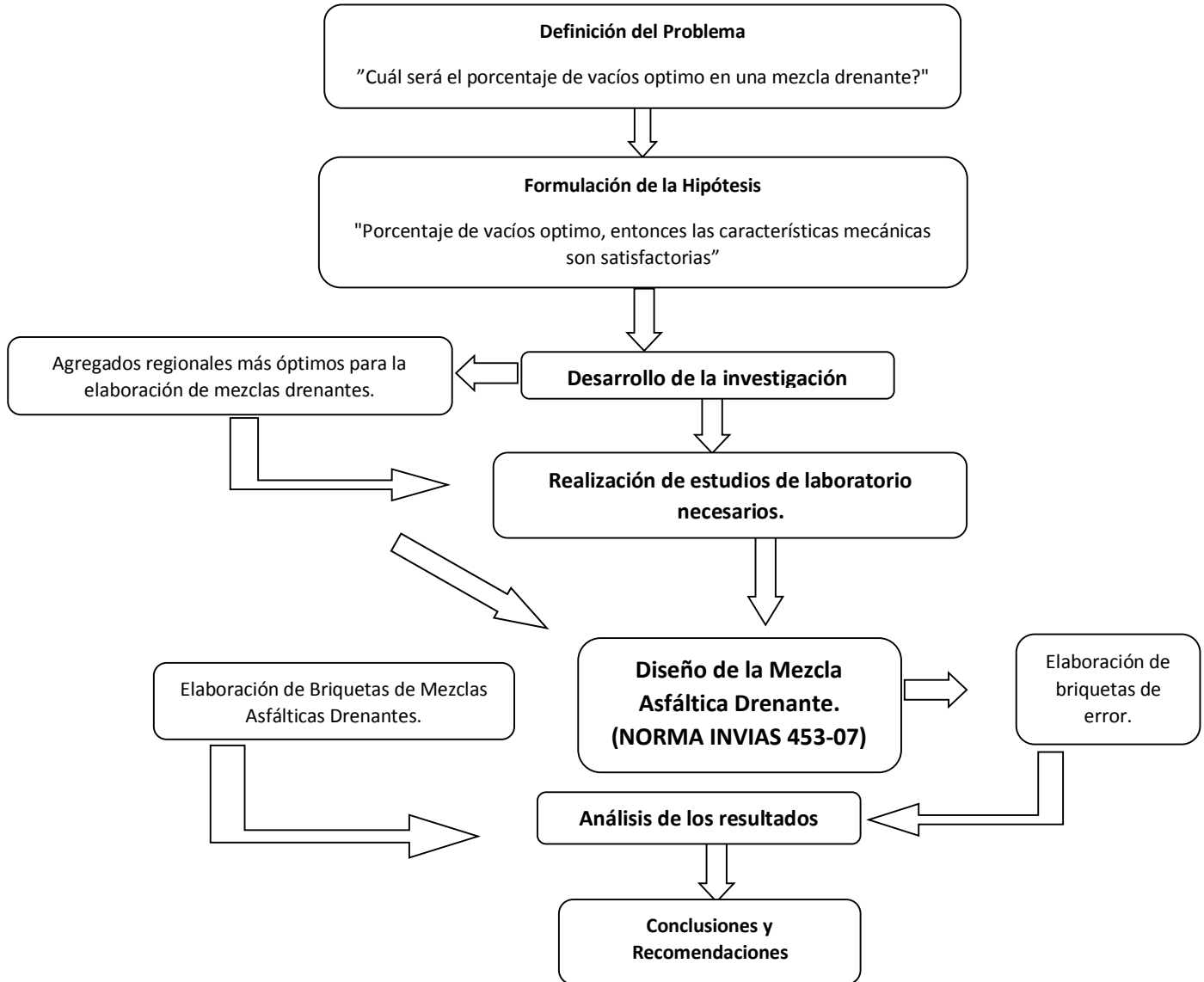
#### **1.7.5 MUESTREO.**

El muestreo será probabilístico, utilizaremos un método aleatorio estratificado, ya que simplifica el proceso del muestreo, consiste en considerar categorías típicas entre sí, que poseen gran homogeneidad respecto a alguna característica, los bancos con los que contamos en nuestro departamento están claramente definidos respecto al tipo de agregados y a las características que estos presentan, lo que pretende este muestreo es asegurar de que los agregados que elijamos estén representados adecuadamente en la muestra.

### 1.7.6 MÉTODOS, TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS.

#### 1.7.6.1 METODOLOGÍA.

Se presenta el esquema de la metodología a utilizar para la elaboración del presente trabajo:



El trabajo a ser realizado está contemplado en el método experimental y de tipo explicativo, ya que lo que se busca es determinar y explicar las causas mediante las cuales este tipo de mezclas asfálticas brindan características mecánicas satisfactorias, en este caso el la causa principal a ser estudiada será el porcentaje de vacíos óptimo. Se hará una recopilación de datos utilizando bibliografía escrita que señalaran más adelante en el desarrollo de esta investigación. Además del uso del internet como medio de distribución masiva de información, donde se puede encontrar el tema que sea requerido para este trabajo. Para el desarrollo de este trabajo se utilizara un laboratorio que cuente con los equipos necesarios para el desarrollo de los ensayos necesarios que fueron planteados.

Esta investigación constara de tres pasos fundamentales, los cuales son:

**Paso 1:** Lo primero a realizarse y uno de los factores fundamentales para la realización de este trabajo será la adquisición de los agregados, para lo cual nos dirigiremos al banco de Santa Ana ya que cuenta con los agregados más utilizados en el departamento y sacaremos muestras representativas de los mismos.

También se realizara la adquisición del material bituminoso (asfalto), el cual tendrá las características ya especificadas por el fabricante y será un asfalto modificado con polímeros.

**Paso 2:** En esta etapa se basara prácticamente la investigación en sí, se realizaran ensayos de caracterización de los agregados y del asfalto a ser utilizado. Se harán ensayos de granulometría, resistencia al desgaste, absorción y demás ensayos que sean necesarios para así poder determinar que agregados funcionan de mejor manera para las mezclas drenantes y cuáles son sus características tanto físicas como mecánicas a detalle.

Se realizarán los ensayos necesarios para la caracterización del asfalto utilizado, entre los cuales estarán el ensayo de viscosidad, penetración, punto de inflamación, los cuales nos proporcionarán un mayor conocimiento acerca de qué tipo de asfalto es necesario para este tipo de mezclas.

Una vez realizados los ensayos preliminares de caracterización de los agregados y del asfalto se procederá a diseñar la mezcla asfáltica drenante y se harán briquetas, siguiendo métodos usados en el extranjero normados por la normativa INVIAS de Colombia, ya que como se citó con anterioridad, en nuestro departamento no hay muchos estudios acerca de las mezclas drenantes; se harán ensayos de permeabilidad y ensayos de determinación del porcentaje de vacíos con el método Cántabro para determinar el contenido óptimo de vacíos y asfalto en la mezcla drenante.

Se realizarán el ensayo tipo Marshall para así determinar la fluencia y estabilidad de las muestras y saber si cumplen con las características necesarias para ser usadas.

Se realizará un total de 36 ensayos para tener una variación de datos que sea acorde a las especificaciones requeridas y para poder lograr mejores resultados y saber con mayor exactitud las especificaciones técnicas de estas mezclas.

**Paso 3:** Finalmente se realizará un análisis de los resultados de las pruebas de laboratorio.

#### **1.7.7 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO.**

En esta investigación tiene un carácter probabilístico, ya que se realizarán 30 ensayos, los cuales nos proporcionarán una serie de datos que tendrán que ser analizados posteriormente, por lo tanto realizaremos un análisis descriptivo ya que tendremos un conjunto de datos que serán analizados.

Contaremos con un conjunto de datos  $N$  (datos que representan a la población, que en este caso son la mezclas asfálticas drenantes), y otro conjunto de datos  $n$  (datos que representan la muestra, que en este caso son los agregados), que serán clasificados de acuerdo a las características que cada ensayo solicite para así poder realizar un mejor análisis de todos los datos.

Se realizarán medidas de dispersión, las cuales nos indicarán cuán dispersos o concentrados estarán los datos, a partir de las cuales encontraremos la desviación media, la varianza y la desviación estándar.

Los parámetros estarán determinados para describir las características de la población y los estadígrafos serán usados para describir las características de las muestras.

Utilizaremos las medidas de posición como la media aritmética y la media aritmética ponderada, la moda que también es otra medida de posición que brinda útil información, la varianza que es una medida de dispersión así también como la desviación media.

Con la ayuda de estas herramientas podremos determinar lo que nos proponemos en esta investigación, que es la determinación de un porcentaje óptimo de vacíos en una mezcla asfáltica drenante.

#### **1.7.8 APLICACIÓN DE INSTRUMENTOS Y EQUIPOS.**

Se utilizarán equipos para realizar los diferentes ensayos de caracterización de los agregados y la mezclas asfálticas, como ser; juegos de tamices estandarizados, equipos de compactación, máquina de desgaste de Los Ángeles, y ensayos de laboratorio, instrumentos para la caracterización del asfalto a ser utilizado, instrumentos para el ensayo tipo Marshall para mezclas asfálticas drenantes o porosas.



**CAPÍTULO II**  
**GENERALIDADES DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO TRADICIONAL PARA TRÁNSITO**  
**VEHICULAR**

**2.1 DESARROLLO DE CONCEPTOS BÁSICOS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.**

**2.1.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO.**

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas producidas por el tránsito y las transmiten a los estratos inferiores de manera distribuida, proporcionando una superficie de rodamiento que debe trabajar eficazmente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia que controle las cargas para evitar el agrietamiento, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aún en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los efectos abrasivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías; además, que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza y consecuentemente más económicos. La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, cuando se determina el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas dependerá del material que la constituye y el procedimiento constructivo; dos factores importantes son la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas de tráfico, produciendo deformaciones permanentes.

### **2.1.2 TIPOS DE PAVIMENTOS.**

- Básicamente existen dos tipos de pavimentos:
- Rígidos.
- Flexibles.

#### **2.1.2.1 PAVIMENTO RÍGIDO.**

El pavimento rígido se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas.

#### **2.1.2.2 PAVIMENTO FLEXIBLE.**

El pavimento flexible resulta más económico en su construcción inicial, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante. Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de una carpeta asfáltica, de la base y de la sub-base.

## **2.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE ASFALTO.**

### **2.2.1 DEFINICIÓN DE ASFALTO.**

Los asfaltos son una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, que se presentan en forma de cuerpo viscoso más o menos elástico, no cristalino y de color negro. Son productos de la destilación natural o artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda una vez que se hayan extraído los componentes más ligeros y volátiles del petróleo.

Casi todo el asfalto usado es producido por refinerías modernas de petróleo y es llamado asfalto de petróleo. El grado de control permitido por los equipos modernos de refinería permite la producción de asfaltos con características distintas, que se prestan para usos específicos. Como resultado, se producen asfaltos para pavimentación, techado y otros usos especiales.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico. El asfalto cambia cuando es calentado a temperatura muy elevada y/o es envejecido. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas de agregado. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto, y si se toman medidas, durante la construcción, para garantizar que el pavimento terminado sea construido de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento.

### **2.2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO.**

Antes que el intercambio de crudo en el mercado fuera algo cotidiano, las refinerías rara vez cambiaban sus fuentes de abastecimiento de crudo. Esto llevo a que las fuentes de asfalto tuvieran propiedades consistentes. Al integrar el cambio del abastecimiento de crudo de las refinerías se crearon más variaciones en las propiedades del asfalto, tanto físicas como químicas. De estas variaciones, surgió la necesidad de poder evaluar el comportamiento del asfalto ante condiciones particulares y predecir su rendimiento por medio de sus propiedades geológicas. Aun así, algunas propiedades físicas y químicas siguen siendo constantes en todos los tipos de asfaltos.

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

### 2.2.2.1 ADHESIÓN Y COHESIÓN.

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

El ligante bituminoso debe ser capaz de envolver a los áridos, dar cohesión a la mezcla y resistir la acción de desmenuamiento del agua, tal efecto produce una separación del ligante con el árido disminuye así la cohesión de la mezcla.

### 2.2.2.2 SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA.

Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (mas viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura, y es una de las propiedades más valiosa en un asfalto.

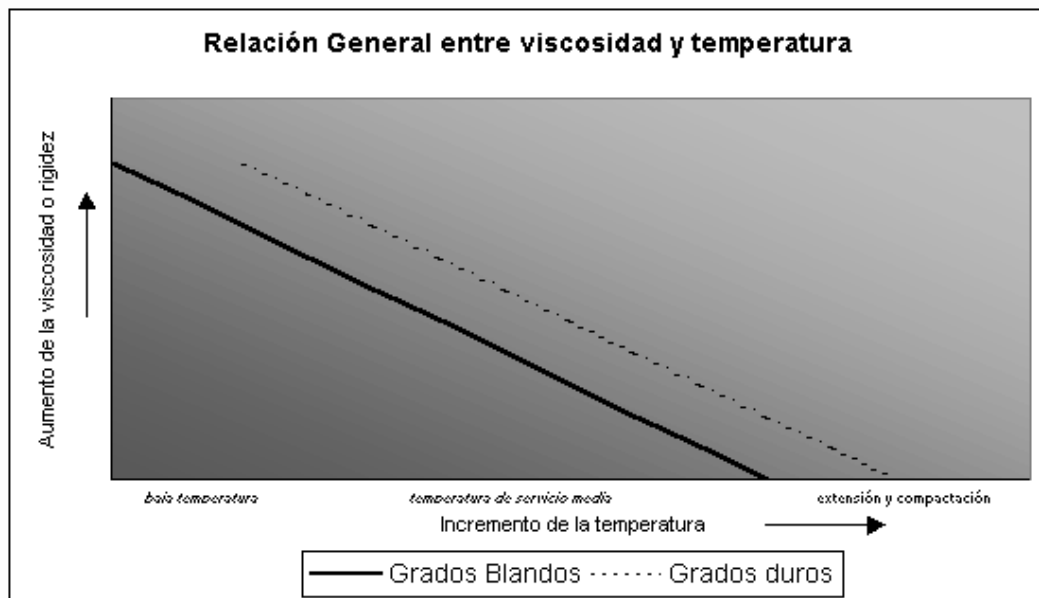


Figura 2.1 Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes asfálticos. Fuente: Evaluación de las propiedades de los Asfaltos modificados con polímeros” A.Chiman, L.Sanabria, L.Hernandez, L.Chiman

Es importante conocer la susceptibilidad a la temperatura utilizada, ella indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera.

Debe entenderse que es de vital importancia que un asfalto sea susceptible a la temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

### **2.2.2.3 DURABILIDAD.**

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 se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la durabilidad del asfalto. Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para la durabilidad del asfalto.

### **2.2.3 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO.**

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras. Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno; casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono. El asfalto, cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfáltenos y máltenos.

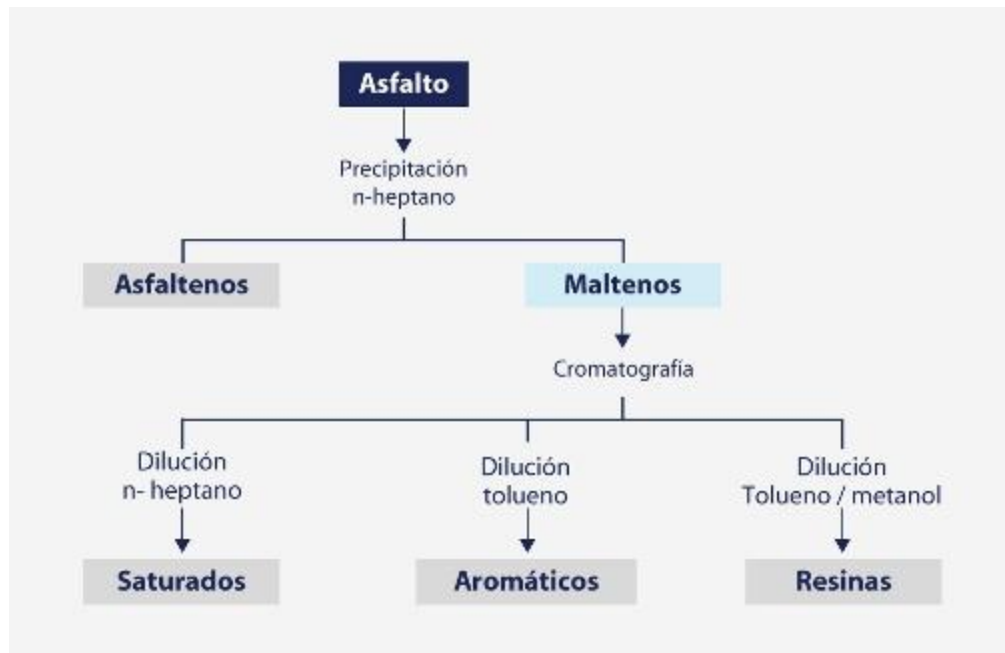


Figura 2.2: Composición del asfalto. Fuente:

[http://www.repsol.com/pe\\_es/productos\\_y\\_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion](http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion)

a) **Los asfaltenos**, son compuestos químicos orgánicos y representan los compuestos más pesados y por tanto de mayor punto de ebullición. Una vez separados de los maltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito. Los asfaltenos le dan al asfalto su color y dureza y se encuentran disueltos en los maltenos, es decir es la fase discontinua del asfalto.

b) **Los maltenos**, son líquidos viscosos formando la fase continua del asfalto.

Su contenido se asocia a las propiedades mecánicas mostradas por el asfalto. Generalmente, existe mayor proporción de maltenos que de asfaltenos en los asfaltos. El mayor contenido de maltenos y su naturaleza química son las que le dan la calidad a un asfalto. Los maltenos se subdividen en:

Resinas: moléculas intermediarias en el asfalto, proporcionan las cualidades adhesivas (pegajosidad) en el asfalto. Son sólidos o semisólidos de color negro.

Aromáticos: son líquidos viscosos de color negruzco e influye en la facilidad que tiene un asfalto para “admitir” polímeros modificadores. Los aromáticos constituyen de un 40% al 65% el total del asfalto.

Saturados: son aceites viscosos de coloración amarillenta, en el cual flotan como islas los máltenos y asfáltenos.

Describiendo la estructura del coloide, las resinas circundan en forma inmediata a los asfáltenos y los aceites rodean a ese compuesto (ver figura 2.3).

Normalmente se atribuye al betún una estructura de:

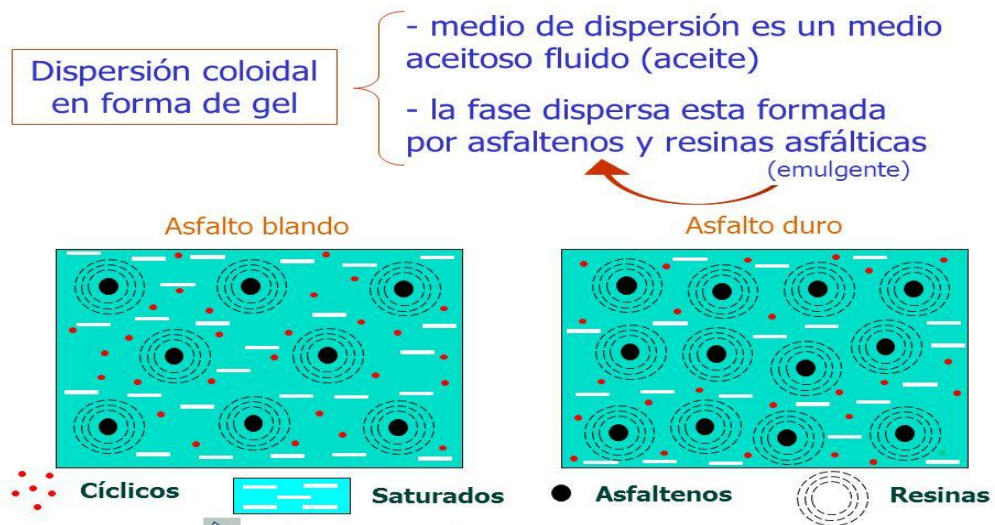


Figura 2.3 Estructura coloidal del asfalto. Fuente: ROCÍO LAPUENTE ARAGÓ- Departamento de Ingeniería de la Construcción Presentaciones adaptadas al texto del libro: Temas de química (II) para alumnos de.

La proporción de asfáltenos y máltenos en el asfalto puede variar debido a un sin número de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla del pavimento, y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado.

## **2.3 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.**

La clasificación de los cementos asfálticos, ha girado alrededor de las propiedades físicas de los mismos, determinados a través de métodos de ensayos que en su mayoría son empíricos; lo anterior, principalmente debido a la complejidad y variabilidad de las propiedades o características químicas de los asfaltos. Los sistemas tradicionalmente utilizados para la clasificación de los asfaltos corresponden a:

### **1) Sistema de Clasificación por Penetración**

### **2) Sistema de Clasificación por Viscosidad.**

#### **2.3.1 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN POR PENETRACIÓN.**

El método de penetración fue el primer sistema desarrollado para la clasificación de asfaltos y todavía es utilizado por diferentes agencias de carreteras en la región. Dicho sistema fue desarrollado en 1918 por el Bureau of Public Works (ahora Federal Highway Administration, FHWA), y posteriormente en 1931, la AASHTO publicó las primeras especificaciones técnicas para la clasificación de asfaltos por penetración. Asimismo, en 1921 la ASTM desarrolló la primera especificación para cementos asfálticos clasificados por penetración para propósitos de pavimentación, la cual sufrió un cambio significativo en 1968, al reducir el número de tipos de cemento asfáltico de 10 a 5.

Cabe señalar que la clasificación del asfalto por penetración, conlleva el desarrollo de una serie de ensayos de laboratorio, los cuales están contemplados en la norma ASTM D 946, "Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction". A continuación, en la Tabla 2.1, se presentan las características físicas que deben cumplir los cementos asfálticos, para ser clasificados de acuerdo a la norma ASTM D 946.

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	GRADO DE PENETRACIÓN									
			40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
			Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s	-----	D-5	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación (Cleveland copa abierta)	°C	D-92	232	---	232	---	232	---	218	---	177	---
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min.	cm	D-113	100	---	100	---	100	---	100	---	100 <sup>A</sup>	---
Solubilidad en tricloroetileno	%	D-2042	99,0	---	99,0	---	99,0	---	99,0	---	99,0	---
Penetración retenida después de la prueba de horno sobre película delgada	%	D-5 Después de realizar D-1754	55+	---	52+	---	47+	---	42+	---	37+	---
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, después de prueba de horno sobre película delgada	cm	D-113 Después de realizar D-1754	---	---	50	---	75	---	100	---	100 <sup>A</sup>	---

Tabla 2.1. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 946-82. Fuente: ASTM D 946, Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction

### 2.3.2 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD.

El sistema de clasificación por viscosidad fue introducido a principios de la década de 1960, mediante el cual es posible clasificar cementos asfálticos en estado virgen y en residuos asfálticos. Dicho sistema de clasificación fue concebido debido a las limitantes que presenta el sistema de clasificación por penetración, que posee la imposibilidad de evaluar la susceptibilidad térmica del asfalto o no poder evaluar el comportamiento del mismo a temperaturas normales de operación de la mezcla asfáltica.

Los ensayos requeridos para la clasificación del asfalto, están contemplados en la norma ASTM D 3381, “Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction”. Dentro de esta especificación se encuentran los asfaltos clasificados por Viscosidad (AC) y Residuo asfáltico (AR), los cuales se detallan a continuación:

**a) Viscosidad (AC).** Los ensayos se realizan en el asfalto original (virgen), entre los asfaltos clasificados por viscosidad, tenemos los siguientes: AC 5, AC 10, AC 20, AC 30, AC 40.

A continuación, en la Tabla 2.2, se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos:

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	Grado de viscosidad				
			AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-40
Viscosidad, 60°C	N.s/m <sup>2</sup>	D-2171	250 ±50	500±100	1000±200	2000±400	4000±800
Viscosidad, 135°C, mínimo	mm <sup>2</sup> /s	D-2170	80	110	150	210	300
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, mínimo	1/10 mm	D-5	200	120	70	40	20
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta, mínimo	°C	D-92	163	177	219	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
<u>Pruebas sobre residuo del ensayo de horno sobre película delgada:</u>		D-1754					
Viscosidad, 60°C, máximo	N.s/m <sup>2</sup>	D-2171	1250	2500	5000	10000	20000
Ductilidad, 25°C, 5 cm /min, mínimo	Cm	D-113	100 <sup>A</sup>	100	50	20	10

Tabla 2.2. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381. Fuente: ASTM D 946, Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction

**b) Residuo (AR).** Los asfaltos clasificados por residuo son más conocidos como asfaltos clasificados por viscosidad después de envejecido, entre los cuales se encuentran los siguientes: AR-1000, AR-2000, AR-4000, AR-8000 y AR-16000. A continuación, en la Tabla 2.3, se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos:

Ensayo	Norma de ensayo ASTM	Clasificación en Residuo Asfáltico (Grados basados en residuo asfáltico)									
		AR - 1000		AR - 2000		AR - 4000		AR - 8000		AR - 16000	
		Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Viscosidad Absoluta (Poise)	D 2171	750	1250	1500	2500	3000	5000	6000	10000	12000	20000
Viscosidad Cinemática (cSt)	D 2170	140	---	200	---	275	---	400	---	550	---
Penetración (0.1 mm)	D 5	65	---	40	---	25	---	20	---	20	---
% de penetración original		---		40		45		50		52	
Ductilidad		100		100		75		75		75	
Pruebas sobre el asfalto original											
Flash Point (°C)	D 92	205	---	219	---	227	---	232	---	238	---
Solubilidad (%)	D 2042	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	

Tabla 2.3. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381. ASTM D 946, Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction.

## 2.4 CONCEPTOS BÁSICOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

### 2.4.1 DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA.

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de 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, en las capas inferiores de los pavimentos para tráfico pesados intensos, entre otros.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son

los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

#### **2.4.2 CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.**

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

##### **2.4.2.1 POR FRACCIONES DE AGREGADO PÉTREO EMPLEADO.**

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

##### **2.4.2.2 POR LA TEMPERATURA DE PUESTA EN OBRA.**

- **Mezclas asfálticas en Caliente:** Se fabrican con asfaltos a unas 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 suele ser una emulsión asfáltica y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

##### **2.4.2.3 POR LA PROPORCIÓN DE VACÍOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA.**

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

- **Mezclas Cerradas o Densas:** La proporción de vacíos no supera el 6 %.

- **Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas:** La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10%.
- **Mezclas Abiertas:** La proporción de vacíos supera el 12 %.
- **Mezclas Porosas o Drenantes:** La proporción de vacíos supera el 20%.

#### 2.4.2.4 POR EL TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO PÉTREO.

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

#### 2.4.2.5 POR LA ESTRUCTURA DEL AGREGADO PÉTREO.

- **Mezclas con Esqueleto mineral:** Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. 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.

#### 2.4.2.6 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.

A continuación en la tabla 2.4 se presenta un resumen de los tipos parámetros de clasificación de las mezclas asfálticas:

Parámetro de Clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En Frío
	En Caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ( $h < 6\%$ )
	Semicerradas ( $6\% < h < 12\%$ )
	Abiertas ( $h > 12\%$ )
	Porosas ( $h > 20\%$ )
Tamaño máximo del agregado (t máx)	Gruesas (t máx $> 10$ mm)
	Finas (t máx $< 10$ mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

Tabla 2.4: Clasificación de mezclas asfálticas. Fuente: Capítulo 3 “Mezclas Asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.

### 2.4.3 TIPOLOGÍA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

#### 2.4.3.1 MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.

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

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas

inferiores de los pavimentos. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en peso de agregados pétreos.

#### **2.4.3.2 MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO.**

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias.

Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas. Se usan además en las bases y capas intermedias, su mayor utilidad está en el mantenimiento, llámese reciclado, microsurfacing o estabilización.

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

El proceso de aumento paulatino de la resistencia se le suele llamar maduración, que consiste básicamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla.

#### **2.4.3.3 MEZCLA POROSA O DRENANTE.**

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

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

#### **2.4.3.4 MICROAGLOMERADOS.**

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

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

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

### **2.4.4 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.**

#### **2.4.4.1 PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS.**

Como el agregado está compuesto por fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino y filler natural, todos con distinto peso específico, los

cómputos finales se verán simplificados de gran manera por el cálculo del peso específico bruto del agregado total. Generalmente, los pesos parciales, se expresan en por cientos del peso total del agregado. Para introducir en la fórmula (que se detalla a continuación) el peso específico del agregado grueso y el agregado fino, se utiliza el peso específico masivo (bulk), y para el filler se usa el peso específico aparente; por lo tanto, la fórmula de peso específico promedio, del agregado mineral es la siguiente:

$$G_{agreg} = \frac{PA}{VA} = \frac{100}{\frac{\%AG(a)}{G_{ag}(a)} + \frac{\%AF(b)}{G_{ag}(b)} + \frac{\%F(c)}{GF(c)} + \dots + \frac{\%A(n)}{G(n)}}$$

**(Ec. 2.1 Peso específico de los agregados)**

Dónde:

$G_{agreg}$ : Peso específico promedio del agregado mineral combinado.

$PA$ : Peso total expresado en porcentaje

$AG(a), AF(b), F(c), \dots, A(n)$  : Porcentaje de los agregados a, b, c,..., n

$G_{ag}$ : Pesos específicos brutos de los agregados a, b, c,..., n

**2.4.4.2 CONTENIDO DE ASFALTO (%).**

El contenido efectivo de asfalto de una mezcla para pavimentación es el total, menos la cantidad de asfalto perdida por absorción de los agregados; es esta porción de asfalto efectivo total la que permanece como recubrimiento exterior de las partículas del agregado. El comportamiento de una mezcla depende del contenido efectivo de asfalto.

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión durante la

elaboración de la mezcla en planta. El contenido de asfalto de una mezcla en particular se establece usando criterios del método utilizado.

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

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan el tamiz #200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber literalmente gran parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Las pequeñas dimensiones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido de relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda.

Si una mezcla contiene poco o demasiado relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario para corregir la situación, durante el proceso de elaboración de la mezcla probablemente la empeore. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá hacer un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de la mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir

la absorción, y para que además se pueda cubrir las partículas en su totalidad con una película adecuada de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que se debe adicionar a la mezcla para producir las cualidades deseadas en ella. El contenido efectivo es la cantidad de asfalto que forma una película delgada sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de la mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregado, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosamente cuando se usan nuevos bancos de agregados.

El contenido óptimo de cemento asfáltico se determina a partir del diseño Marshall de una mezcla, en la que se tiene que satisfacer una serie de especificaciones según el tipo de agregado y de cemento asfáltico a utilizar.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla asfáltica con asfalto espumado también puede ser calculado con el método Marshall, con ligeras diferencias en la metodología de producción de la mezcla.

#### **2.4.4.3 DENSIDAD MÁXIMA REAL DE LA MEZCLA ( $\text{gr/cm}^3$ ).**

Las mezclas asfálticas cuya densidad real requiere ser determinada, pueden ser moldeadas en laboratorio u obtenerse directamente de un pavimento. El diámetro y longitud de las muestras deben ser no menores a cuatro veces el tamaño máximo del agregado empleado y su altura, por lo menos una vez y medio el tamaño del agregado. La densidad real de la mezcla es comúnmente llamada peso unitario de mezclas asfálticas.

Las muestras obtenidas directamente de un pavimento deben ser representativas de la mezcla empleada y no contener materias extrañas al propio pavimento. Al hacer el ensayo, las muestras deben cubrirse con parafina derretida, al fin de tapar todos los poros o vacíos de la mezcla y dejar la muestra al aire 30 minutos antes de pesarla.

La fórmula para determinar la densidad real de la mezcla de las briquetas es:

$$Dr \left( \frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{PB(gr)}{VP(cm^3)}$$

**(Ec. 2.2 Densidad Máxima Real de la Mezcla)**

Dónde:

*Dr*: Densidad real de la mezcla (briqueta)

*PB*: Peso de la briqueeta sin parafina

*VP*: Volumen de la briqueeta sin parafina

**2.4.4.4 DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA (gr/cm<sup>3</sup>).**

El peso máximo teórico de una mezcla asfáltica compacta es la que considera el volumen del agregado mineral y el del asfalto, sin tomar en cuenta el volumen de vacíos llenos de aire.

La densidad de la mezcla compacta está definida como su peso unitario (El peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante que se debe tomar en cuenta, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$D_{mt} \left( \frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{100}{\frac{\%C.A.}{G_{CA}} + \frac{100 - \%C.A.}{G_{agreg}}}$$

**(Ec. 2.3 Densidad Máxima Teórica)**

Dónde:

*D<sub>mt</sub>*: Densidad máxima teórica

*%C. A.*: Porcentaje de cemento asfáltico

*G<sub>CA</sub>*: Peso específico de cemento asfáltico

*G<sub>agreg</sub>*: Peso específico del agregado

En las pruebas y análisis de diseño de las mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa generalmente en kilos por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>), gramos por centímetro cúbico (gr/cm<sup>3</sup>), o libras por pie cúbico (lb/ft<sup>3</sup>). La densidad es calculada de multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>) o (62.416 lb/ft<sup>3</sup>). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad en el laboratorio (porque en el laboratorio se tienen las condiciones ideales del 100%)

**2.4.4.5 VACÍOS DE LA MEZCLA (%).**

Expresado en porcentaje del volumen total indica la diferencia relativa entre la densidad teórica y la real para el estado de compactación alcanzado. El contenido de vacíos de aire (también porcentaje de vacíos) es la concentración, en volumen del aire en la muestra compactada. Es importante tomar en cuenta que en una mezcla asfáltica, una parte de los vacíos o poros existentes entre las partículas del agregado mineral, se llena de asfalto, quedando lleno de aire el

resto de los vacíos. En un pavimento asfáltico, es importante que el porcentaje de vacíos llenos de aire se controle. Como dijimos anteriormente, la mezcla asfáltica compacta deberá tener un porcentaje de vacíos, comprendido entre 3 y 5% del volumen total de la mezcla.

Por lo tanto, como ya se indicó, los vacíos de la mezcla se expresan como un porcentaje del volumen total de la muestra. Representan el volumen que no es ocupado ni por asfalto ni por agregado. Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire o bolsas de aire que están presentes entre los agregados revestidos de la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico y proporcionar espacios donde pueda fluir el asfalto bajo esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos está entre 3 y 5 % dependiendo del diseño específico. La fórmula para su cálculo es:

$$Vm(\%) = \frac{Dmt - D_{rm}}{Dmt} * 100$$

**(Ec. 2.4 Vacíos de la Mezcla)**

Dónde:

*V<sub>m</sub>*: Vacíos de la mezcla compactada

*D<sub>mt</sub>*: Densidad máxima teórica

*D<sub>rm</sub>*: Densidad real promedio

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos

proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar agua y aire y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto, una condición donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

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

#### 2.4.4.6 VACÍOS DEL AGREGADO MINERAL V.A.M. (%).

Expresado en porcentaje del volumen total, representa el volumen de vacíos existentes en el agregado mineral al estado de densificación alcanzado. Parte del volumen de vacíos está ocupado por el cemento asfáltico.



Figura 2.4: Distribución de volúmenes en una mezcla asfáltica. Fuente: Elaboración propia.

El espacio intergranular está ocupado por el asfalto y aire en una mezcla compacta denominada vacíos del agregado mineral (V.A.M.). Por lo tanto, se define como la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo

expresado como un porcentaje del volumen total. El volumen de asfalto absorbido no es usualmente considerado como parte del V.A.M.

Los vacíos del agregado mineral son expresados en porcentaje del volumen total de la muestra. Representan el volumen de la mezcla compacta que no es ocupado por el agregado. El espacio inter granular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla compacta se denomina vacíos del agregado mineral VAM. En el diagrama de componentes, la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo, es el VAM. El volumen de asfalto absorbido por el agregado no es usualmente considerado como parte del VAM. Por lo tanto, los vacíos del agregado mineral, son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compacta de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos de la mezcla.

Los valores recomendados para el V.A.M. de acuerdo al tamaño de las partículas se indican en la siguiente tabla.

**Valores recomendados para los V.A.M.**

Tamices Standard		Tamaño Nominal de la partícula		Volumen mínimo de vacíos en el agregado mineral por ciento
Standard (mm)	Alternativo	mm	Plg.	
1.18	N° 16	1.18	0.0469	23.5
2.36	N° 8	2.36	0.093	21.0
4.75	N° 4	4.75	0.187	18.0
9.50	3/8	9.50	0.375	16.0
12.50	½	12.50	0.5	15.0
19.00	¾	19.00	0.75	14.0
25.00	1.0	25.00	1.00	13.0
37.50	1.5	37.50	1.50	12.0
51.00	2.0	50.00	2.00	11.5
63.00	2.5	63.00	2.50	11.0

Tabla 2.5 :*(Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, I.A.)*

Cuanto mayor sea el VAM, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para el VAM como se detalla en el cuadro anterior los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubra las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto con mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar en contenido de asfalto.

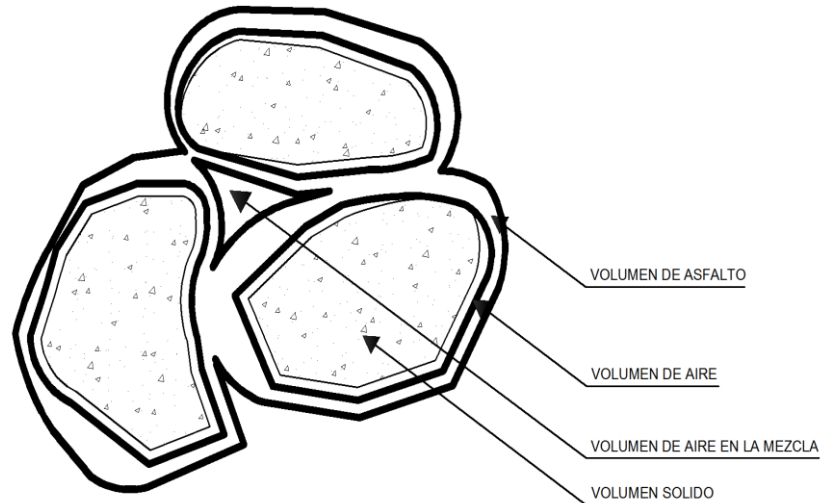


Figura 2.5: Diagrama de partículas en la mezcla asfáltica. Fuente: Elaboración propia.

En el esquema gráfico se puede observar que el volumen de vacíos puede ser índice de la susceptibilidad de una mezcla compactada, para el pasaje del aire o agua es de mucha importancia la interconexión de los vacíos con la superficie.

En casos extremos, cuando no es posible o practicable, por razones económicas u otras, alcanzar los requerimientos de especificaciones, se permite una tolerancia del 1% en los vacíos.

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$VAM (\%) = Vm(\%) + \frac{CA(\%) * D_{rm}}{GCA}$$

**(Ec. 2.5 Vacíos del Agregado Mineral)**

Dónde:

$VAM (\%)$ : Vacíos del agregado mineral

$Vm(\%)$ : Vacíos de la mezcla compactada

$CA(\%)$ : Porcentaje de cemento asfáltico

*GCA*: Peso específico del cemento asfáltico

*Drm*: Densidad real promedio

Bajo ninguna circunstancia se debe sobrepasar el valor de la fluencia o alcanzar valores inferiores a la estabilidad mínima requerida. Se debe enfatizar que estas variaciones se deben sobrepasar, sólo bajo condiciones extremas, a menos que el comportamiento, con combinaciones específicas de agregados, muestre condiciones satisfactorias para una mezcla asfáltica.

A medida que se reduce el tamaño de las partículas, estamos exigiendo un volumen mayor de asfalto, porque estamos aumentando el área superficial, consecuentemente debemos obtener mezclas con mayor porcentaje de V.A.M. y en caso de que una dosificación se hubiese obtenido un V.A.M menor requerido de acuerdo a las especificaciones se debe estudiar nuevamente la otra mezcla y así sucesivamente hasta obtener un valor de V.A.M. igual o mayor requerido.

#### **2.4.4.7 RELACIÓN BETUMEN VACÍOS (%).**

Expresa el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por el cemento asfáltico en la mezcla compacta.

Esta propiedad es el porcentaje de los vacíos del agregado mineral (VAM) que contiene asfalto. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$RBV(\%) = \frac{VAM(\%) - Vm(\%)}{VAM(\%)} * 100$$

**(Ec. 2.6 Relación Betumen-Vacíos)**

Dónde:

*RBV*(%): Relación betumen vacíos

*VAM*(%): Vacíos del agregado mineral

$V_m(\%)$ : Vacíos de la mezcla compactada

#### **2.4.4.8 ESTABILIDAD DE LA MEZCLA (Lb).**

Se entiende estabilidad de la a mezcla la carga máxima (carga de rotura) obtenida cuando se ejecuta el ensayo de acuerdo a las condiciones establecidas para ello; este parámetro se puede asimilar igualmente como una medida de la resistencia al corte de la mezcla.

La estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica es la carga máxima en libras que soporta una probeta aproximadamente de 6.35 cm. de altura y 10.00 cm. de diámetro cuando se la ensaya a temperatura dada cargándola en sentido diametral a una velocidad de 5.8 cm/minuto. Es la resistencia al desplazamiento lateral de la mezcla asfáltica, La estabilidad es la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones provocadas por las cargas impuestas. Los pavimentos sin estabilidad sufren deformaciones (ahuellamiento y corrimiento u ondulaciones). La estabilidad depende de la fricción interna y de la cohesión.

La fricción interna depende de la textura superficial, granulometría del agregado, forma de las partículas, densidad de la mezcla y cantidad de asfalto. Es una combinación de la resistencia friccional y de la trabazón del agregado de la mezcla.

La resistencia friccional aumenta con la rugosidad superficial de las partículas del agregado. También aumenta con el área de contacto de las partículas. La resistencia por trabazón depende del tamaño y forma de las del agregado. Para cualquiera agregado dado, la estabilidad aumenta con la densificación (hacer que el agregado sea compacto, apretado) de las partículas confinadas, la cual se logra mediante granulometrías cerradas y adecuada compactación. El exceso de asfalto en la mezcla tiende a lubricar las partículas y a disminuir la fricción interna del esqueleto pétreo.

La cohesión es la fuerza aglutinante propia de una mezcla asfáltica para pavimentación. El asfalto sirve para mantener las presiones de contacto desarrolladas entre las partículas de agregado. La cohesión varía directamente con la intensidad de la carga, el área cargada y la viscosidad del asfalto. Varía intensamente con la temperatura, la cohesión aumenta con el incremento del contenido de asfalto hasta un máximo y luego decrece.

Generalmente, para medir la estabilidad de una mezcla asfáltica o su resistencia al desplazamiento lateral, se emplea generalmente, diversos métodos pero para nuestro caso de estudio se usa el método Marshall.

La estabilidad máxima en una masa de agregados no se alcanza hasta que la cantidad de asfalto que recubre todas las partículas ha llegado a un valor crítico. Un porcentaje adicional del mismo actúa como lubricante más que como ligante, reduciendo la estabilidad de la mezcla pero aumentando su durabilidad. Por esta razón es mejor conservar el contenido de asfalto tan alto como sea posible conservando una adecuada estabilidad.

#### **2.4.4.9 FLUENCIA DE LA MEZCLA (1/100”).**

Es la deformación total expresada en centésimas de pulgada que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla.

Los valores de fluencia se incrementan con el aumento del contenido de asfalto en la mezcla y viceversa.

El flujo es la deformación que ocurre en el instante de la rotura, y por tanto una medida de la plasticidad y capacidad de fluidez de la mezcla. Esta deformación se considera en la misma dirección de aplicación de la carga.

#### **2.4.4.10 RELACIÓN ESTABILIDAD – FLUENCIA.**

Para entender que es una mezcla buena o mala, se recurre al concepto de rigidez analizando de una manera combinada los parámetros de estabilidad y flujo. Existe la falsa idea en nuestro medio de que una mezcla de alta estabilidad es en general buena, lo que lleva de hecho a fortalecer la idea de fabricar mezclas muy rígidas, asunto que favorece a la resistencia a la deformación plástica, pero a costa de una debilidad al fenómeno de la fatiga.

La tendencia a fabricar mezclas muy rígidas, con la falsa idea de que mayor resistencia a la deformabilidad es positiva para la mezcla, genera, en consecuencia, una ausencia de la flexibilidad típica del pavimento asfáltico, que puede influir en la fisuración prematura de las capas asfálticas sometidas a tráfico pesado.

El problema de especificar independientemente estos parámetros radica en que se suele rechazar mezclas cuando alguno de estos no cumple con los valores establecidos para control, es decir, que se está argumentando que al cumplir con los parámetros de estabilidad y flujo la mezcla es buena, pero antes de llegar a esta conclusión es indispensable verificar la rigidez de la mezcla, como una medida de su carácter deformable o quebradizo (dúctil o frágil). Una forma de controlar la rigidez de las mezclas, es empleada en la relación estabilidad/flujo, para verificar que se está evaluando de forma correcta la calidad mecánica de las mezclas asfálticas.

Para la elaboración de esta mezcla, no se realizó ningún estudio que relacione ambas propiedades mecánicas y de esta manera poder hacer una evaluación de su factibilidad como método de fabricación de asfaltos, que pueda salvar los problemas suscitados durante la fabricación de un asfalto tradicional como es la pérdida de la temperatura de la mezcla antes del proceso de compactación.

Es de considerar que para el método Marshall, las especificaciones establecen un valor mínimo de estabilidad, mas no definen un máximo; en consecuencia es frecuente ver que en muchos casos los diseños de mezclas asfálticas se toman valores extremadamente altos de estabilidad, sin tomar en cuenta que pueden llegar a ser perjudiciales; la estabilidad es un índice de la mezcla que indica rigidez, que al ser puesto en la estructura del pavimento, éste será fácilmente quebradizo bajo las cargas del tránsito y más susceptible a los agentes del intemperismo, degenerándose completamente hasta el punto de perder la capa asfáltica.

#### **2.4.4.11 ADHERENCIA AGREGADOS – CEMENTO ASFÁLTICO.**

La adherencia es la capacidad de un agregado de retener una película delgada de ligante bituminoso sobre su superficie aun en presencia de agua.

De acuerdo a dicha capacidad, los agregados se clasifican en hidrófilos cuando son más afines al agua que los cementos asfálticos (agregados ácidos) e hidrofílicos cuando no presentan afinidad por el agua (agregados alcalinos).

La afinidad es también una función de la actividad superficial de los agregados, la que esta presentada principalmente por el tipo de carga que tiene la superficie de las partículas que dependen principalmente de los minerales presentes.

Haciendo repaso de la fisicoquímica de los suelos, se puede llegar a una comparación del comportamiento de una mezcla de concreto asfáltico con una arcilla, suelo donde las fuerzas de superficie creadas por las valencias no satisfechas (iones de intercambio) de los minerales ionizados generan cargas eléctricas que producen fenómenos de atracción y repulsión. En estos materiales, el conjunto formado por la capa de agua absorbida y las sustancias disueltas se denomina complejo de absorción y se puede decir que es lugar geométrico donde se producen todas las reacciones de atracción y repulsión necesarias para generar la resistencia al corte de los suelos arcillosos. En

cambio, en el caso de un suelo granular, la mencionada actividad es mucho menor ya que las partículas presentan una superficie específica menor y una masa mucho mayor que las partículas de arcilla.

Resumiendo, se puede decir entonces que, la actividad de un suelo se mide a través de la capacidad de atraer iones, la cual permite determinar la forma a la magnitud de la carga disponible en una partícula.

En caso de una mezcla asfáltica, lo que se trata de alcanzar es una cohesión a través de la capacidad de atraer iones, la cual permite determinar en forma aproximada la magnitud de la carga disponible en una partícula.

En caso de una mezcla asfáltica, lo que se trata de alcanzar es una cohesión a través de aglutinante para que ésta, en combinación con la fricción interna de las partículas granulares, genere una resistencia al corte adecuado del material artificialmente producido. Esta cohesión dependerá entonces de la capacidad de las partículas de absorber una película de aglutinante que, además de recubrir las partículas y protegerlas del intemperismo, produce un efecto análogo al de la capa de agua absorbida por los suelos arcillosos.

La capacidad de absorber la película de ligante dependerá entonces de la actividad superficial de las partículas de agregado y, principalmente, del tipo de carga disponible. La carga eléctrica debido a las valencias no satisfechas podrá ser positiva o negativa. En el primer caso, las partículas granulares repelerán a las moléculas bipolares de agua produciendo un buen mojado de su superficie por parte del cemento asfáltico (buena afinidad con el cemento asfáltico) y, en el segundo, ocurrirá un fenómeno inverso, es decir, las moléculas bipolares de agua serán atraídas por las partículas de los agregados y la absorción del aglutinante se verá inhibida (mala afinidad con el cemento asfáltico).

Cuando el contenido de sílice en el agregado es superior a 66% se denomina al material como agregado ácido o hidrófilo y será un material con afinidad pobre por el ligante. En cambio, cuando el contenido de sílice es inferior a 55%, se

tiene un predominio de cargas positivas y el agregado es de tipo alcalino presentando una buena afinidad con el asfalto.

Si el contenido de sílice varía entre 55 a 66 % el agregado se denomina como agregado intermedio y su comportamiento estará determinado no sólo por su naturaleza sino también por el tipo de cemento asfáltico.

La mayoría de los agregados existentes en la naturaleza son de características ácidas ya que los principales minerales constituyentes son el sílice, el cuarzo y las cuarcitas; es decir, minerales que en presencia de agua absorben una capa de esta al atraer a los dipolos de agua por tener superficie saturada de aniones (iones negativos). Los agregados de naturaleza calcárea son los agregados que mejor adherencia presentan ya que su superficie posee una carga positiva (catiónica).

En consecuencia, se puede decir que en la adherencia de las mezclas asfálticas intervienen fenómenos superficiales entre los agregados y el cemento asfáltico gobernados por la energía generada por las fuerzas en la interface de ambos, donde el factor más importante y decisivo en la adherencia es la naturaleza de los agregados pero, en mayor o menor grado interviene también la naturaleza del cemento asfáltico.

De las características de los iones de intercambio de los agregados base entonces la definición de agregados hidrófilos y agregados hidrófobos son denominados hidrófilos cuando la carga superficial está determinada por iones negativos (aniones) e hidrófobos cuando son cationes los que definen la carga superficial de la piedra (carga positiva). En el primer caso, la afinidad de los agregados será mala y en el segundo buena.

El estudio de la adherencia del agregado con un determinado ligante bituminoso es un tema de creciente importancia en la ingeniería de pavimentos, disciplina que considera que el comportamiento de las mezclas depende, en general, de su correcta dosificación, del empleo de una técnica constructiva

adecuada y, fundamentalmente, de las características físico químicas de ambos componentes (agregado pétreo y cemento asfáltico). En una práctica general al estudiar una mezcla bituminosa ensayar por separado los componentes de la misma sin comprobar dicha mezcla, a pesar de cumplir con los ensayos de rutina, puede tener un comportamiento posterior no satisfactorio debido a una mala adherencia entre ligante y el agregado.

#### **2.4.5 MÉTODOS DE MEZCLADO.**

Según el método constructivo, las mezclas asfálticas se dividen en dos grupos: Mezclas en planta y mezclas en sitio.

##### **2.4.5.1 MEZCLA EN PLANTA.**

Mezcla en planta es la mezcla de árido y asfalto en una planta central generalmente de alto rendimiento. Los aspectos más comunes para clasificar una planta de asfalto son:

El tipo de proceso: estas se dividen en plantas continuas y discontinuas (“bachada”).

El sentido de secado: las plantas pueden ser en sentido o flujo paralelo y en contra-flujo.

La forma de mezclado: existen las plantas de mezcla en frío y las de mezcla en caliente.

Según el tipo de proceso: Las plantas continuas como lo indica su nombre, operan en una línea de producción continua, donde el agregado y el producto pasan de una etapa a otra sin detenerse en el proceso, de manera que la mezcla se entrega de forma continua en la descarga.



*Figura 2.6: Planta de Asfalto Continua. Fuente:  
<https://www.google.com.bo/search?q=plantas+de+asfalto+continuas&espv=2&source>*

En el proceso discontinuo (ver figura 2.7) o de bachada, (el término bachada se deriva del inglés batch que significa hornada o lote), se caracteriza por que en uno o más puntos del proceso se "arman paquetes" de material para someterlos a un proceso puntual, clasificación, acumulación, pesaje o mezcla, para seguir a otro punto en el que el paquete será sometido a un proceso diferente, de manera que habrá un proceso continuo en el que los sub-procesos se realizan por paquetes y habrá segundos en los que no se entrega nada de mezcla y otros en los que se entrega un "batch" de producto.



*Figura 2.7. Planta asfáltica discontinua. Fuente:*  
<https://www.google.com.bo/search?q=plantas+de+asfalto+continuas&espv=2&source>

En las plantas de secado por sentido o flujo paralelo los materiales ingresan al tambor secador en el sentido de ingreso de la llama y fluyen en sentido paralelo al del tránsito de los gases.

En las plantas de secado a contra-flujo (ver figura 2.8) sucede todo lo contrario, los agregados ingresan al tambor secador por el extremo opuesto a la llama y fluyen en contra-sentido de los gases del sistema, estos sistemas tienen la particularidad de permitir que el secado se realice a menores temperaturas y por ende consumiendo menor cantidad de combustible.



*Figura 2.8 Planta Asfáltica de secado a contra flujo. Fuente: [http://www.resansil.com/noticias/serie\\_advanced\\_ciber.htm](http://www.resansil.com/noticias/serie_advanced_ciber.htm)*

Según el tipo de mezclado:

En las mezclas en frío (ver figura 2.9) se usan asfaltos líquidos, por lo cual la mezcla se efectúa sin calentar los agregados y el asfalto se calienta a una temperatura relativamente baja, solo para obtener la viscosidad necesaria de mezclado.

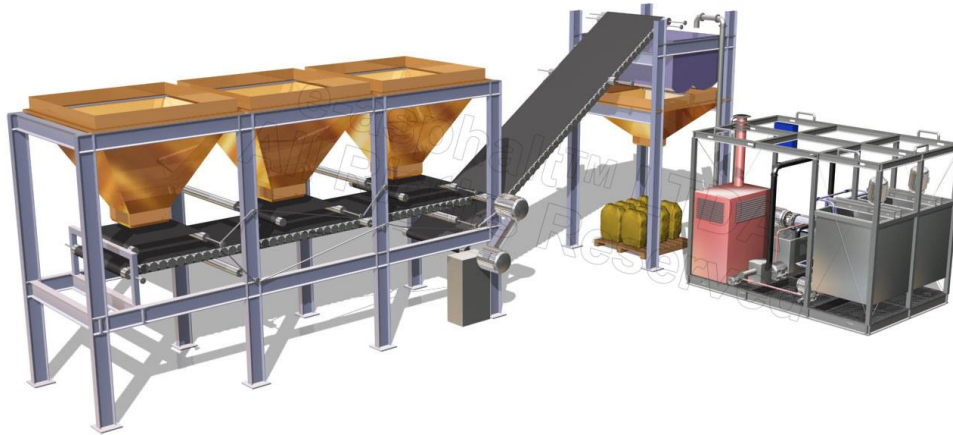


Figura 2.9 Planta asfáltica de mezclado en frío. Fuente: <http://www.e-asfalto.com/emulsiones/mezclafrio.htm>

Las mezclas en caliente son las de mayor estabilidad de todas las mezclas asfálticas y consisten en mezclar el agregado pétreo y el cemento asfáltico a alta temperatura (135 a 165°C). Estas últimas se dividen en mezcla en el tambor secador y mezcla externa, las de mezcla en el tambor, comúnmente llamadas drum-mix (ver figura 2.10), mezclan los agregados con el asfalto, bien sea en un módulo continuo, llamado tambor secador-mezclador o en un módulo concéntrico pero aislado de la zona de secado, al cual algunos llaman doble barril.

Las plantas de mezcla externa se caracterizan por que el proceso de mezclado se realiza en una unidad mezcladora independiente del tambor secador, los mezcladores más comunes son el de tipo tambor y el de ejes gemelos, funcionalmente el principio del mezclador de tipo tambor es que divide el tradicional tambor secador-mezclador en 2 tambores independientes que realizan sus funciones separadamente, al separar las operaciones de secado y mezclado se elimina totalmente el riesgo de oxidación del asfalto por contacto con la llama, existente en los modelos muy antiguos de planta drum-mix, riesgo

resuelto pero heredado culturalmente en los modelos modernos y automatizados.



*Figura 2.10 Planta asfáltica tipo drum-mix. Fuente: <http://vishvakarma.com/Spanich/asphaltdrummix.htm>*

#### **2.4.5.2 MEZCLA EN SITIO.**

Una mezcla en sitio (ver figura 2.11) es una carpeta asfáltica que se produce mezclando árido con asfalto líquido en la misma faja del camino, mediante motoniveladora o alguna maquinaria especial que efectúe el trabajo.



Figura 2.11 Mezcla en sitio. Fuente: <http://civilgeeks.com/2014/04/29/como-evitar-contaminacion-de-mezclas-asfalticas-recomendaciones-del-inveas/>

En muchas ocasiones, el proyecto de una mezcla asfáltica se reduce a determinar su contenido de ligante, sin embargo, esa es solo la última fase de un proceso más amplio, que requiere de un estudio cuidadoso de todos los factores involucrados, a fin de garantizar un comportamiento adecuado de la mezcla y un considerable ahorro económico en la solución.

Las fases de las que consta el proyecto de una mezcla son las siguientes:

- Análisis de las condiciones en las que va a trabajar la mezcla: tráfico, tipo de infraestructura (carretera, vía urbana, aeropuerto, etc.), la capa de la que se trata (rodadura, intermedia o base) y espesor, naturaleza de las capas subyacentes, intensidad del tráfico pesado, clima, etc. Asimismo, hay que distinguir si se trata de un pavimento nuevo o de una rehabilitación.

- Determinación de las propiedades fundamentales que ha de tener la mezcla, dadas las condiciones en las que ha de trabajar. Debe establecerse la resistencia a las deformaciones plásticas o la flexibilidad, entre otras.
- Elección del tipo de mezcla que mejor se adapte a los requerimientos planteados, incorporando en este análisis las consideraciones económicas o de puesta en obra que haya que considerar.
- Materiales disponibles, elección de los agregados pétreos, los cuales deben cumplir con determinadas especificaciones, pero que en general serán los disponibles en un radio limitado y, por lo tanto, a un costo razonable. Asimismo, hay que elegir el polvo mineral de aportación.
- Elección del tipo de ligante: asfalto, asfalto modificado, emulsión asfáltica, el costo es siempre un factor muy relevante, pero depende de la función de la capa y de las condiciones del entorno.
- Dosificación o determinación del contenido óptimo de ligante según un proceso que debe adaptarse al tipo de mezcla, la cual debe hacerse para distintas combinaciones de las fracciones disponibles del agregado pétreo, de manera que las granulometrías conjuntas analizadas estén dentro de un huso previamente seleccionado.
- Otros factores a tener en cuenta en el diseño y selección de una mezcla asfáltica son los siguientes: exigencias de seguridad vial, estructura del pavimento, técnicas de diseño y ejecución, sitio de construcción del pavimento (topografía, temperatura, terreno, periodo de lluvias trazado de la vía, entre otros), condiciones de drenaje, consideraciones económicas.

Para realizar el proyecto de una mezcla asfáltica que se empleará en un determinado pavimento, existe una gama amplia de posibles soluciones, para esto se hace necesario un estudio muy riguroso y detenido, para elegir el diseño más adecuado técnica y económicamente.

Existen también principios que se aplican de acuerdo con las siguientes reglas:

a) Tipo de mezclas asfálticas según su composición granulométrica.

El tipo de mezcla asfáltica a emplear se determinará en función de:

- La capa de pavimento a que se destine.
- La categoría del tráfico.

b) Tipo de ligante asfáltico.

El tipo de ligante asfáltico a emplear dependerá de:

- La capa de pavimento a que se destine la mezcla.
- El tipo de mezcla.
- La categoría del tráfico.
- El clima de la zona en que se encuentre la carretera.

c) Relación Fíller /Asfalto.

La relación ponderal de los contenidos de fíller y asfalto de la mezcla asfáltica, dependerá de:

- La capa de pavimento a que se destine la mezcla.
- El tipo de mezcla.
- La categoría del tráfico.
- La zona en que se encuentre la carretera.

#### **2.4.6 TIPOLOGÍAS DE DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.**

Los deterioros de los pavimentos asfálticos se deben a una serie de factores como lo pueden ser el medioambiente (lluvia, gradientes de temperatura), tráfico (cargas por eje, presión de inflado de los neumáticos, intensidad), materiales inadecuados, procesos de elaboración de las mezclas inapropiados,

técnicas de construcción deficientes (transporte, extensión y compactación), fórmula de trabajo deficiente.

Todos estos defectos se pueden detectar una vez que se haya concluido la obra, como por ejemplo una mala textura superficial, geometría, aspecto y también estos defectos se pueden detectar en un periodo considerable de tiempo durante la vida de servicio del pavimento. Se mencionan a continuación los deterioros o fallos debidos solamente a formulaciones defectuosas de las mezclas asfálticas y de su puesta en obra.

#### **2.4.6.1 FALLOS EN LA CONSTRUCCIÓN.**

Durante la fase de construcción y puesta en obra de las mezclas asfálticas se pueden producir errores y fallos accidentales, como:

1. La segregación de la mezcla del pavimento, que a su vez se puede clasificar en los tipos siguientes:

- Segregación aleatoria.
- Segregación transversal.
- Segregación longitudinal, bien sea en el centro o en los lados.

2. Defectos en las mezclas difíciles de compactar.

Los dos tipos extremos de mala compactibilidad de las mezclas ocurren con las poco trabajables y con las blandas.

Las mezclas poco trabajables presentan el mayor peligro, suponiendo que su comportamiento estructural sea el previsto, en la necesidad de que la compactación sea enérgica y contundente sin llegar a romper las partículas minerales. Una mala densidad final reduce la durabilidad notablemente.

Las mezclas blandas se caracterizan por la dificultad de compactación al responder como un material parcialmente plástico ante las pasadas de los rodillos, con fenómeno similar al colchoneo.



Figura 2.12 Fallos en la Construcción de pavimentos asfálticos. Fuente: Capítulo 3 “Mezclas Asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.

#### 2.4.6.2 EXUDACIONES.

La exudación se caracteriza por la presencia de ligante libre o polvo mineral incorporado en la superficie del pavimento. Las superficies ricas en asfalto, especialmente en tiempo húmedo, pueden llegar a ser deslizantes si han perdido su textura. Las causas de las exudaciones son las siguientes:

- Exceso de ligante asfáltico en una o más capas del pavimento.
- Escaso contenido de vacíos.
- En tiempo caluroso, el sobrepaso del tráfico puede ejercer presión adicional sobre el pavimento que contiene demasiado asfalto forzándolo hacia la superficie.



*Figura 2.13. Exudación en pavimento asfáltico. Capítulo 3 “Mezclas Asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.*

#### **2.4.6.3 SEGREGACIONES.**

La segregación, disgregación y peladura, es la separación de las partículas minerales de la superficie del pavimento. El agregado fino, se separa de las partículas de mayor tamaño, lo que da lugar a una apariencia de capa de pavimento erosionada y rugosa. Entre las causas de este defecto se encuentran:

- Los esfuerzos cortantes horizontales en la superficie de rodadura, debidos a la acción de los neumáticos de los vehículos.
- La entrada de agua en el pavimento a través de los huecos de la propia mezcla. La presión hidrostática considerable creada por las sollicitaciones del tráfico puede causar la separación de las partículas minerales de la capa superficial.
- El bajo contenido de ligante asfáltico.
- La alta viscosidad del ligante asfáltico que llega a producir una mezcla frágil.
- El sobrecalentamiento en la manipulación, que haya envejecido al ligante asfáltico.
- La mala granulometría de la mezcla con insuficiencia de finos.

Las segregaciones importantes pueden crear una dificultad al tráfico. Aparte de la incomodidad para los vehículos, estos suelen producir un incremento en el mismo deterioro.

La segregación en la superficie puede clasificarse en los tipos siguientes:

1. Segregación aleatoria, que tiene un origen más difícil de determinar. Sus causas pueden ser:

- No disponer de acopios uniformes.
- Vertidos en los dosificadores en frío.
- Error en la carga del árido en los dosificadores en frío.
- Demasiadas operaciones de arrancado y parada en las plantas de tambor secador.
- Diferencias notables de nivel en la mezcla almacenada en el silo.
- Operaciones irregulares en la descarga de los camiones.
- Demanda descompensada de la extendedora.

2. Segregación transversal, se pone de manifiesto con una peculiar mancha en la superficie. El grado de segregación se cuantifica por los cambios de textura y es fácilmente reconocible. Esta segregación puede ser debida a:

- Empleo del material inicial que proviene del arranque de la planta.
- Inadecuadas operaciones de carga de los camiones.
- Vaciado excesivo y mal manejo de las alas de las tolvas de las extendedoras.
- Material segregado en la tolva de carga de las plantas.
- Compuertas de la mezcladora mal cerradas.
- Almacenamiento de los dosificadores primarios al límite de su capacidad.

3. Segregación longitudinal, bien sea en el centro o en los lados, se puede producir en el centro de la banda extendida o en los bordes, y puede deberse a defectos en los husillos o a una velocidad inadecuada de la extendedora.



*Fotografías 2.14. Segregación longitudinal en pavimento asfáltico. Capítulo 3 “Mezclas Asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.*

#### **2.4.6.4 DESPLAZAMIENTO DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.**

El ligante es desplazado por el agua o por el vapor de agua y a veces por la combinación de algún agente que haya contaminado el pavimento, lo que produce disminución de la adhesividad entre el ligante asfáltico y la superficie mineral de las partículas.

En escasas ocasiones el desplazamiento se acompaña de manchas exudadas del ligante en la superficie del pavimento. A veces al fenómeno anterior se añade el de la concentración de ligante en algunos puntos.

Existen diferentes causas por las que el agua puede desplazar al asfalto en su contacto con las superficies minerales del agregado:

- Agua interior o exterior al agregado pétreo: Los agregados en muchas ocasiones no se han secado completamente en la planta asfáltica.

- Tipo de agregado pétreo: Los agregados con altos contenidos de sílice, son más sensibles a estar sometidos a los efectos del agua en los fenómenos de desplazamiento de ligante que los agregados calizos.
- Agregados sucios: El ligante no se adhiere bien a las partículas que tienen una película de polvo. En presencia de agua, estas partículas se descubren rápidamente por lo que el polvo permite fácilmente la entrada de agua en la superficie mineral.
- Emulsificación: El ligante sometido a la acción abrasiva del tráfico, puede emulsionarse especialmente con agentes químicos o minerales presentes, tales como polvo arcilloso.
- Agua libre: El agua libre existe como consecuencia de un drenaje inadecuado del pavimento. En algunos casos, especialmente en capas superiores, el agua puede quedar atrapada durante la construcción.

#### **2.4.6.5 TEXTURA SUPERFICIAL INADECUADA.**

La textura de la superficie de rodadura es una característica esencial para la seguridad de la rodadura de los vehículos. Se ha convenido en distinguir unas texturas tipo, según su profundidad media:

1. Microtextura, con profundidad media en círculo de arena de aproximadamente 0.4.
2. Macrotextura, con profundidad media en círculo de arena de aproximadamente 0.7.
3. Megatextura.
4. Combinación posible de las anteriores texturas.

Las causas de una textura superficial inadecuada son las siguientes:

- Pulimento de los agregados, por ser blandos.

- Granulometría con excesivos finos.
- Exceso de ligante en superficie.
- Segregaciones de la mezcla en la puesta en obra.
- Contaminaciones de la superficie.

Una mala megatextura se debe relacionar con defectos en la extensión de la capa de mezcla o con las irregularidades reflejadas de la capa inferior.



*Figura 2.15. Textura superficial inadecuada en pavimentos asfálticos. Fuente: Capítulo 3 “Mezclas Asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.*

#### **2.4.6.6 AGRIETAMIENTOS Y FISURAS.**

El agrietamiento y fisuración es un mecanismo habitual de fallo mecánico por fatiga de una capa de pavimento. Aparte de ello, las grietas prematuras indican un problema de diseño o de construcción de la mezcla asfáltica. Las causas suelen ser:

- Las grietas se producen por tensiones mayores que la tensión de rotura de la mezcla.
- Las grietas comienzan en la zona donde la tracción por flexión es máxima y progresan bajo las cargas repetidas. Se suele formar un mapa de grietas formado por un conjunto de grietas longitudinales y transversales.

- La deformación elástica transversal se produce con las flexiones de la capa de pavimento. La grieta inicial comienza longitudinalmente al lado exterior de la huella de la rueda. Esta grieta es seguida por otra paralela en el borde interior de la huella.
- El uso del asfalto de alta viscosidad puede ocasionar que las mezclas sean menos resistentes al efecto acumulado de las flexiones.
- Los cambios extremos de temperaturas pueden causar en un pavimento cambios de volumen que producen grietas térmicas que, usualmente son transversales.
- La combinación de grietas longitudinales y transversales, puede formar elementos o losas rectangulares independientes. Aunque la causa de este agrietamiento no sea debido a las cargas, una vez producido, las sollicitaciones del tráfico incrementarán severamente el deterioro al haber perdido las capas su continuidad física y resistente.
- También se producen grietas longitudinales en las juntas de trabajo. Ocurren cuando las juntas se compactan de forma insuficiente y/o a baja temperatura.
- Las grietas aleatorias por fatiga, se suelen formar por la fatiga de la mezcla asfáltica en alguna de las capas. Estas grietas están relacionadas con las sollicitaciones del tráfico. Las grietas comienzan en la parte inferior de las capas donde las tensiones son más altas, formándose una o dos grietas longitudinales próximas a las huellas de las ruedas y terminan con un estado generalizado de superficie agrietada. Normalmente la fatiga es más acusada en la parte externa del carril con más tráfico, debido a las condiciones de borde.
- Las grietas generalizadas en las zonas de rodadura pueden ser causadas también por una inadecuada compactación, o mal diseño, de las capas inferiores que puede agravarse con la presencia de agua, más que por típico

fenómeno de fatiga. En éste caso, en la capa inferior se refleja el asentamiento, deformación o agrietamiento causado por las malas prestaciones mecánicas.

#### **2.4.6.7 BOMBEO DE FINOS.**

Puede producirse en las grietas de las capas superiores asfálticas rígidas, si el soporte tiene exceso de finos, humedad u otras contaminaciones. También se ha detectado muy frecuentemente el fenómeno en las grietas reflejadas de las bases tratadas con cemento, línea débil por la que penetra el agua, deteriorando la base.



*Figura 2.16. Bombeo de finos en pavimentos asfálticos. Fuente: Capítulo 3 “Mezclas Asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.*

#### **2.4.6.8 DEFORMACIONES PLÁSTICAS.**

Son las variaciones permanentes del perfil superficial de la capa de mezcla asfáltica por acumulación de deformaciones permanentes y/o por desplazamiento de la masa de la misma. Son de distintos tipos:

1. El arrollamiento se asocia normalmente a una baja estabilidad de las mezclas que se manifiesta en una deformación plástica perpendicular al eje de la vía.
2. El ahuellamiento, que se produce transversalmente, en la huella de las ruedas de los vehículos con densificación y/o desplazamiento lateral.

El ahuellamiento puede describirse de la siguiente forma:

- Ahuellamiento con desplazamiento plástico, con una depresión cerca del centro de la carga aplicada y con elevaciones a cada lado de la depresión. Este tipo de ahuellamiento está causado generalmente por bajo contenido de huecos en la mezcla (menos del 3%). En este caso, una sobre compactación ocasiona que el ligante rellene los huecos entre las partículas. También el betún actúa como un lubricante más que como un ligante en época calurosa.
- Ahuellamiento por consolidación. Son unas depresiones cerca del centro de la carga aplicada sin el acompañamiento de las elevaciones laterales. Este ahuellamiento se producen generalmente por un alto contenido de huecos con falta de estabilidad de la mezcla.
- Deformación mecánica. Es el resultado de un asentamiento de las capas inferiores que puede acompañarse de grietas en las capas de pavimento. Este fallo ocurre cuando la estructura del pavimento no está bien proyectada o construida.

El material puede también desplazarse por deslizamiento de las capas inferiores debido a presiones horizontales. Este desplazamiento está causado algunas veces por suciedad, contaminaciones o excesiva cantidad de ligante en el tratamiento de adherencia de la superficie inferior. El desplazamiento puede ocurrir en la unión de un pavimento rígido y un pavimento asfáltico tal como sucede en algunas losas de aproximación de los puentes. Este desplazamiento ocurre frecuentemente en las zonas de las intersecciones En curva donde las fuerzas horizontales de los vehículos son más elevadas.

Las causas de las deformaciones plásticas son las siguientes:

- Contenido inadecuado de vacíos en las mezclas convencionales (menos del 3%).
- Excesivo contenido de vacíos (mayor del 8%) si son mezclas densas.

- Baja viscosidad de los ligantes asfálticos.
- Errores en el proyecto de la mezcla, ya que las propiedades del ligante no son las mismas a la temperatura de los ensayos que a la temperatura del servicio en obra. En definitiva se dispone de un ligante más blando que el que estaba previsto.
- Insuficiente estabilidad del material todavía caliente cuando se ha permitido el paso anticipado del tráfico.
- Excesiva consolidación bajo tráfico de las capas del pavimento.
- Tiempo de aplicación de la carga más prolongado que el previsto. Las mezclas bituminosas tienen respuestas más elásticas a las cargas de corta duración y menos elásticas a las cargas lentas. Por ésta razón, las deformaciones plásticas se presentan sobre todo en las rampas y en otras zonas de tráfico lento.
- Factores de la fórmula de la mezcla tales como un contenido de arena natural, un bajo contenido de filler, y la existencia de partículas minerales redondeadas.
- Insuficiente dureza del árido que determina fenómenos atrición y formación de finos con disminución simultanea de huecos.
- Degradaciones variadas del agregado pétreo.



*Figura 2.17 Deformación plástica permanente en pavimento asfáltico. Fuente: Capítulo 3 “Mezclas Asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.*

## **2.5 MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES.**

### **2.5.1 INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo se abordaran algunas generalidades de este tipo de mezclas asfálticas, las ventajas y limitaciones de su uso y las diversas metodologías que son empleadas en el diseño.

Al ser este tipo de mezclas generalmente fabricadas con asfaltos modificados, también se mencionaran algunas características de este tipo de asfaltos, debido a que este tipo de asfaltos aportan a la estructura de estas mezclas grande beneficios, por lo que se ha considerado necesario hablar de los diferentes tipos de agentes empleados para la modificación y la caracterización de estos asfaltos.

### **2.6 DEFINICIÓN.**

Las mezclas asfálticas drenantes pueden definirse como aquellas mezclas bituminosas cuyo contenido de vacíos es suficientemente alto para permitir que a su través se filtre el agua de la lluvia con rapidez y pueda ser evacuada hacia las bermas, cunetas u otros elementos de drenaje, evitando su permanencia en la superficie de la capa de rodadura, incluso bajo precipitaciones intensas y prolongadas.

Habitualmente se admite que para que una mezcla pueda considerarse drenante debe tener un contenido inicial de vacíos del 16%. Este límite establecido, 16% puede parecer arbitrario. Realmente con valores inferiores de porosidad las mezclas pueden tener una capacidad drenante apreciable. Sin embargo, para que esta capacidad se mantenga durante un periodo de tiempo razonable, es necesario fijar un límite mínimo de partida. Este límite cambia según distintos criterios pero casi todos ellos pueden englobarse dentro del correspondiente 16%. Ello no supone que las distintas normativas se conformen con este porcentaje. Lo aconsejable es partir de una porosidad mayor.

Las mezclas drenantes pueden construirse tanto en caliente como en frío empleando como ligantes los asfaltos puros o las emulsiones asfálticas modificadas o no. De hecho, las mezclas drenantes en frío son fabricadas tradicionalmente en España, con un contenido nulo o casi nulo de arena, son drenante en sentido estricto con porcentajes de vacíos presentes en la mezcla asfáltica del orden de 25%. Sin embargo, la técnica de las mezclas drenantes ha adquirido un auge especial en los últimos años debido al avance de sistemas de diseño e instalación en obra como mezcla bituminosa en caliente.

La elaboración de una mezcla drenante implica el empleo de una composición granulométrica muy diferente a la de las mezclas tradicionales, tipo concreto asfáltico. En estas el contenido de arena suele ser muy elevado, generalmente comprendido entre un 35 y 60% y como consecuencia de ello la resistencia de la mezcla, está basada principalmente en la cohesión proporcionada por el mortero bituminoso. El rozamiento interno de la mezcla únicamente, se moviliza frente a altas sollicitaciones, mantenidas en el tiempo.

En las mezclas drenantes para poder obtener un contenido de vacíos elevado es necesario modificar la proporción agregado grueso/agregado fino de tal forma que, en general el contenido de arena suele ser inferior al 20%, debido a ello, la capacidad de resistencia de la mezcla no puede basarse en la cohesión, puesto que falta mortero, sino en el rozamiento interno.

Esta falta de cohesión hace que la mezcla se bastante crítica ante ciertos esfuerzo del tráfico, especialmente los de tipo tangencial, que provocan fenómeno de disgregación. Para poder conjugar una buena porosidad con una buena resistencia a la disgregación, es necesario realizar un diseño cuidadoso de la mezcla, eligiendo con detalle los distintos componentes, sus proporciones, y utilizando los distintos ensayos puestos a punto.

### **2.6.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS MEZCLAS DRENANTES.**

Las mezclas asfálticas drenante poseen una serie de características especiales que hacen que su comportamiento se diferente al de pavimentos impermeables convencionales. Estas diferencias hacen que las mezclas drenantes presenten un serie de ventajas, pero también tengan algunas limitaciones.

#### **2.6.1.1 VENTAJAS.**

- Se obtiene mayor resistencia al deslizamiento bajo lluvia y se elimina o reduce el fenómeno de hidropelaje (aquaplaning): Al presentarse el fenómeno de hidropelaje se produce una pérdida total del control sobre la dirección del vehículo, al existir una película de agua entre los neumáticos y la capa de rodadura. La capacidad de la mezcla para mantener el pavimento libre de agua depende de su capacidad permeable y su espesor.

Cuando hay una elevada película de agua sobre la vía la disminución de la adherencia entre el neumático y la carpeta de rodadura es considerable, con lo que aumentan los riesgos de accidentes. Las mezclas drenantes producen una mejora en estos casos debido a que:

- Aumenta la macrotextura del pavimento.
- Elimina el agua de la superficie del pavimento.
- Elevada resistencia al deslizamiento a altas velocidades: En las mezclas asfálticas drenantes los parámetros de macrotextura obtenidos son siempre altos, por lo cual la pérdida de resistencia al deslizamiento con la velocidad depende fundamentalmente de la macrotextura de la superficie de rodadura.
- Reducción del agua dispersada por el paso de los vehículos: La seguridad y la comodidad del conductor se ve afectada en tiempo de lluvia por el agua dispersada por los vehículos que no poseen guarda fangos, disminuyendo p afectando la visibilidad y las maniobras de adelantamiento. De forma espectacular las mezclas drenantes disminuyen estas dispersiones

radicalmente hasta prácticamente eliminarlas, incluso bajo lluvias intensas y prolongadas.

- Mejora de la visibilidad con la capa de rodadura mojada: En pavimentos convencionales y sobre superficies de macrotextura lisa se produce la reflexión de la luz de los vehículos que circulan en sentido contrario durante la noche, presentándose el deslumbramiento de los conductores. Al eliminarse la película de agua con las mezclas drenantes y dotar la rodadura de una macrotextura rugosa se reduce la reflexión de la luz de los vehículos y se mejora la visibilidad de las marcas viales.
- Adecuado comportamiento mecánico: Pese a la baja estabilidad de estas mezclas drenantes en laboratorio, la cohesión obtenida y el comportamiento interno del sustrato mineral evitan que se presenten problemas de deformaciones plásticas durante la vida útil con espesores habituales de 3 a 5 cm. La cohesión y un vínculo proporcionado por el ligante y la fracción del agregado fino mantienen la unión del agregado en la mezcla e impiden que se produzca desgaste y pérdidas de agregado grueso.
- Pavimentos de rodadura cómoda y silenciosa: En los pavimentos drenantes la macro textura se obtiene mediante la formación de concavidades, generando menor ruido de rodadura, similar a la que se produce con un pavimento de macro textura lisa. Por otro lado la presencia de poros transforman la capa de rodadura en un material absorbente que ayuda a disminuir el ruido total producido por la circulación de los vehículos.

#### **2.6.1.2 DESVENTAJAS.**

- Mayor costo inicial: Las mezclas deben construirse con asfaltos modificados y agregados con características granulométricas propias que permitan obtener la capacidad drenante buscada en la mezcla, lo cual encarece los costos.

- Pérdida de la permeabilidad en el tiempo: Ocasionada por la acción del tráfico, el polvo, suciedad, derrumbes del material sobre la vía, etc., se puede presentar la disminución en la permeabilidad lo que puede suponer una pérdida parcial de sus propiedades iniciales para las cuales esta mezcla está diseñada. El diseño de las mezclas drenantes con contenido de vacíos alto, el uso de agregados redondeados con fracturas en más de dos (2) caras y la alta resistencia al desgaste, ayuda a evitar que se produzca la colmatación de los poros.
- Disminución de la resistencia por la acción de los disolventes y derivados del petróleo: Este problema puede localizarse únicamente en aquellos puntos donde se puedan producir vertidos (pendientes fuertes, estacionamiento, etc.).
- Requerimiento de un soporte adecuado: En una capa de rodadura, la mezcla asfáltica drenante necesita apoyarse sobre una base firme y estructuralmente adecuada, además, esta debe cumplir con excelentes especificaciones geométricas y ser completamente impermeable, lo cual permite un excelente drenaje de la carpeta.

## **2.7. ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMERO.**

Haciendo un poco de historia, los asfaltos modificados se utilizaron primero en las emulsiones para impermeabilizantes y después se empezaron a utilizar en la pavimentación; en riegos como tratamientos superficiales en frío y posteriormente se empezó a modificar el cemento asfáltico para utilizarse cuando se requería un asfaltos de mejor calidad o mayor resistencia que la que ofrecían un cemento asfáltico normal.

### **2.7.1 DEFINICIÓN DE POLÍMERO.**

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos

químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que forman diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas. Algunos modificadores poliméricos que han dado buenos resultados, se enlistan a continuación:

- Homopolímeros: Que tienen una sola unidad estructural (monómero).
- Copo Limeros: Tienen varias unidades estructurales (EVA, SBS).
- Elastómeros: Al estirarlos se sobrepasa la tensión o fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tiene deformaciones pseudo plásticas con poca elasticidad.

### **2.7.2 ¿QUÉ ES UN ASFALTO MODIFICADO?**

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambio de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reo lógicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación.

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

### **2.7.3 PRINCIPALES MODIFICADORES UTILIZADOS EN EL ASFALTO.**

Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

- **Polímero Tipo I:** Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB), entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.
- **Polímero Tipo II:** Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base a polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.
- **Polímero Tipo III:** Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero elastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietilenote alta o baja densidad, entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.
- **Hule molido de Neumáticos:** Es un modificador de asfaltos que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado

con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta y en tratamientos superficiales.

El ligante asfáltico y las propiedades de la mezcla pueden ser diseñadas eligiendo el polímero correcto para determinada aplicación, y asegurándose que es compatible con el asfalto base. En general, se eligen elastómeros para proporcionar una mayor resiliencia, y flexibilidad al pavimento, mientras que los resultados con los elastómeros generan una mezcla de alta estabilidad y rigidez. Los resultados obtenidos de un proceso de modificación de asfalto dependen altamente de la concentración, peso molecular, composición química y orientación molecular del polímero, así como, de la fuente del crudo, del proceso de refinación y del grado del asfalto que se utiliza.

#### **2.7.4 ¿POR QUÉ SE MODIFICAN LOS ASFALTOS?**

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

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

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

#### **2.7.5 MODIFICACIÓN DEL ASFALTO.**

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

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

#### **2.7.6 ESTRUCTURA DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS.**

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de

fases, estando la fase continua constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella. Esta micromorfología bifásica y las interacciones existentes entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto parecen ser la causa del cambio de propiedades que experimentan los asfaltos modificados con polímeros.

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

### **2.7.7 COMPATIBILIDAD DE LOS POLÍMEROS.**

Para que los asfaltos modificados con polímeros consigan las prestaciones optimas hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base (es necesario que los polímeros sean compatibles con el material asfáltico), el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje. Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de esta el polímero solo actúa como filler (mineral como: cemento, cal, talco, sílice, etc.); y por debajo de esta, pasan a estar muy solubilizados y aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.

Si un polímero se añade a dos diferentes asfaltos, las propiedades físicas de los productos finales, pueden ser muy diferentes. Para mayor efectividad, el polímero debe crear una red continua de trabajo en el asfalto; para que esto ocurra, la química del polímero y del asfalto necesita ser compatible.

Los polímeros compatibles producen rápidamente un asfalto estable, usando técnicas convencionales de preparación. Estos sistemas convencionales de preparación de asfaltos modificados con polímeros son grandes recipientes de mezclado con paletas agitadoras a velocidades lentas, o recipientes especiales

que favorecen la recirculación con agitadores mecánicos de corte de gran velocidad. El polímero puede venir en polvo, en forma de pequeñas bolitas o en grandes panes. La temperatura de mezclado depende del tipo de polímero utilizado.

En la microfotografías mostradas en la siguiente figura se pueden ver polímeros tipo SB 0 SBS en diferentes asfaltos (lo blanco es el polímero y lo negro es asfalto). Las dos primeras presentan una red continua de polímero, teniendo una estructura estable que no se separa, tomando ventaja de las propiedades elásticas del polímero. Las dos siguientes no están en red, separadas durante el almacenaje, y por tanto, no tendrán el mismo incremento benéfico sobre las distintas propiedades.

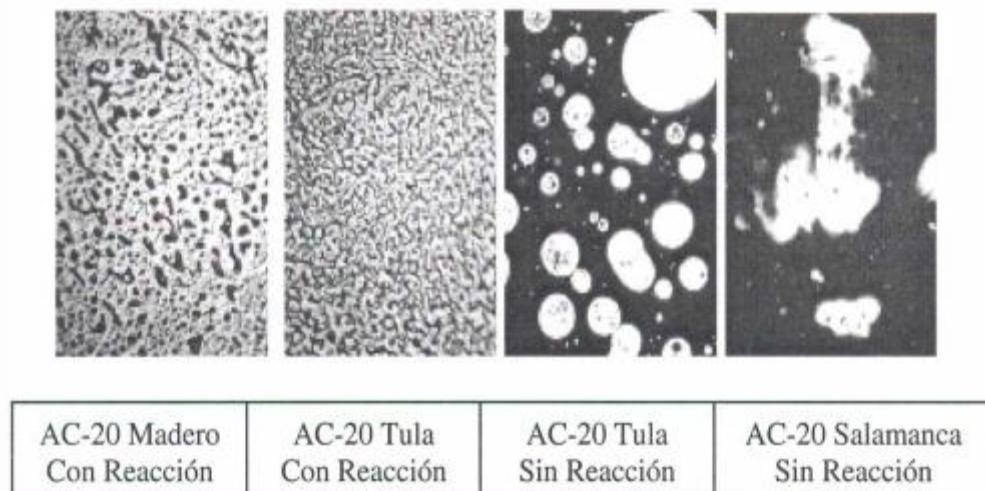


Figura 2.18: Compatibilidad del asfalto con el polímero. Fuente: Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado

Algunos productores de asfalto polimerizado utilizan procesos especiales para lograr compatibilidad entre el polímero y el asfalto. Cuando la tecnología es apropiada, las propiedades del ligante pueden reducir el efecto de las roderas, el desprendimiento de pétreos, el agrietamiento térmico o fluencia de la

mezcla, así como el incremento en la vida útil de pavimento, debido a una mayor estabilidad y resistencia a la fatiga.

### **2.7.8 TECNICAS PARA MODIFICAR ASFALTOS.**

Cuando se añaden polímeros al asfalto, las propiedades del asfalto modificado dependen de los siguientes parámetros:

- Tipo de polímero a emplearse, ya sean elastómeros o plastómeros.
- Su forma física.
- Naturaleza y grado de asfalto.
- Tipo de equipo.
- Tiempo y temperatura durante el mezclado.
- La compatibilidad Asfalto-Polímero.

El proceso apropiado de modificación es variable de acuerdo al tipo de polímero, polímeros del tipo SBS requieren de molienda y otros como el tipo EVA requieren solamente proceso de agitación.

Se mencionan de manera general las etapas importantes del proceso de modificación.

#### **Para tipo I. SBS:**

**Etapas 1:** Evaluar el asfalto base.

**Etapas 2:** Incrementar la temperatura del asfalto.

**Etapas 3:** Proceso de molienda y/o homogeneización asfalto-polímero. Se requiere de un molido de alto corte.

**Etapas 4:** Controlar la calidad a través de microscopía óptica.

**Etapas 5:** Finalización de la reacción. Control de calidad realizando corrida de pruebas físicas para asfaltos modificados después de 24 horas de reacción.

Las temperaturas de mezclado oscilan entre 180° C 190°C y el tiempo de mezclado varía dependiendo de la dispersión del polímero.

**Para tipo II: Látex SBR.**

La operación de modificación se lleva a cabo a una temperatura de 160 – 170° C. La adición del látex se realiza mediante una bomba de diafragma que puede ser adicionad mediante aire o motor eléctrico. El tiempo de agitación depende del equipo empleado. Los tiempos normales para todo el proceso del látex y mezclado oscilan entre 1.5 y 2 horas.

**Para tipo III: EVA.**

En esta no se requiere un molino, solamente es con agitación y temperatura, en un tiempo corto el polímero se funde y se incorpora al asfalto. Por lo regular son 2 horas a 180° C, el control de calidad se observa mediante la prueba visual para polímeros tipo III.

**2.7.9 CAMBIO DE PROPIEDADES EN EL LIGANTE ASFÁLTICO.**

El objetivo perseguido con las adiciones de polímero en el asfalto, es cambiar las propiedades físicas y reo lógicas del ligante, buscando:

- Aumentar la viscosidad, por ejemplo: AC-20 sin polímero = 380 cP. Asfalto con polímero desde 625 hasta 1120 cP. Dependiendo de la cantidad y tipo de polímero.
- Disminuye la penetración.
- Aumentar el punto de reblandecimiento del asfalto, aumenta entre 8 a 12 grados.
- Aumentar el punto de inflamación.
- Disminuye la susceptibilidad a las variaciones de la temperatura.
- Sube entre uno o dos grados la clasificación PG (Penetración grade o Grado de penetración) del asfalto.

- Eleva la recuperación elástica del asfalto hasta arriba del 30%.
- Eleva la resiliencia por encima de 25.
- Amplio rango de temperatura en el manejo y almacenamiento.
- Mayor intervalo de plasticidad.
- Mayor cohesión.
- Mayor resistencia a la acción del agua.
- Mayor resistencia al envejecimiento.

Las propiedades que estos imparten dependen de los siguientes factores:

- Tipo y composición del polímero incorporado.
- Características y estructura coloidal del asfalto base.
- Proporción relativa del asfalto base.

A continuación se muestra una tabla con el panorama general de las mejoras obtenidas al modificar los asfaltos con las diferentes clases de polímeros compatibles, así como la incorporación de llantas de cauchos usadas, y brinda una indicación de sus costos relativos.

Panorama del mejoramiento producido en las propiedades de los ligantes por diferentes clases de polímeros						
Polímero	Resistencia			Adhesión de los agregados	Resistencia al envejecimiento	Incremento de costos
	A la deformación permanente	Al agotamiento				
Termoendurecibles	+++	++	++	+	+	Muy alto
Elastómeros	++	++	++	+	0/+	Medio alto
Plastómeros	1	+	0	0	0	Medio medio
Caucho de llanta usada	0/+	+ / ++	1	0	0	Medio
1 Excelente +++ Muy efectivo ++ Mejora sustancial + Mejora significativa 0 Poca o ninguna mejora						

Tabla 2.6: Mejoras en asfaltos debido a la utilización de polímeros. Fuente: “Ingeniería de pavimentos” Alfonso Montejo Fonseca, 2002.

**2.7.10 APLICACIONES DEL ASFALTO MODIFICADO.**

El asfalto modificado poder ser aplicado de diferentes maneras, dependiendo del uso y necesidades que se requieran cubrir. A continuación se describen algunas de las aplicaciones del asfalto modificado:

- **Cemento Asfáltico:**

Se caracteriza por reducir la deformación permanente, mayor resistencia a la fatiga, uso de capas más delgadas y mejor resistencia a la post-compactación. Se aplica en pavimentos de pistas de aeropuertos donde las exigencias son muy elevadas, también el “Roller Asphalt” donde las reflexión de las fisuras es muy usual (tránsitos muy intensivos, alta carga de tránsito y elevado peso).

- **Mezclas Abiertas:**

Se caracterizan por la menor post-compactación y retención del agua y mejor adhesividad del agregado. Se aplica en pavimentos de drenaje o donde las cargas de transito no sean muy elevadas.

- **Tratamientos superficiales:**

Se caracteriza por su mejor retención del agregado, su mayor rango de uso incluidos caminos con tránsito pesado, su mejor resistencia a la tracción y por su formulación de asfaltos diluidos y emulsiones. Se aplica en asfaltos diluidos modificados para ser usado en tratamientos superficiales o riegos de liga.

- **Membrana absorbidora intercapa de esfuerzos:**

Se caracteriza por la capacidad de absorber movimientos horizontales producidos por grietas de varios milímetros, mantenimiento de las propiedades elásticas en un amplio rango de temperaturas, buena adhesividad a la vieja y nueva capa de asfalto y posibilita utilizar capas asfálticas más delgadas.

#### **2.7.11 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL LIGANTE DE UNA MEZCLA DRENANTE.**

Los ligantes para mezclas drenantes serán cementos asfálticos modificados con polímero. Las diversas normas extranjeras proponen ciertos requisitos que deben cumplir, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Ensayo	Norma AASHTO	Exigencia				
		Chilena	Colombiana		Argentina	
			Tipo I	Tipo II	AM2	AM3
Penetración a 25°C 100 gr, 5 seg., 0,1 mm	T 49	60–80	55–70	55–70	50 – 80	50 – 80
Punto de Ablandamiento, °C	T 53	> 65	> 58	> 58	> 60	> 65
Recuperación Elástica, %	T 301	> 60	> 15	> 40	> 40	> 70
Punto de Flama, °C	T 48	> 235	> 230	> 230	> 230	> 230
Ductilidad 25°C, 5 cm/mín, cm	T 51	> 100	-----	-----	-----	-----

Tabla 2.7: Requisitos del cemento asfáltico modificado. (Fuente: Art. 453-07 Mezcla Drenante, INVIAS, Colombia)

**2.8. MÉTODOS EMPLEADOS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES.**

Debido a las características propias de estas mezclas, la necesidad de desarrollar ensayos que ayuden a comprender de una mejor forma su comportamiento y evaluación es evidente, ya que, debido a la particularidad de su estructura interna supone que la energía de compactación necesaria para lograr la compacidad en obra es menor que en las mezclas convencionales, por lo que es necesario evaluar para qué energía de compactación se alcanza la máxima densidad en la metodología Marshall, no obstante, se debe tener presente que para el caso de las mezclas drenantes las propiedades requeridas nada tienen que ver con su estabilidad, son otras propiedades y características las que importan siempre y cuando se adapten a los fines buscados y tomando en cuenta las solicitudes a las que la mezcla estará sometida.

Algunas de las metodologías normalmente utilizadas son:

- **CÁNTABRO (Origen ESPAÑA).**

El método parte del estudio de la cohesión en la mezcla, la cual se realiza en base a exigencias de estudios a sus agregados y asfaltos disponibles. Se fabrican numerosos especímenes para analizarlos en laboratorio, determinando la pérdida por desgaste de una probeta de mezcla empleando la máquina de Los Ángeles sin la carga de bolas de acero. Se evalúan de antemano las características fundamentales en la mezcla, como son la macrotextura, la cantidad de vacíos y la fricción, parámetros iniciales de diseño.

- **AUSTRALIANA (Open Graded Asphalt Design Guide, originada en la Australian Asphalt Pavement Association).**

Se basa en una “Guía de Diseño” la cual hace la composición de ensayos y determinaciones características, mediante “Cartas de Diseño”. Con esto es posible establecer qué porcentaje de asfalto es el necesario en el diseño de la mezcla de obra, respetando valores de ensayos tales como:

Cántabro Seco, Cántabro Húmedo, Vacíos, Escurrimiento.

Esta guía de diseño sugiere dos rangos de aplicación, denominados como:

- Tipo I, TMDA (Tránsito Medio Diario Anual) < 500 ( $N < 5 \times 10$ )
- Tipo II, TMDA (Tránsito Medio Diario Anual) > 500 ( $N > 5 \times 10$ )

El Tipo I, provee una modesta performance, el Tipo II está destinado a la más alta performance, con elevado contenido de asfalto así como el uso de asfalto modificado. La Guía de Diseño consta de: Selección del TMN; Selección de la granulometría y del asfalto de prueba. Previamente a la determinación del contenido de asfalto de la mezcla, debe determinarse la absorción de asfalto por parte del agregado pétreo. La metodología se refiere únicamente al asfalto efectivo. Existe un mínimo contenido de asfalto referido al TMN y vinculado al

recubrimiento, con una película que asegure cohesión y durabilidad. El máximo se relaciona a la posibilidad de escurrimiento de asfalto durante el transporte.

- **RP (Origen CHILE).**

Esta metodología fue desarrollada en Chile, en el Laboratorio Nacional de Vialidad, MOP, por los Ing. Héctor Rioja V. y Gabriel Palma P. La metodología consiste en la medición del esfuerzo a la penetración, a temperatura y velocidad controlada, que presentan probetas de mezcla asfáltica abierta, fabricadas de acuerdo con la metodología Marshall. Utilizando en este caso 45 golpes por cara y distintos contenidos de asfalto, considerando que la mezcla óptima es aquella que presenta el valor máximo de esfuerzo a la penetración

- **TRACCIÓN INDIRECTA (Origen BRASIL).**

Esta es una metodología sencilla que se basa en obtener un esfuerzo de tracción por compresión diametral. El conocimiento de los valores de tracción indirecta en laboratorio representa una herramienta más al conocimiento, puesto que el único control que se le realiza a una capa terminada es la determinación de su densidad y se compara con la obtenida en la compactación Marshall.

En esta investigación, la metodología cántabro será la que se utilizara para su desarrollo.

## **2.9. METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS MEDIANTE EL EMPLEO DEL ENSAYO CÁNTABRO.**

En el año 1979, en el Laboratorio de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Santander, los ingenieros Félix Pérez Jiménez y Carlos Kraemer iniciaron los estudios encaminados a la caracterización de las mezclas asfálticas de granulometría

abierta para su empleo en capas de rodadura, especialmente para establecer una metodología de dosificación en laboratorio para mezclas drenantes.

En un inicio, no se contaba con procedimientos que indicaran cada uno de los pasos a seguir en el diseño y evaluación de estas mezclas en laboratorio, lo que significó uno de los tantos problemas al que había de dar solución, otros problemas, fueron la falta de métodos de ensayos que propiciaran información del comportamiento mecánico de la mezcla. Era evidente la marcada diferencia de los materiales empleados en la hechura de estas mezclas para la construcción de carreteras, en comparación con las mezclas tradicionales o densas, por ejemplo: normalmente, la propiedad más perseguida en mezclas tradicionales (densas) es su estabilidad y los ensayos han sido desarrollados con el fin de evaluar particularmente esta propiedad. Paralelamente es lo que ocurre con la mayoría de los métodos de dosificación y proyecto de mezclas, basados en la obtención de la estabilidad máxima.

Finalmente se llegaron a desarrollar dos ensayos para la caracterización de las mezclas drenantes:

1. Ensayo cántabro, para medir la pérdida por desgaste utilizando la máquina Los Ángeles.
2. Permeámetro de carga variable LCS, para poder verificar los porcentajes de vacíos de la mezcla, ya sea en Laboratorio o en campo. La realización del ensayo cántabro puede realizarse tanto en estado seco como en húmedo, simulando en laboratorio la acción abrasiva del tránsito y la influencia del agua, lo que facilita el estudio y dosificación de estas mezclas.

Se supone entonces que se obtienen menores pérdidas con la realización del ensayo, cuando se tienen una mayor calidad y un porcentaje acorde de los componentes que proporcionan la cohesión a la mezcla.

### **2.9.1. METODOLOGÍA.**

En esta metodología Cántabro se contemplan los pasos siguientes: Elección de la curva granulométrica: Esto dependerá de la norma del país o región en base a la cual se esté trabajando; en el caso de no poseerse normativa propia alguna, tal y como sucede en nuestro país, que, carecemos de valores propios de porcentajes requeridos en cada una de las mallas para este tipo de mezclas.

Elección de los porcentajes de asfalto para el diseño: Serán esos porcentajes a ser adicionados a los agregados para la fabricación de la mezcla, con los cuales serán elaboradas las probetas de ensayo; y con las que realizara el análisis del comportamiento de la mezcla.

Se realizan los ensayos especificados (cántabro seco y cántabro húmedo) con el fin de determinar para qué porcentaje de asfalto adicionado a la mezcla se cumple con las exigencias establecidas, realizándose, de ser necesario, las correcciones en el diseño que garanticen el cumplimiento de dichas especificaciones.

Para la determinación de la densidad aparente de cada probeta, el volumen se obtiene de forma geométrica.

### **2.9.2. PROPÓSITO DE LA METODOLOGÍA.**

El propósito del método Cántabro es determinar el contenido óptimo de asfalto para la combinación seleccionada de agregados, se basa fundamentalmente en la realización del ensayo Cántabro tanto en estado seco como húmedo y, se apoya en los resultados de ensayos complementarios con el fin de asegurar las características que se buscan en la mezcla drenante.

### **2.9.3. DESCRIPCIÓN GENERAL.**

El ensayo consiste en fabricar con la mezcla que se ha diseñado y objeto de estudio, una probeta tipo Marshall e introducirla en la máquina de ensayo de

Los Ángeles (sin bolas) a una temperatura dada, después de un número determinado de vueltas se saca la probeta, que durante el ensayo ha ido perdiendo masa debido al desgaste de los áridos situados en la superficie, esta masa es registrada. Como resultado del ensayo se obtiene el valor de la pérdida por desgaste expresada en tanto por ciento del peso inicial.

Los dos estados en que puede realizarse el ensayo son:

#### **2.9.3.1 CÁNTABRO SECO.**

La norma NLT-352/86 contiene la descripción del procedimiento que debe seguirse, empleando la máquina de Los Ángeles. El procedimiento descrito puede ser empleado tanto en el proyecto de mezclas realizadas en laboratorio como para el control que sea llevado en obra. El campo de aplicación hace referencia a las mezclas asfálticas fabricadas en caliente y de granulometría abierta, cuyo tamaño es inferior a 25 mm. El ensayo es realizado a una temperatura de 25 °C, lo cual permite valorar indirectamente la cohesión y trabazón, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tránsito.

#### **2.9.3.2 CÁNTABRO HÚMEDO.**

La norma NLT-362/92 contiene la descripción del procedimiento que debe seguirse, empleando la máquina de Los Ángeles. La realización del ensayo en estado húmedo permite establecer una valoración de la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua en la mezcla y el efecto producido por el empleo de asfaltos modificados en la mejora de esa propiedad.

Si al realizarse el cántabro húmedo de mezclas se obtiene pérdidas altas o un índice de aumento de las pérdidas respecto al ensayo de Cántabro Seco también alto, estaríamos ante un indicativo de una falta de resistencia de la mezcla a la acción del agua. Aspecto no deseable en la mezclas drenantes.

#### **2.9.4. ESPECIFICACIONES DE LA METODOLOGÍA.**

Las recomendaciones más usuales para mezclas drenantes para capas de rodadura establecen los siguientes valores máximos y mínimos de exigencias:

- % Huecos > 20 %
- Pérdida al Cántabro seco (25 °C) < 25 %
- Pérdida al Cántabro tras Inmersión (24 hrs. 60 °C) < 35 %
- Los porcentajes de asfalto con respecto al peso total de la mezcla oscilarán entre 3% y 5%, puesto se espera el contenido óptimo se encuentre en dicho rango.

En los países que poseen normativa referente a mezclas drenantes los rangos granulométricos varían, sin embargo suele conservarse el TMN de ½”.

En posteriores capítulos se analizarán con más detalle los parámetros que se utilizarán para el diseño de la mezcla, los cuales han sido seleccionados de normativas extranjeras debido a la falta de documentación respecto a este tema; normativas como la colombiana, del Instituto Nacional de Vías (conocidas como INVIAS), la cual servirá de base al estudio; las normas ASTM y ASSHTO para el testeado de los componentes de la mezcla y evaluación de las características propias de esta, que puedan ser evaluadas mediante estas últimas dos normativas, como es el caso de los vacíos presentes en la mezcla, por ejemplo.

#### **2.9.5. EVALUACIÓN Y AJUSTES DE UNA MEZCLA DE DISEÑO.**

El diseño de la mezcla drenante según la normativa INVIAS establece que, el contenido óptimo de asfalto en la mezcla deberá ser elegido de forma tal que sean cumplidos los siguientes criterios:

- % vacíos (Norma AASHTO T 269 – 97 (2003)): 20% < % vacíos < 25%

- Permeabilidad: 100 ml atraviesan una probeta en un tiempo no mayor a 15 segundos.
- Pérdida al Cántabro seco (25 °C) (Norma NLT 352/86): < 25 %
- Pérdida al Cántabro tras Inmersión (24 hrs, 60 °C) (Norma NLT 352/86): < 40 %

## 2.10. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA FÓRMULA DE TRABAJO DE LA MEZCLA DRENANTE.

La normativa con la cual será analizada la mezcla drenante para la presente investigación, será la proporcionada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de Colombia que a su vez está basada en la norma española.

La gradación de los agregados será la siguiente:

Tamiz ASTM	Tamiz (mm)	MD-1*	
		ESP. INF	ESP. SUP
3/4"	19	100	100
1/2"	12,5	70	100
3/8"	9,5	50	75
N° 4	4,75	15	32
N° 10	2	9	20
N° 30	0,63	5	12
N° 200	0,075	3	7

Tabla 2.8: Franja granulométrica para mezcla drenante, Artículo 453-07, normativa INVIAS (\*Mezcla Drenante)

### Realización del ensayo Cántabro:

Con la composición granulométrica obtenida en laboratorio basada en la especificación de la tabla 2.8, se preparan un mínimo de cuatro briquetas para cada contenido de asfalto a ser ensayado (en este caso se preparan seis briquetas por cada contenido de asfalto).

Las distintas fracciones de áridos que componen la mezcla se secan en horno hasta obtener masa constante a una temperatura de 105 a 110°C.

El asfalto a ser utilizado debe ser calentado hasta una temperatura tal que su viscosidad permita una buena envoltura de los agregados sin que se produzca escurrimiento.

Se preparan las distintas fracciones de agregados que conformaran la mezcla, la cantidad total de agregados para cada probeta a fabricar será de 1000 g, el resto del proceso sigue el mismo que para el procedimiento Marshall.

En la compactación de la mezcla se utiliza el equipo y procedimiento de compactación Marshall, sin embargo se tiene una diferencia en la energía de compactación, puesto que será de 50 golpes por cara.

Una vez desmoldadas las probetas, se determinan su densidad y contenido de vacíos a partir de la medida geométrica de su volumen y densidad relativa de los materiales.

En el Cántabro seco, una a una las probetas se introducen en el tambor de la máquina de Los Ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hace girar el tambor a una velocidad normalizada de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 33 rpm), durante 300 vueltas, la temperatura de ensayo estará comprendida entre 15 y 30°C, con una tolerancia máxima de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Se calcula el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada briqueta ensayada.

En el cántabro húmedo las probetas deberán introducirse en un baño maría por 24 horas a una temperatura de  $\pm 60^\circ\text{C}$ , luego se dejan secar durante 24 horas a una temperatura de 25°C y finalmente se les practica el mismo proceso que en el Cántabro seco a fin de conocer el valor de pérdida por desgaste de cada una de las briquetas.

- El ensayo Cántabro debe realizarse tanto en estado seco como en húmedo.
- Se recomienda realizar prueba de permeabilidad con el fin de asegurar que los vacíos con aire están debidamente interconectados.
- El contenido de asfalto en la briqueta que cumpla con las especificaciones con que se esté trabajando será el seleccionado como el contenido óptimo de asfalto para la granulometría seleccionada.

### **CAPÍTULO III**

#### **CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS Y ASFALTO PARA LAS MEZCLAS DRENANTES**

##### **3.1 INTRODUCCIÓN.**

Como en las mezclas tradicionales, en el diseño de las mezclas asfálticas drenantes, intervienen dos materiales indispensables para la elaboración de las mismas, el asfalto y los agregados, sin embargo las características que presentaran los mismos son muy diferentes, ya que tenemos que considerar el alto porcentaje de vacíos.

En este capítulo se podrá observar las características de los materiales que se utilizaran en el diseño de la mezcla drenante, cuya selección está basada de acuerdo a las especificaciones recomendadas por el Instituto Nacional de Vías de Comunicación de Colombia “INVIAS”, ya que nuestro país no cuenta con un estudio amplio en este tipo de mezclas asfálticas.

Los materiales que serán utilizados en esta investigación son los que se encuentran a disposición en nuestro departamento; el agregado pétreo fue adquirido del banco de materiales de Santa Ana y el asfalto fue adquirido a través de la empresa “Asociación Accidental Vial Copacabana”.

Además se presentaran los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados en con los agregados y asfalto basados en las normas ASTM y AASHTO, donde también se mostrara una breve descripción de los ensayos para facilitar al lector la comprensión de lo que se presenta.

##### **3.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS AGREGADOS DE MEZCLAS DRENANTES.**

En la normativa Colombiana “INVIAS”, en el apartado de mezclas drenantes, se muestra específicamente los características que deben cumplir los agregados a utilizar en la elaboración de la mezcla, de acuerdo a estudios realizados y a la

experiencia de este país en la utilización de este tipo de mezclas asfálticas, dichas características se mostraran a continuación.

Los agregados pétreos a emplear deben ser naturales o artificiales, y deben provenir de rocas sanas y no deben ser susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que puedan darse en la zona de empleo. Tampoco deben dar origen, con el agua, a disoluciones que causen daños a estructuras u otras capas del paquete estructural o contaminar corrientes de agua.

### 3.2.1 AGREGADO GRUESO.

Se define como agregado grueso al agregado que es retenido por el tamiz N°4 según las ASTM E-11.

En la siguiente tabla se presentaran los requisitos que este agregado debe cumplir para ser usado en mezclas drenantes, según las normas publicadas en Argentina, Chile y Colombia.

Ensayo	Norma	Exigencia		
		Chilena	Colombiana	Argentina
<b>Partículas Trituradas en dos caras</b>	ASTM D-5821	> 98%	> 70%	> 75%
<b>Índice de lajas.</b>	AASHTO C-142	< 25%	-----	< 25%
<b>Coefficiente de Desgaste de los Ángeles</b>	ASTM C-131	< 20%	< 25%	< 25%
<b>Índice de Plasticidad</b>	ASTM D-4318	N.P	N.P	N.P

Tabla 3.1: Requisitos del Agregado Grueso. Fuente: Art. 453-07 Mezcla Drenante del Instituto nacional de Vías de Colombia (Mezcla Drenante)

### **3.2.2 AGREGADO FINO.**

El agregado fino es aquel que pasa por la malla N° 4 y queda retenido en la malla N° 200 según la norma ASTM E-11. El agregado fino puede proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena, sin embargo se establece la siguiente condición:

La proporción de arena natural no puede exceder del 15% de la masa total del agregado combinado, cuando el tránsito sea  $5.0 \times 10^6$  ejes equivalentes a 80 kN en el carril de diseño, ni exceder de 25% para tránsitos de menor intensidad. En todo caso la proporción de agregado fino no triturado no puede exceder la del agregado fino triturado empleado en la mezcla.

### **3.2.3 RELLENO MINERAL (FILLER).**

Se denomina como filler aquella fracción que pasa por la malla N° 200 según la norma ASTM E-11. Debe proceder de los agregados pétreos o de productos comerciales como cemento hidráulico y cal hidratada. Debe estar libre de partículas de arcilla y de materia orgánica.

El filler total deberá estar formado por un mínimo de 50% de aportación y el porcentaje restante proveniente de los agregados grueso y fino.

Si se utilizan los materiales comerciales como filler de aporte en este tipo de mezclas, se recomienda no superar el valor de la misma al 3% del peso total de los agregados pétreos.

El conjunto de agregado grueso, agregado fino y filler deberá ajustarse a la gradación indicada en la siguiente tabla:

Tamiz ASTM	Tamiz (mm)	MD-1*	
		ESP. INF	ESP. SUP
3/4"	19	100	100
1/2"	12,5	70	100
3/8"	9,5	50	75
N° 4	4,75	15	32
N° 10	2	9	20
N° 30	0,63	5	12
N° 200	0,075	3	7

Tabla 3.2: Franja granulométrica para mezcla drenante, Artículo 453-07, normativa INVIAS (Mezcla Drenante)

Lo que se busca es que la curva granulométrica encaje en estos límites, de manera que se pueda obtener un alto contenido de vacíos, además, para prevenir segregaciones y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos por la especificación; el material a ser producido deberá dar lugar a una curva granulométrica sensiblemente paralela a los límites de la franja, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del tamiz adyacente y viceversa.

### 3.3 ENSAYOS REALIZADOS EN LOS AGREGADOS.

Al ser una mezcla drenante, por norma, el tamaño máximo de agregado a ser utilizado será de  $\frac{3}{4}$ ".

Los ensayos que serán utilizados en el diseño de la mezcla son los siguientes:

- Granulometría.
- Contenido de humedad.
- Peso específico de los agregados.
- Caras fracturadas.
- Equivalente de arena
- Desgaste de los Ángeles.

### **3.3.1 ENSAYO DE GRANULOMETRIA.**

Se realizó la granulometría de los agregados, los cuales fueron provistos por el banco de Santa Ana, ya que estos son los más utilizados en el departamento.

- Se utilizó un juego de tamices estandarizados por la norma ASTM E - 11/95.
- Se realizó un total de 9 ensayos de granulometrías (3 para la grava  $\frac{3}{4}$ " , 3 para la grava  $\frac{3}{8}$ " y 3 para el agregado fino) para poder tener una granulometría representativa.
- Los resultados de la misma se encuentra en el Anexo 1.

### **3.3.2 CONTENIDO DE HÚMEDAD EN ESTADO NATURAL PARA LA GRAVA Y AGREGADO FINO.**

Es la cantidad de agua que se encuentra dentro de una muestra de suelo y se expresa en porcentaje. La muestra que se tomó para realizar el ensayo fue una muestra representativa.

- Se pesaron 5 bandejas con los agregados (2 con grava  $\frac{3}{4}$ " , 2 con grava  $\frac{3}{8}$ " y 1 con agregado fino).
- Se colocaron las muestras en un horno de secado a una temperatura de 120°C durante un periodo de 24 horas.
- Finalmente se sacaron las bandejas del horno y se pesaron nuevamente, el procedimiento y resultados se muestran en el Anexo 2.

### **3.3.3 PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS.**

El peso específico de los sólidos de un suelo se determina en laboratorio haciendo uso de un frasco con marca de enrase.

Los resultados del ensayo en laboratorio se muestran en el Anexo 3.

### **3.3.4 CARAS FRACTURADAS**

Algunas especificaciones contienen los requisitos relativos al porcentaje de partículas fracturadas en los agregados gruesos. Uno de los propósitos de tales

requisitos es maximizar la resistencia al corte al aumentar la fricción entre las partículas en cualquier mezcla de agregado dependiente o independiente. Otro propósito es proporcionar una estabilidad de los agregados en tratamiento de superficies y para proporcionar una mayor fricción y textura de los agregados utilizados en la superficie del pavimento. Especificaciones difieren en cuanto al número de caras fracturadas requerida sobre una partícula fracturada, y también difieren en cuanto a si el porcentaje de la masa o el porcentaje por el número de partículas que se utilizara. Si la especificación ni específica, utiliza el criterio de al menos una cara fracturada y calcular el porcentaje en masa.

Se considera una partícula fracturada a una partícula cuando un 25% o más del área de la superficie aparecen fracturada, y estas fracturas deben ser únicamente producidas mediante procesos mecánicos.

Los resultados de este ensayo se muestran en el Anexo 4.

### **3.3.5 RESISTENCIA AL DESGASTE DEL AGREGADO GRUESO EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.**

El ensayo de desgaste mediante la máquina de los Ángeles es una medida de desgaste de los agregados mineras de graduaciones estándar resultado de una combinación de acciones que incluye la abrasión o el desgaste, impacto y desintegración en un tambor de acero rotatorio que contiene un numero especificado de esferas de acero el cual depende de la graduación de la muestra de ensayo. Después del número prescripto de revoluciones, los contenidos son removidos y tomados como porcentaje de perdida.

Las muestras utilizadas para realizar este ensayo se determinaron en base a la granulometría y corresponden al “tipo B” para la grava y “tipo D” para el agregado fino; obteniendo los siguientes datos para el procedimiento del ensayo:

- Grava que pasa el tamiz  $\frac{3}{4}$ " y es retenida por el tamiz  $\frac{1}{2}$ " = 2500 gr. "B".
- Grava que pasa el tamiz  $\frac{1}{2}$ " y es retenida por el tamiz  $\frac{3}{8}$ " = 2500 gr. "B".
- Arena triturada que pasa el tamiz No. 4 y es retenida por el tamiz No. 8. = 2500 gr. "D".

Los resultados se muestran en el Anexo 5.

### 3.3.6 EQUIVALENTE DE ARENA.

En este ensayo se pretende producir como resultado un valor empírico de la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso presente en la muestra de suelo o agregado fino.

Se puede especificar un valor mínimo del equivalente de arena, para limitar la cantidad admisible de finos arcillosos en un agregado.

Este método de ensayo permite determinar rápidamente, en el campo, variaciones de calidad de los agregados durante la producción o la colocación.

Los resultados se muestran en el Anexo 6.

### 3.3.7 TABLA RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS A UTILIZARZE.

ENSAYO	NORMA	EXIGENCIA	RESULTADOS DE LABORATORIO
Resistencia al desgaste de los Ángeles. Grava pasa $\frac{3}{4}$ " y ret. $\frac{1}{2}$ ". Grava que pasa $\frac{1}{2}$ " y ret. $\frac{3}{8}$ ". Arena triturada.	ASTM C-131	25% Max.	
			21,65%
			22,56%
Caras fracturadas	ASTM D-5821-01	70% Min.	77,26%
Equivalente de Arena	ASTM D-2419-98	50% Min.	51,88%

Tabla 3.3: Características de los Agregados a ser utilizados. Elaboración propia.

### 3.4 ESPECIFICACIONES PARA EL ASFALTO DE MEZCLAS DRENANTES.

Las disposiciones exigidas para el asfalto a ser utilizado es las mezclas asfálticas drenantes por la normativa INVIAS, establecen el uso de asfaltos modificados con polímero.

El asfalto que será utilizado en el presente trabajo fue provisto por la empresa “Asociación Accidental Vial Copacabana” y se trata del asfalto BETUFLEX 60/85-y.

El BETUFLEX 60/85-y es un cemento asfáltico modificado con polímeros elastoméricos SBS y otros aditivos que, bajo condiciones especiales, proceso características de rendimiento, tales como: sensibilidad reducida palabra (alto punto de reblandecimiento), resistencia térmica y mecánica estrés repetido (elasticidad) y resistencia al envejecimiento.

#### **USOS:**

BETUFLEX 60/85-y ofrece un rendimiento superior y durabilidad en la pavimentación de los servicios, reduciendo los costes de mantenimiento y niveles de accidente carretera, siendo una solución eficaz en términos de costo/beneficio en asfálticos servicios, tales como:

- Concreto y bituminosa caliente mecanizadas microconcreto (CBUQ y MCBUQ), a las condiciones climáticas severas y tráfico en las carreteras y vías urbanas;
- Asfalto revestimientos discontinuos (capa porosa de la fricción – CPA, Stone Matrix Asphalt-SMA y Rugoflex): 60/85-BETUFLEX y aumenta la seguridad y durabilidad de la capa, reducir los problemas en días de lluvia (Aquaplaning/agua aerosol).
- Tratamientos superficiales y subrayar las membranas absorbentes (SAM y SAMI): 60/85-BETUFLEX y aumenta las fuerzas de adhesión y cohesión

del par agregado/Binder, reducir el tráfico y clima efectos sobre la capa de asfalto.

**APLICACIÓN:**

BETUFLEX 60/85-y puede ser dañado por calentamiento a temperaturas elevadas (por encima de 190oC), requerimientos sucesivos o prolongados. Normalmente se entrega en el mecanizado de rango de temperatura (160-175oC) y debe ser descargado en los tanques de lastre de asfalto convencional. Se recomienda durante el almacenamiento por un período superior a 5 días, acción del producto a una temperatura más calientes que generalmente (100-120oC), siendo la máxima recomendada para períodos cortos tienda de 165oC. Almacenar a temperatura ambiente si el producto debe almacenarse durante largos períodos (20 días o más).La temperatura a lo largo del tanque debe ser uniforme y la distribución de calor se producirá de forma homogénea mediante el uso de una bomba de recirculación. El calor nunca debe aplicarse directamente y en tanques equipados con fluido térmico serpentina. A continuación se presentara una tabla con las especificaciones del fabricante.

ENSAYO	METODO	UNIDAD	ESPECIFICACION*
Penetración (100g. 5s. 25°C)	NBR 6576	0,1 mm	40 – 70
Punto de Ablandamiento	NBR 6560	°C	60 min.
Viscosidad a 135° C, SP 21, 20 rpm	NBR 15184	cP	3000 máx.
Viscosidad a 150° C, SP, 2000 21 50 rpm			2000 máx.
Viscosidad a 177° C, SP 21, 1000 rpm			1000 máx.
Punto de inflamación	NBR 11341	°C	235 min.
Separación de la fase de prueba	NBR 15166	°C	5 máx.
Recuperación elástica, 25°C, 20 cm	NBR 15086	%	85 min.
<b>EFEECTO DE CALOR Y AIRE-RTFOT</b>			
RTFOT, masa variación	NBR 15235	%	1,0 máx.
RTFOT, variación de punto de ablandamiento	NBR 6560	°C	(-)5 hasta 7
RTFOT, % de penetración original	NBR 6576	%	60 min.
RTFOT, % recuperación elástica original a 25°C	NBR 15086	%	80 min.

Tabla 3.4: Ficha técnica del asfalto utilizado, BETUFLEX 60/85.

### 3.5 ENSAYOS DEL ASFALTO.

Los ensayos que le fueron realizados al asfalto a ser utilizado en el diseño de la mezcla son los siguientes:

- Punto de llama por la copa abierta de Cleveland.
- Penetración de materiales bituminosos.
- Viscosidad cinemática.
- Peso específico.
- Punto de ablandamiento.

### **3.5.1 PUNTO DE LLAMA POR LA COPA ABIERTA DE CLEVELAND.**

Para la realización de este ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

- Se preparó el equipo, colocándolo sobre un mesón firme y a nivel. Se cerraron momentáneamente las ventanas y se apagó el ventilador para eliminar corrientes de aire.
- Se lavó la copa de ensayo con gasolina para remover cualquier aceite o residuo de asfalto de un ensayo anterior.
- Se colocó el termómetro en posición vertical, cuidando de que el extremo inferior esté a 6.4 mm (1/4") del fondo de la copa y localizado en un punto medio entre el centro y la pared de la misma.
- Se llenó la copa con el cemento asfáltico, cuidando que la temperatura no excediera de 100 °C, precisamente a la temperatura necesaria para que el asfalto pueda verterse hasta el punto en el que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado.
- La copa se llenó lejos del resto del equipo, que ya se encontraba previamente montado.
- Se colocó la copa en posición, cuidando el espacio entre el extremo inferior del termómetro y el fondo de la copa.
- Se encendió la llama del mechero, aplicando calor inicialmente de manera que la rata de incremento de temperatura de la muestra sea de 14 a 17°C por minuto, cuando la temperatura se aproximó a los 160°C se disminuyó el calor de manera que el incremento se redujo a un rango constante entre 5 a 6°C por minuto hasta que se alcanzó el punto de inflamación.

- Cuando la temperatura se aproximó a los 210°C, se aplicó la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C, en un tiempo de barrido a través de la copa de aproximadamente 1 segundo.
- Cuando la temperatura se aproximó a los 230°C, se tuvo la precaución de no aproximarse bruscamente, o respirar cerca de la copa puesto que cualquier movimiento de aire, dispersa los gases que se acumulan en la parte superior.
- Se registró como punto de inflamación, la lectura de temperatura del termómetro cuando apareció una llama sobre la superficie de la copa producto de la combustión de los gases emitidos por el calentamiento del asfalto.
- Los resultados se muestran en el Anexo 7.

### **3.5.2 PENETRACIÓN DE MATERIALES BITUMINOSOS.**

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

- La muestra es derretida y enfriada en baño maría aproximadamente 45 min, ya que es asfalto modificado, bajo condiciones controladas a una temperatura de 25 °C. La penetración es medida con un penetrómetro por medio del cual una aguja estándar es aplicada a la muestra bajo condiciones específicas, generalmente se realiza a 25 C, con una carga de 100 g, y un tiempo de penetración de 5 segundos.
- Se verificó que el penetrómetro se encuentre en cero, y se soltó la aguja, iniciando en el mismo instante el cronometro para medir un tiempo de 5 segundos.
- Finalmente, se leyó y anotó la distancia expresada en decimas de milímetro.
- Los resultados se muestran en el Anexo 8.

### 3.5.3 VISCOSIDAD CINEMÁTICA SAYBOLT FUROL.

Para la realización del ensayo de viscosidad se realizó el siguiente procedimiento:

- Se obtuvo un valor estable de temperatura para el baño, de 140°C.
- Paralelamente, se calentó el cemento asfáltico, sobre una plancha eléctrica, y no con llama directa, para preservarlo de la oxidación o envejecimiento prematuro, a una temperatura entre 80 y 100 °C, de manera que un vez colocado el asfalto en el viscosímetro se caliente rápidamente y no demore mucho tiempo en alcanzar la temperatura de ensayo (135 °C). El calentado previo no debe exceder los 1.7 °C (3 °F) por encima de la temperatura de ensayo.
- Se agitó la muestra y posteriormente filtró con un tamiz #100, para cuidar el viscosímetro de cualquier obstrucción posible a causa de impurezas en el asfalto.
- Se insertó un tapón de corcho en el agujero inferior del viscosímetro, con la finalidad mantener el asfalto dentro hasta que alcance la temperatura adecuada.
- Se vertió el cemento asfáltico dentro del viscosímetro, hasta que el nivel quede por encima del borde de reboce, es decir, que rebalse un poco de asfalto por encima del vaso que lo contiene.
- Se agitó la muestra dentro del viscosímetro con el termómetro de viscosidad, empleando un movimiento circular y cuidando de no votar el asfalto fuera del vaso. Cuando la temperatura de la mezcla permaneció constante a la temperatura del ensayo ( $\pm 0.05$  °C) durante un minuto de agitación continua se retiró el termómetro.

- Se verificó que el matraz se encontraba en la posición adecuada; se retiró el corcho de la parte inferior del viscosímetro y en el mismo instante se puso a funcionar el cronómetro. Se detuvo en el instante en que el fondo del menisco del cemento alcanzó la marca de graduación de 60 ml. Del frasco receptor.
- Se anotó el tiempo del flujo en segundos.
- Los resultados se muestran en el Anexo 9.

#### **3.5.4 PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO**

- Lograr que la muestra este a temperatura de ablandamiento.
- Llenar el picnómetro con agua a 25°C hasta la marca señalada registrar y verter el agua.
- Añadir el C.A. dentro del picnómetro, las  $\frac{3}{4}$  partes del volumen total del picnómetro, a una altura moderada y flujo constante (evitar burbujas de aire), registrar.
- Dejar reposar la muestra por 1h. aprox. Hasta temperatura ambiente, luego someter a un baño maría a 25 °C por  $\frac{1}{2}$  h. aprox.
- Luego del tiempo señalado, añadir agua a 25°C hasta completar el volumen deseado dentro del picnómetro, registrar y calcular.
- Los resultados se muestran en el Anexo 10.

#### **3.5.5 PUNTO DE ABLANDAMIENTO.**

El punto de ablandamiento se define como la temperatura que necesita el asfalto para alcanzar un determinado estado de fluidez. Este ensayo está basado en la norma AASHTO T 53-96 (2000) con norma equivalente en la norma ASTM D 36-95 o INV 712. Este método de ensayo cubre la determinación del punto de ablandamiento del asfalto en un rango de 30 a 157 °C (86 a 315 °F) utilizando el método del anillo y la esfera sumergidos en agua destilada (30 a 80 °C).

Dos discos horizontales de asfalto, vertidos en anillos de bronce, son calentados a una tasa de temperatura controlada en un baño líquido mientras cada disco soporta una esfera de acero con diámetros de 9.5 mm (3/8 pulg), teniendo una masa de  $3.50 \pm 0.05$  g cada una. El punto de ablandamiento es reportado como la temperatura media a la cual los dos discos se ablandan suficientemente hasta dejar caer cada esfera, envueltas en asfalto, hasta descender a una distancia de 25 mm (1.0 pulg).

Los resultados se muestran en el Anexo 11.

**3.5.6 TABLA RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO A UTILIZARCE.**

ENSAYO	NORMA	ESPECIFICACION	RESULTADO EN LAB.
Punto de llama en la copa abierta de Cleveland	ASTM D 92-02	235°C min.	298 °C
Ensayo de Penetración de materiales Bituminosos	ASTM D 5-97	40 - 70	55,6
Punto de Ablandamiento	ASTM D 36-95	60 °C min.	64,5
Viscosidad Cinemática de Asfaltos	ASTM D-2170	3000 Cp máx.	477,2

*Tabla 3.5: Resultados de la caracterización del asfalto a ser utilizado. Elaboración propia.*

## **CAPÍTULO IV**

### **DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN.**

Lo anteriormente visto en este proyecto ha sido el estudio de los conceptos sobre las mezclas drenante y se pudo definir los materiales a utilizar para la elaboración de la mezcla en base a sus características y desempeño presentado.

Este capítulo comprende el diseño de mezcla realizado en laboratorio, la selección de la dosificación, y evaluación de los criterios de diseño establecidos en la norma INVIAS que son las que han servido a los propósitos de esta investigación, se presentan resúmenes de los ensayos realizados a la mezcla para la evaluación de su desempeño, ensayos basados en las normas AASHTO y ASTM en aquellos casos donde ha sido como cántabro se ha tomado el procedimiento que establece las INVIAS por no haber equivalencias del ensayo en las otras normativas.

Finalmente se realiza el análisis de los resultados de laboratorio para establecer el contenido óptimo de asfalto en la mezcla.

#### **4.2 DOSIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS.**

La elaboración de una mezcla drenante implica el empleo de una composición granulométrica muy diferente a la de las mezclas tradicionales, como se ha visto en el desarrollo de esta investigación. En éstas el contenido de arena suele ser muy elevado, generalmente comprendido entre un 33% y un 60%, y por ello, la resistencia de la mezcla, está basada principalmente en la cohesión proporcionada por el asfalto utilizado.

El rozamiento interno de la mezcla únicamente, se moviliza frente a altas sollicitaciones, mantenidas en el tiempo.

En las mezclas drenantes para poder obtener un contenido en vacíos elevado, es necesario modificar la proporción agregado grueso/agregado fino de tal forma que, en general el contenido de arena suele ser inferior al 20%. Debido a ello, la capacidad de resistencia de la mezcla no puede basarse en la cohesión, puesto que falta mortero, sino en el razonamiento interno.

Esta falta de cohesión hace que la mezcla sea bastante crítica ante ciertos esfuerzos del tráfico, especialmente los de tipo tangencial, que provocan fenómenos de disgregación.

Para poder conjugar una buena porosidad con una buena resistencia a la disgregación, es necesario realizar un diseño cuidadoso de la mezcla, eligiendo con detalle los distintos componentes, sus proporciones, y utilizando los distintos ensayos puestos a punto.

En capítulos anteriores se abordaron las recomendaciones hechas por la normativa colombiana (INVIAS) respecto a los agregados a utilizar en mezclas drenantes, de donde se retomara la tabla 2.10 donde se observan los límites de la especificación granulométrica de dicha normativa a estas mezclas.

Tamiz ASTM	Tamiz (mm)	MD-1*	
		ESP. INF	ESP. SUP
¾"	19	100	100
½"	12,5	70	100
3/8"	9,5	50	75
N° 4	4,75	15	32
N° 10	2	9	20
N° 30	0,63	5	12
N° 200	0,075	3	7

Tabla 4.1: Franja granulométrica para mezcla drenante. Fuente: Artículo 453-07, normativa INVIAS (Mezcla Drenante)

El objeto de la dosificación de agregados es ajustar la mezcla de manera que su gradación se ajuste a estas recomendaciones; para el diseño se han empleado

tres fracciones diferentes de agregados, se ha utilizado grava con tamaño máximo de  $\frac{3}{4}$ , arena y como sugiere la normativa INVIAS, se ha adicionado filler con el propósito de mejorar la adherencia en la mezcla, el material que será utilizado como filler será cal, ya que este material tiene un mayor poder espesante, particularmente importante para obtener un elevado cuerpo de película de ligante y para mejorar la adherencia. Por otra parte es aceptado el efecto del envejecimiento que manifiesta la cal como filler en la mezcla asfáltica.

La dosificación que se adoptó para realizar el diseño de la mezcla es 80% de agregado grueso, 15% de agregado fino triturado y 5% de filler, para realizar la dosificación tenemos que tener en cuenta la banda granulométrica con la que estamos trabajando, y ver que nuestros agregados se adapten a la misma para no tener inconvenientes más adelante. A continuación se mostrara la tabla de dosificación y los límites de la banda granulométrica con la que trabajamos.

Se tomó con tamaño máximo de partícula al material que pasa el tamiz  $\frac{3}{4}$ ".

TAMIZ	GRAVA 3/8	ARENA	FILLER	SUMATORI A	BAND INF	BAND SUP	CUMPLE
3/4"	80,00	15,00	5,00	100,0	100	100	VERDADERO
1/2"	57,80	15,00	5,00	77,8	70	100	VERDADERO
3/8"	33,22	15,00	5,00	53,2	50	75	VERDADERO
No. 4	9,01	13,95	5,00	28,0	15	32	VERDADERO
No. 10	2,87	8,46	5,00	16,3	9	20	VERDADERO
No. 30	0,71	4,15	5,00	9,9	5	12	VERDADERO
No. 200	0,18	0,46	4,96	5,6	3	7	VERDADERO

Tabla 4.2: Dosificación adoptada para realizar el diseño de la mezcla drenante. Fuente: Elaboración propia.

La dosificación será la siguiente:

- Agregado Grueso = 85%
- Agregado Fino = 15%
- Polvo mineral Filler = 5%

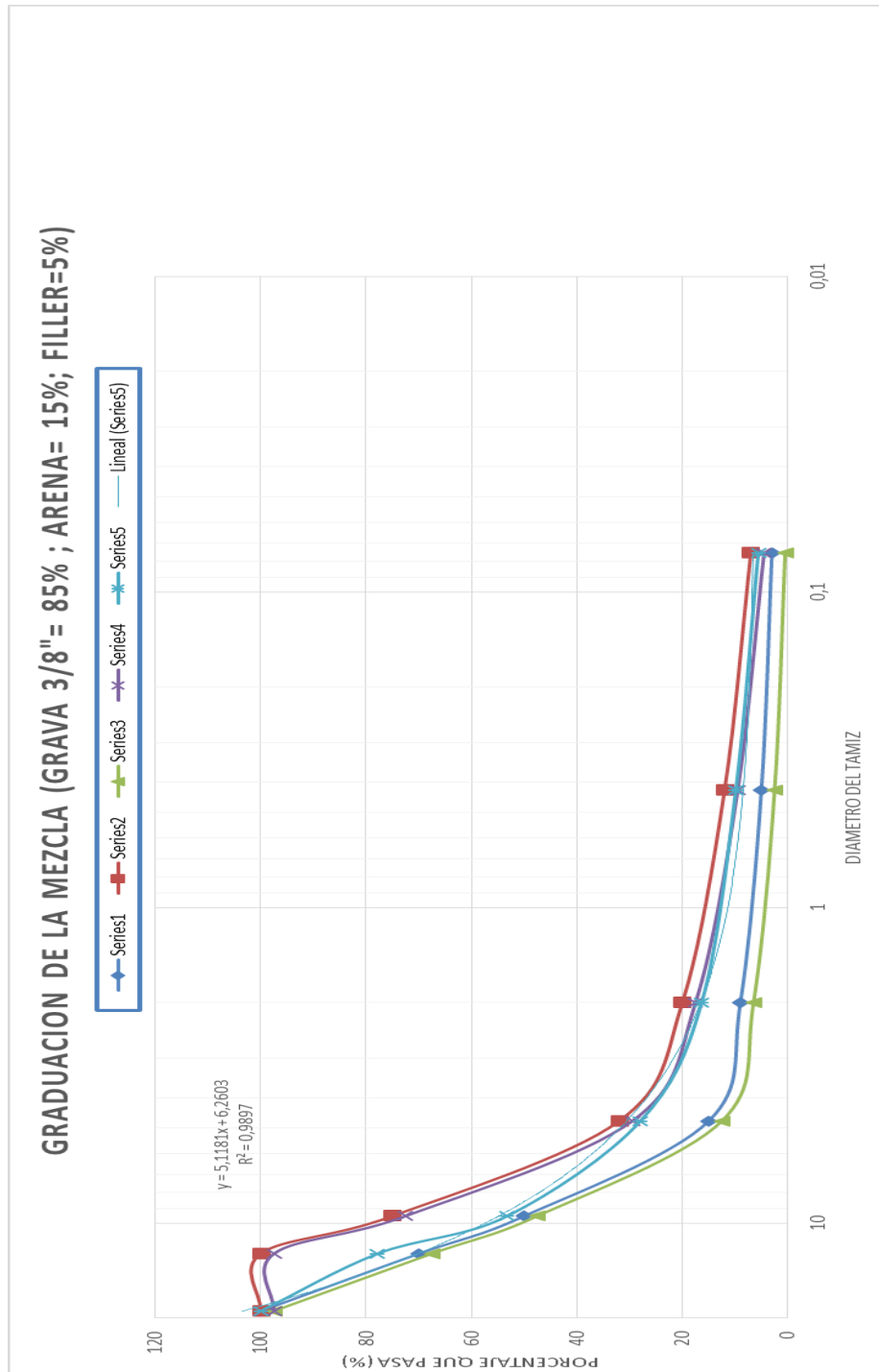
El método de tanteos recibe este nombre porque se tantean los porcentajes de aporte de cada material, hasta que la curva de la granulometría de la mezcla entre en el rango de las especificaciones.

Se verifica que la dosificación escogida esté dentro de la banda de control de la obra, que es una faja de trabajo que permite una tolerancia en la gradación del agregado para el trabajo en obra, que se muestra en las tablas siguientes.

4.2.1 PLANILLA GRANULOMÉTRICA PROYECTADA.

DOSIFICACIÓN DE MATERIALES																									
PLANILLA DE GRANULOMETRIA PROYECTADA																									
MATERIAL	p.g.	1"		3/4"		1/2"		3/8"		Nº4		Nº10		Nº16		Nº30		Nº50		Nº80		Nº200			
		Mm.	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%
Grava de 3/8"	80,0	100,0	80,0	100,0	80,0	100,0	72,3	57,8	41,53	33,2	11,26	9,0	3,59	2,9	0,00	0,0	0,9	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2
Arena Natural	5,0	100,0	5,0	100,0	15,0	92,99	15,0	100,0	15,0	100,0	15,0	92,99	15,0	100,0	15,0	92,99	15,0	100,0	15,0	100,0	15,0	100,0	15,0	100,0	15,0
Polvo filler	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0	100,0	5,0
RESULTANTE	100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		100,0
ESPECIFICACIONES (min.-M.áx.)		100	100	100	100	100	70	100	50	75	15	32	9	20			5	12		7,8			3	7	

4.2.2 GRÁFICA DE LA GRANULOMETRÍA Y DOSIFICACIÓN REALIZADAS.



#### 4.2.3 DOSIFICACIONES FINALES: PESOS RETENIDOS POR TAMICES Y SU RESPECTIVO PORCENTAJE DE ASFALTO

Tamices		% C.A.	PB (gr)
		3,5	1000
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0	0
1"	¾"	0	0
¾"	½"	214,2	214,2
½"	3/8"	237,2	451,4
3/8"	N°4	243,8	695,2
N°4	N° 10	112,2	807,4
N° 10	N° 16	39,9	847,3
N° 16	N° 30	22,5	869,8
N° 30	N° 50	19,9	889,8
N° 50	N° 80	5,9	895,7
N° 80	N° 200	15,3	911,0
N° 200	Fondo	54,0	965,0
Suma Total		965	
Cemento Asfáltico (gr)		35	

Tabla 4.3 Dosificación al 3.5% de Asfalto. Fuente: Elaboración propia

Tamices		% C.A.	PB (gr)
		4	1000
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0	0
1"	¾"	0	0
¾"	½"	213,1	213,1
½"	3/8"	236,0	449,1
3/8"	N°4	242,5	691,6
N°4	N° 10	111,6	803,2
N° 10	N° 16	39,7	842,9
N° 16	N° 30	22,4	865,3
N° 30	N° 50	19,8	885,2
N° 50	N° 80	5,9	891,1
N° 80	N° 200	15,2	906,2
N° 200	Fondo	53,8	960,0
Suma Total		960	
Cemento Asfáltico (gr)		40	

Tabla 4.4 Dosificación al 4% de Asfalto. Fuente: Elaboración propia

Tamices		% C.A.	PB (gr)
		4,5	1000
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0	0
1"	¾"	0	0
¾"	½"	212,0	212,0
½"	3/8"	234,8	446,7
3/8"	N°4	241,3	688,0
N°4	N° 10	111,0	799,1
N° 10	N° 16	39,5	838,5
N° 16	N° 30	22,3	860,8
N° 30	N° 50	19,7	880,6
N° 50	N° 80	5,9	886,4
N° 80	N° 200	15,1	901,5
N° 200	Fondo	53,5	955,0
Suma Total		955	
Cemento Asfáltico (gr)		45	

Tabla 4.5 Dosificación al 4.5% de Asfalto. Fuente: Elaboración propia

Tamices		% C.A.	PB (gr)
		5	1000
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0	0
1"	¾"	0	0
¾"	½"	210,9	210,9
½"	3/8"	233,5	444,4
3/8"	N°4	240,0	684,4
N°4	N° 10	110,5	794,9
N° 10	N° 16	39,3	834,1
N° 16	N° 30	22,2	856,3
N° 30	N° 50	19,6	875,9
N° 50	N° 80	5,8	881,8
N° 80	N° 200	15,0	896,8
N° 200	Fondo	53,2	950,0
Suma Total		950	
Cemento Asfáltico (gr)		50	

Tabla 4.6 Dosificación al 5% de Asfalto. Fuente: Elaboración propia

Tamices		% C.A.	PB (gr)
		5,5	1000
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0	0
1"	¾"	0	0
¾"	½"	209,7	209,7
½"	3/8"	232,3	442,1
3/8"	N°4	238,8	680,8
N°4	N° 10	109,9	790,7
N° 10	N° 16	39,0	829,7
N° 16	N° 30	22,1	851,8
N° 30	N° 50	19,5	871,3
N° 50	N° 80	5,8	877,1
N° 80	N° 200	15,0	892,1
N° 200	Fondo	52,9	945,0
Suma Total		945	
Cemento Asfáltico (gr)		55	

Tabla 4.7 Dosificación al 5.5% de Asfalto. Fuente: Elaboración propia

Tamices		% C.A.	PB (gr)
		6	1000
Pasa	Retiene	Peso Ret	Peso Acum
1"	0	0	0
1"	¾"	0	0
¾"	½"	208,6	208,6
½"	3/8"	231,1	439,7
3/8"	N°4	237,5	677,2
N°4	N° 10	109,3	786,5
N° 10	N° 16	38,8	825,3
N° 16	N° 30	22,0	847,3
N° 30	N° 50	19,4	866,7
N° 50	N° 80	5,8	872,5
N° 80	N° 200	14,9	887,4
N° 200	Fondo	52,6	940,0
Suma Total		940	
Cemento Asfáltico (gr)		60	

Tabla 4.8 Dosificación al 6% de Asfalto. Fuente: Elaboración propia



Fotografía 4.1: Material Dosificado. Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.3 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DRENANTE.

En lo que respecta al diseño de mezclas drenantes, la normativa INVIAS, en su apartado sobre mezclas drenantes, establece que este se realizara a partir de probetas cilíndricas del tipo Marshall elaboradas de acuerdo a los procedimientos establecidos en la misma, similar a la norma AASHTO con la diferencia en la masa de los agregados para cada probeta.

Para la selección del contenido óptimo de asfalto en la mezcla se establecen los siguientes 5 criterios:

1. Los vacíos con aire de la mezcla compactada, medidos de acuerdo al procedimiento establecido ASTM T 269, deberán variar en el rango del dieciséis por ciento (16%), ni mayores de veinticinco por ciento (25 %).
2. Para asegurar que los vacíos con aire están debidamente interconectados, se realizará una prueba de permeabilidad. La capacidad de drenaje se medirá colocando cien mililitros (100 ml) de agua en un molde conteniendo la probeta

pre humedecida. El tiempo que tarde el agua en atravesar la muestra no deberá exceder de quince segundos (15 s).

3. Las pérdidas por desgaste a veinticinco grados Celsius (25°C), determinadas de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma INV E-760, no deberán ser superiores a veinticinco por ciento (25 %).

4. La dosificación del material bituminoso no podrá ser inferior a cuatro y medio por ciento (4.5 %), respecto del peso seco de los agregados, incluido el llenante mineral.

5. Se deberá comprobar, además, la adhesividad entre el agregado y el ligante, caracterizando la mezcla en presencia de agua. Al efecto, la pérdida por abrasión en el ensayo Cántabro, según la norma de ensayo INV E-760, tras ser sometidas las probetas a un proceso de inmersión en agua durante veinticuatro horas (24 h) a sesenta grados Celsius (60°C), no podrá exceder de cuarenta por ciento (40 %).

Si se supera este valor, se deberá mejorar la adhesividad mediante un aditivo mejorador de adherencia apropiado.

Con lo anterior, se establece que los parámetros a evaluar son los siguientes:

- Vacíos en la mezcla
- Desgaste en la máquina de los ángeles (estado seco)
- Desgaste en la máquina de los ángeles (estado húmedo)
- Permeabilidad

Estos parámetros son los que han sido evaluados en la investigación, empleando la dosificación seleccionada al inicio de este capítulo (80% de grava, 15% de arena y 5% de filler).

#### 4.3.1. ELABORACIÓN DE BRIQUETAS.

Antes de comenzar con la evaluación de criterios, será necesario hablar sobre la elaboración de briquetas, las cuales se hicieron bajo el procedimiento planteado en la norma AASHTO T 245 con la diferencia que la masa de agregados por briqueta debe ser de 1000g a diferencia de los 1,200g del método Marshall.

El procedimiento consiste en la fabricación de briquetas cilíndricas de 101.6mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2½") de altura, preparadas como se describe en la norma.



Fotografía 4.2: Briquetas tipo Marshall de mezcla drenante. Fuente: Elaboración propia.



*Fotografía 4.3: Briquetas tipo Marshall de mezcla drenante. Fuente: Elaboración propia.*

Se procedió en primer lugar a preparar los materiales con la dosificación de diseño. En un recipiente tarado se fueron pesando sucesivamente las cantidades de las fracciones de tal modo que la cantidad total de árido para cada briqueta fuera de 1000 g.

Se colocó a continuación el recipiente al horno para calentar la dosificación de agregados a una temperatura de 190 °C.

Se colocó la cantidad de asfalto necesaria para la fabricación de las briquetas en un recipiente y se llevó a una temperatura de 180 °C, esto de acuerdo a las propiedades del asfalto utilizado cuya temperatura de mezclado y compactación a utilizar es de 180 °C y 150 °C respectivamente.



*Fotografía 4.4 Horno eléctrico utilizado para calentar los materiales. Fuente: Elaboración propia*

Se vertieron los agregados en el recipiente para el mezclado y se efectuó una mezcla de los mismos, se añadió por pesada la cantidad exacta de asfalto calculado para la mezcla.

Manteniendo la temperatura de los materiales dentro de los límites especificados para su mezcla, se inició el proceso de mezclado, y se continuó hasta que la mezcla se observara homogéneamente cubierta.



*Fotografía 4.5 Proceso de Mezclado. Fuente: Elaboración propia*

La compactación de las briquetas se realizó empleando la máquina y el procedimiento de compactación descrito en la norma AASHTO T 245, sin embargo el número de golpes fue establecido en base a la norma INV E 760 “CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE” de la normativa INVIAS. Establece que el número de golpes deberá de ser de 50 por cara (ver anexos).



Fotografía 4.6: Proceso de compactación con el martillo de Marshall. Fuente: Elaboración propia

### 4.3.2. VACÍOS.

Para el cálculo de los vacíos en la mezcla se ha utilizado AASHTO T 269. Se ha tomado el procedimiento descrito en esta norma para la evaluación de vacíos de aire en las probetas para mezclas abiertas, donde se define a las mezclas abiertas como aquellas cuyo contenido de vacíos son del 10% o más, que es el caso.

#### 4.3.2.1. DENSIDAD BULK.

Se determinó la densidad bulk de 6 briquetas, de una mezcla asfáltica compactada, a partir de su masa seca (en gr) y de su volumen (en cm<sup>3</sup>) y se promediaron los resultados.

$$Densidad = \frac{masa}{volumen}$$

Tal como establece el procedimiento, se midió la altura del espécimen con especial cuidado y precisión; así mismo, se midió su diámetro en cuatro sitios diferentes y se calculó su promedio.

Luego se calculó el volumen de la briqueta geoméricamente, usando la altura y diámetros promedios.

$$V_{cilindro} = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

Una vez encontrado el volumen para todas las briquetas fue posible estimar la densidad de la briqueta para una vez así poder convertir la densidad bulk en gravedad específica bulk, dividiendo por 0.99707 g/cm<sup>3</sup>.

A continuación se mostraran los pasos a seguir para obtener la gravedad específica bulk, para contenido de asfalto y para efectos de demostración se desarrollara el cálculo para una briqueta.

Ejemplo:

Datos

Contenido de asfalto = 3.5%

Peso seco o masa = 992 gr

D promedio = 10.1775 cm

H promedio = 6.2225 cm

$$V_{cilindro} = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi 10.1775^2 * 6.2225}{4}$$

$$V_{cilindro} = 506.22 \text{ cm}^3$$

Para la densidad:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

$$\text{Densidad} = \frac{992.0}{506.22}$$

$$\text{Densidad} = 1.96 \text{ g/cm}^3$$

Para obtener la gravedad especifica bulk:

$$\text{Geb} = \frac{1.96}{0.99707}$$

$$\text{Geb} = 1.965$$

De la misma manera se realizara para el resto de las briquetas y se promediaran valores, el cálculo deberá realizarse para cada contenido de asfalto.

A continuación se presentaran unas tablas detalladas con los resultados obtenidos para cada briqueta.

<b>PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO: 3,5%</b>						
<b>BRIQUETA 1</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,17	H1	6,2	992	506,22	1,96
D2	10,17	H2	6,2	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,19	H3	6,25	<b>1,965</b>		
D4	10,18	H4	6,24			
<b>PROMEDIO</b>	10,1775	<b>PROMEDIO</b>	6,2225			
<b>BRIQUETA 2</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,17	H1	6,03	951,6	489,22	1,95
D2	10,18	H2	5,97	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,16	H3	6,02	<b>1,951</b>		
D4	10,17	H4	6,07			
<b>PROMEDIO</b>	10,17	<b>PROMEDIO</b>	6,0225			
<b>BRIQUETA 3</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,17	H1	6,22	939,6	493,37	1,90
D2	10,17	H2	5,94	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,19	H3	6,02	<b>1,910</b>		
D4	10,17	H4	6,09			
<b>PROMEDIO</b>	10,175	<b>PROMEDIO</b>	6,0675			
<b>BRIQUETA 4</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,18	H1	6,4	974	517,50	1,88
D2	10,19	H2	6,38	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,19	H3	6,31	<b>1,888</b>		
D4	10,17	H4	6,33			
<b>PROMEDIO</b>	10,1825	<b>PROMEDIO</b>	6,355			
<b>BRIQUETA 5</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,16	H1	5,92	960,5	489,35	1,96
D2	10,16	H2	6,04	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,17	H3	6,14	<b>1,969</b>		
D4	10,17	H4	6,02			
<b>PROMEDIO</b>	10,165	<b>PROMEDIO</b>	6,03			
<b>BRIQUETA 6</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,18	H1	6,15	961,8	499,95	1,92
D2	10,16	H2	6,18	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,16	H3	6,16	<b>1,929</b>		
D4	10,17	H4	6,14			
<b>PROMEDIO</b>	10,1675	<b>PROMEDIO</b>	6,1575			

Tabla 4.9: Resultados de laboratorio para la densidad especifica bulk, 3.5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO: 4%</b>						
<b>BRIQUETA 1</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,16	H1	6,05	998,8	491,65	2,03
D2	10,18	H2	6,12	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,19	H3	6,01	<b>2,037</b>		
D4	10,2	H4	5,97			
<b>PROMEDIO</b>	10,1825	<b>PROMEDIO</b>	6,0375			
<b>BRIQUETA 2</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,19	H1	6,19	997,2	500,90	1,99
D2	10,18	H2	6,19	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,19	H3	6,15	<b>1,997</b>		
D4	10,19	H4	6,05			
<b>PROMEDIO</b>	10,1875	<b>PROMEDIO</b>	6,145			
<b>BRIQUETA 3</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,18	H1	6,18	987	504,59	1,96
D2	10,17	H2	6,29	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,19	H3	6,25	<b>1,962</b>		
D4	10,17	H4	6,09			
<b>PROMEDIO</b>	10,1775	<b>PROMEDIO</b>	6,2025			
<b>BRIQUETA 4</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,17	H1	6,05	998,3	499,34	2,00
D2	10,18	H2	6,09	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,19	H3	6,21	<b>2,005</b>		
D4	10,18	H4	6,19			
<b>PROMEDIO</b>	10,18	<b>PROMEDIO</b>	6,135			
<b>BRIQUETA 5</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,18	H1	6,3	999,3	503,60	1,98
D2	10,17	H2	6,15	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,16	H3	6,12	<b>1,990</b>		
D4	10,16	H4	6,24			
<b>PROMEDIO</b>	10,1675	<b>PROMEDIO</b>	6,2025			
<b>BRIQUETA 6</b>						
<b>DIAMETRO (cm)</b>		<b>ALTURA (cm)</b>		<b>PESO SECO (grs.)</b>	<b>VOL. (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DENSIDAD (g/cm<sup>3</sup>)</b>
D1	10,19	H1	6,1	997,6	496,90	2,01
D2	10,17	H2	6,08	<b>Gravedad especifica Bulk Geb.</b>		
D3	10,18	H3	6,1	<b>2,014</b>		
D4	10,18	H4	6,14			
<b>PROMEDIO</b>	10,18	<b>PROMEDIO</b>	6,105			

Tabla 4.10: Resultados de laboratorio para la densidad especifica bulk, 4% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO: 4,5%						
BRIQUETA 1						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,19	H1	6,16	996,3	497,88	2,00
D2	10,17	H2	6,08	Gravedad especifica Bulk Geb.		
D3	10,18	H3	6,09	2,007		
D4	10,17	H4	6,15			
<b>PROMEDIO</b>	10,1775	<b>PROMEDIO</b>	6,12			
BRIQUETA 2						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,19	H1	6,15	997,9	501,22	1,99
D2	10,19	H2	6,19	Gravedad especifica Bulk Geb.		
D3	10,18	H3	6,19	1,997		
D4	10,17	H4	6,09			
<b>PROMEDIO</b>	10,1825	<b>PROMEDIO</b>	6,155			
BRIQUETA 3						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,18	H1	6,13	998,1	495,40	2,01
D2	10,17	H2	6,08	Gravedad especifica Bulk Geb.		
D3	10,18	H3	6,04	2,021		
D4	10,17	H4	6,12			
<b>PROMEDIO</b>	10,175	<b>PROMEDIO</b>	6,0925			
BRIQUETA 4						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,19	H1	6,15	998,3	501,42	1,99
D2	10,18	H2	6,11	Gravedad especifica Bulk Geb.		
D3	10,17	H3	6,17	1,997		
D4	10,19	H4	6,2			
<b>PROMEDIO</b>	10,1825	<b>PROMEDIO</b>	6,1575			
BRIQUETA 5						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	6,19	995,6	500,23	1,99
D2	10,17	H2	6,13	Gravedad especifica Bulk Geb.		
D3	10,18	H3	6,14	1,996		
D4	10,17	H4	6,16			
<b>PROMEDIO</b>	10,1725	<b>PROMEDIO</b>	6,155			
BRIQUETA 6						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	6,13	997,4	499,14	2,00
D2	10,18	H2	6,12	Gravedad especifica Bulk Geb.		
D3	10,18	H3	6,11	2,004		
D4	10,19	H4	6,17			
<b>PROMEDIO</b>	10,18	<b>PROMEDIO</b>	6,1325			

Tabla 4.11: Resultados de laboratorio para la densidad especifica bulk, 4.5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO: 5%						
BRIQUETA 1						
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	
D1	10,18	H1	6,02	999,6	492,51	2,03
D2	10,17	H2	6,1	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  2,036		
D3	10,17	H3	6,04			
D4	10,17	H4	6,08			
<b>PROMEDIO</b>	10,1725	<b>PROMEDIO</b>	6,06			
BRIQUETA 2						
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	
D1	10,19	H1	6,14	997,1	493,37	2,02
D2	10,17	H2	6,05	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  2,027		
D3	10,18	H3	6,07			
D4	10,16	H4	6,01			
<b>PROMEDIO</b>	10,175	<b>PROMEDIO</b>	6,0675			
BRIQUETA 3						
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	
D1	10,17	H1	6,04	995,3	493,12	2,02
D2	10,17	H2	6,09	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  2,024		
D3	10,17	H3	6,12			
D4	10,18	H4	6,02			
<b>PROMEDIO</b>	10,1725	<b>PROMEDIO</b>	6,0675			
BRIQUETA 4						
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	
D1	10,17	H1	6,11	998	492,31	2,03
D2	10,17	H2	6,04	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  2,033		
D3	10,17	H3	6,07			
D4	10,18	H4	6,01			
<b>PROMEDIO</b>	10,1725	<b>PROMEDIO</b>	6,0575			
BRIQUETA 5						
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	
D1	10,18	H1	6,01	994,9	491,29	2,03
D2	10,17	H2	6,01	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  2,031		
D3	10,17	H3	6,09			
D4	10,17	H4	6,07			
<b>PROMEDIO</b>	10,1725	<b>PROMEDIO</b>	6,045			
BRIQUETA 6						
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	
D1	10,18	H1	6,04	998,9	490,08	2,04
D2	10,17	H2	5,99	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  2,044		
D3	10,17	H3	6,08			
D4	10,17	H4	6,01			
<b>PROMEDIO</b>	10,1725	<b>PROMEDIO</b>	6,03			

Tabla 4.12: Resultados de laboratorio para la densidad específica bulk, 5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO: 5,5%						
BRIQUETA 1						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	6,12	998,5	492,59	2,03
D2	10,17	H2	6,09	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,033</b>		
D3	10,18	H3	6,03			
D4	10,19	H4	5,98			
<b>PROMEDIO</b>	10,1775	<b>PROMEDIO</b>	6,055			
BRIQUETA 2						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,16	H1	6,11	992,6	496,13	2,00
D2	10,17	H2	6,09	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,007</b>		
D3	10,17	H3	6,1			
D4	10,18	H4	6,13			
<b>PROMEDIO</b>	10,17	<b>PROMEDIO</b>	6,1075			
BRIQUETA 3						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	6,01	987,2	491,94	2,01
D2	10,17	H2	6,08	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,013</b>		
D3	10,18	H3	6,08			
D4	10,18	H4	6,03			
<b>PROMEDIO</b>	10,175	<b>PROMEDIO</b>	6,05			
BRIQUETA 4						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	6,01	997,3	486,14	2,05
D2	10,16	H2	5,98	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,057</b>		
D3	10,16	H3	5,99			
D4	10,18	H4	5,97			
<b>PROMEDIO</b>	10,1675	<b>PROMEDIO</b>	5,9875			
BRIQUETA 5						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	6,01	978,2	489,67	2,00
D2	10,17	H2	6	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,004</b>		
D3	10,18	H3	6,07			
D4	10,17	H4	6,02			
<b>PROMEDIO</b>	10,1725	<b>PROMEDIO</b>	6,025			
BRIQUETA 6						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	6,01	999,1	493,00	2,03
D2	10,16	H2	6,1	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,033</b>		
D3	10,16	H3	6,05			
D4	10,17	H4	6,14			
<b>PROMEDIO</b>	10,165	<b>PROMEDIO</b>	6,075			

Tabla 4.13: Resultados de laboratorio para la densidad específica bulk, 5.5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO: 6%						
BRIQUETA 1						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	5,98	996,9	484,39	2,06
D2	10,17	H2	5,91	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,064</b>		
D3	10,17	H3	5,96			
D4	10,18	H4	5,99			
<b>PROMEDIO</b>	10,1725	<b>PROMEDIO</b>	5,96			
BRIQUETA 2						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	5,97	996,5	483,47	2,06
D2	10,19	H2	5,96	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,067</b>		
D3	10,18	H3	5,89			
D4	10,18	H4	5,94			
<b>PROMEDIO</b>	10,18	<b>PROMEDIO</b>	5,94			
BRIQUETA 3						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,18	H1	5,91	994,9	482,42	2,06
D2	10,17	H2	5,93	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,068</b>		
D3	10,17	H3	5,92			
D4	10,19	H4	5,96			
<b>PROMEDIO</b>	10,1775	<b>PROMEDIO</b>	5,93			
BRIQUETA 4						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	5,94	995	478,73	2,08
D2	10,17	H2	5,92	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,085</b>		
D3	10,17	H3	5,88			
D4	10,19	H4	5,81			
<b>PROMEDIO</b>	10,175	<b>PROMEDIO</b>	5,8875			
BRIQUETA 5						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,18	H1	5,88	998,4	480,79	2,08
D2	10,17	H2	5,96	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,083</b>		
D3	10,17	H3	5,91			
D4	10,19	H4	5,89			
<b>PROMEDIO</b>	10,1775	<b>PROMEDIO</b>	5,91			
BRIQUETA 6						
DIAMETRO (cm)		ALTURA (cm)		PESO SECO (grs.)	VOL. (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
D1	10,17	H1	5,91	997,6	480,93	2,07
D2	10,17	H2	5,96	<b>Gravedad específica Bulk Geb.</b>  <b>2,080</b>		
D3	10,18	H3	5,87			
D4	10,17	H4	5,93			
<b>PROMEDIO</b>	10,1725	<b>PROMEDIO</b>	5,9175			

Tabla 4.14: Resultados de laboratorio para la densidad específica bulk, 6% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.2.2 DENSIDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA.

El peso máximo teórico de una mezcla asfáltica compacta es la que considera el volumen del agregado mineral y el del asfalto, sin tomar en cuenta el volumen de vacíos llenos de aire.

La densidad de la mezcla compacta está definida como su peso unitario (El peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante que se debe tomar en cuenta, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$D_{mt} \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{100}{\frac{\%C.A.}{G_{CA}} + \frac{100 - \%C.A.}{G_{agreg}}}$$

(Ec. 4.1 Densidad Máxima Teórica)

Dónde:

$D_{mt}$ : Densidad máxima teórica

%C. A.: Porcentaje de cemento asfáltico

$G_{CA}$ : Peso específico de cemento asfáltico

$G_{agreg}$ : Peso específico del agregado

En las pruebas y análisis de diseño de las mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa generalmente en kilos por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), gramos por centímetro cúbico ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ), o libras por pie cúbico ( $\text{lb}/\text{ft}^3$ ). La densidad es calculada de multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ( $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) o ( $62.416 \text{ lb}/\text{ft}^3$ ). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un

porcentaje de la densidad en el laboratorio (porque en el laboratorio se tienen las condiciones ideales del 100%)

<b>DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 3,5%</b>		
Porcentaje de cemento asfáltico (%C.A.)	3,5	%
Peso específico del cemento asfáltico (GCA)	1,01	g/cm <sup>3</sup>
Peso específico del agregado (Gagr)	2,665	g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad Máxima Teórica (Dmt)</b>	<b>2,520</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>

Tabla 4.15: Densidad máxima teórica, 3.5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>DENSIDAD MXIMA TEÓRICA</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 4%</b>		
Porcentaje de cemento asfáltico (%C.A.)	4	%
Peso específico del cemento asfáltico (GCA)	1,01	g/cm <sup>3</sup>
Peso específico del agregado (Gagr)	2,665	g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad Máxima Teórica (Dmt)</b>	<b>2,501</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>

Tabla 4.16: Densidad máxima teórica, 4% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 4,5%</b>		
Porcentaje de cemento asfáltico (%C.A.)	4,5	%
Peso específico del cemento asfáltico (GCA)	1,01	g/cm <sup>3</sup>
Peso específico del agregado (Gagr)	2,665	g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad Máxima Teórica (Dm)</b>	<b>2,482</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>

Tabla 4.17: Densidad máxima teórica, 4.5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 5%</b>		
Porcentaje de cemento asfáltico (%C.A.)	5	%
Peso específico del cemento asfáltico (GCA)	1,01	g/cm <sup>3</sup>
Peso específico del agregado (Gagr)	2,665	g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad Máxima Teórica (Dmt)</b>	<b>2,463</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>

Tabla 4.18: Densidad máxima teórica, 5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 5,5%</b>		
Porcentaje de cemento asfáltico (%C.A.)	5,5	%
Peso específico del cemento asfáltico (GCA)	1,01	g/cm <sup>3</sup>
Peso específico del agregado (Gagr)	2,665	g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad Máxima Teórica (Dmt)</b>	<b>2,445</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>

Tabla 4.19: Densidad máxima teórica, 5.5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 6%</b>		
Porcentaje de cemento asfáltico (%C.A.)	6	%
Peso específico del cemento asfáltico (GCA)	1,01	g/cm <sup>3</sup>
Peso específico del agregado (Gagr)	2,665	g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad Máxima Teórica (Dmt)</b>	<b>2,426</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>

Tabla 4.20: Densidad máxima teórica, 6% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

### 4.3.2.3 CÁLCULO DE VACÍOS.

Con los datos de densidades específica bulk y máxima teórica podemos proceder a realizar el cálculo de los vacíos de las muestras y para hacerlo usaremos la siguiente formula:

$$\text{vacios} = \frac{\text{Dmt} - \text{Geb}}{\text{Dmt}} * 100$$

Donde:

Dmt = Densidad máxima específica teórica

Geb = Gravedad específica Bulk (promediado)

Se obtuvieron los siguientes resultados:

<b>CÁLCULO DE VACÍOS</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 3,5%</b>		
Gravedad específica Bulk (Geb): Promedio	1,935	
Gravedad específica Máxima teórica (Dmt).	2,520	g/cm <sup>3</sup>
<b>Vacíos (%)</b>	<b>23,21</b>	<b>%</b>

Tabla 4.21: Porcentaje de vacíos, 3.5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>CÁLCULO DE VACÍOS</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 4%</b>		
Gravedad específica Bulk (Geb): Promedio	2,001	
Gravedad específica Máxima teórica (Dmt).	2,501	g/cm <sup>3</sup>
<b>Vacíos (%)</b>	<b>20,00</b>	<b>%</b>

Tabla 4.22: Porcentaje de vacíos, 4% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>CÁLCULO DE VACÍOS</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 4,5%</b>		
Gravedad específica Bulk (Geb): Promedio	2,004	
Gravedad específica Máxima teórica (Dmt).	2,482	g/cm <sup>3</sup>
<b>Vacíos (%)</b>	<b>19,28</b>	<b>%</b>

Tabla 4.23: Porcentaje de vacíos, 4.5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>CÁLCULO DE VACÍOS</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 5%</b>		
Gravedad específica Bulk (Geb): Promedio	2,033	
Gravedad específica Máxima teórica (Dmt).	2,463	g/cm <sup>3</sup>
<b>Vacíos (%)</b>	<b>17,48</b>	<b>%</b>

Tabla 4.24: Porcentaje de vacíos, 5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>CÁLCULO DE VACIOS</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 5,5%</b>		
Gravedad específica Bulk (Geb): Promedio	2,024	
Gravedad específica Máxima teórica (Dmt).	2,445	g/cm <sup>3</sup>
<b>Vacíos (%)</b>	<b>17,20</b>	<b>%</b>

Tabla 4.25: Porcentaje de vacíos, 5.5% de asfalto. Fuente: Elaboración propia

<b>CÁLCULO DE VACÍOS</b>		
<b>PORCENTAJE DE ASFALTO 6%</b>		
Gravedad específica Bulk (Geb): Promedio	2,075	
Gravedad específica Máxima teórica (Dmt).	2,426	g/cm <sup>3</sup>
<b>Vacíos (%)</b>	<b>14,50</b>	<b>%</b>

Tabla 4.26: Porcentaje de vacíos, 6% de asfalto. Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.3 ENSAYO DE PERMEABILIDAD.

Los estudios españoles desarrollaron el permeámetro L.C.S. para la evaluación de este parámetro, sin embargo en la normativa colombiana INVIAS, se contempla la evaluación de la permeabilidad como un ensayo complementario, lo utilizan para la verificación, de que los vacíos de aire contenido en la mezcla, realmente se encuentren interconectados.

En las normativas INVIAS no existe una norma para esta prueba, solo establece que se debe verter 100 ml de agua sobre la probeta pre-humedecida y medir el

tiempo que esta tarda en atravesar la probeta, sin que este tiempo sea mayor de 15 s, sin embargo para establecer condiciones semejantes entre cada prueba, en esta prueba las briquetas se mantuvieron sumergidas por un tiempo de 4 minutos.

La prueba se hizo sobre las briquetas aun contenidas en los moldes Marshall donde fueron compactadas, las cuales antes de la realización fueron sumergidas en agua por un periodo de 4 min, y dejadas reposar hasta dejar de observar en la cara inferior escurrimiento del agua retenida en la briquea, luego se vertieron 15 ml de agua sobre la misma y se tomó el tiempo en que tardo en atravesar el agua, la briquea.



*Fotografía 4.7: Ensayo de permeabilidad. Fuente: Elaboración propia*

ENSAYO DE PERMEABILIDAD		
Porcentaje de asfalto (%)	Temperatura del agua (°C)	Tiempo de Evacuación (s)
3,5	25	8,12
4	25	9,65
4,5	25	10,23
5	25	12,54
5,5	25	14,59
6	25	16,89

Tabla 4.27: Resultados del ensayo de Permeabilidad. Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.4 CÁNTABRO SECO (MÁQUINA DE LOS ÁNGELES).

El ensayo de desgaste conocido también como ensayo cántabro, permite valorar indirectamente la cohesión, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tránsito, ensayo desarrollado en España y retomado por diversos países como Colombia que en su normativa ha sido adaptada; esta ensayo no tiene equivalencia con las normas ASTM y AASHTO por lo que para su evaluación se utilizó la adaptación colombiana, la norma INV E 760 “CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE”.

Se prepararon tres probetas para cada contenido de asfalto y el ensayo se realizó procurando que la temperatura de ensayo estuviera comprendida entre 15º y 30º C, con una tolerancia máxima de  $\pm 1^\circ$  C como recomendación de la norma.

Luego se determinó la masa de cada probeta con aproximación de 0.1g.

Se introdujo a continuación una probeta en el bombo de la máquina de Los Ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hizo girar el tambor a la misma

velocidad normalizada de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 33 rpm) del ensayo de desgaste de agregados, pero durante 300 vueltas.



Fotografía 4.8: Máquina de Desgaste de Los Ángeles para el método Cántabro. Fuente: Elaboración propia

Al final del ensayo, se sacó la probeta y se determinó de nuevo su masa con la misma aproximación de 0.1 g.

Se calculó el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada probeta ensayada, mediante la expresión:

Donde:

$$P = \frac{w_1 - w_2}{w_1} * 100$$

Donde:

P= valor de la perdida por desgaste, en %

W1 = masa inicial de la briqueta, en gramos.

W2= mas final de la briqueta, en gramos.

Y por último se calculó el valor medio de las 4 probetas ensayadas, esto para cada contenido de asfalto.

Obteniéndose los siguientes resultados: Para el ensayo de cántabro seco;

CANTABRO SECO						
PORCENTAJE DE ASFALTO 3,5%						
Briqueta	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues (gr)	Perdida (%)	Perdida Promedio
	Inicial	final				
4	24	25	974	652,3	33,029	43,506
5	25	25	960,5	486,8	49,318	
6	25	25	961,8	498,5	48,170	
PORCENTAJE DE ASFALTO 4%						
Briqueta	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues (gr)	Perdida (%)	Perdida Promedio
	Inicial	final				
4	23	24	998,3	613,2	38,576	33,540
5	22	23	999,3	687,5	31,202	
6	25	25	997,6	689,9	30,844	
PORCENTAJE DE ASFALTO 4,5%						
Briqueta	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues (gr)	Perdida (%)	Perdida Promedio
	Inicial	final				
4	25	25	998,3	754,3	24,442	23,657
5	24	25	995,6	731,2	26,557	
6	25	26	997,4	798,2	19,972	
PORCENTAJE DE ASFALTO 5%						
Briqueta	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues (gr)	Perdida (%)	Perdida Promedio
	Inicial	final				
4	25	25	998	857,9	14,04	13,79
5	25	25	994,9	859,8	13,58	
6	26	25	998,9	861,5	13,76	
PORCENTAJE DE ASFALTO 5,5%						
Briqueta	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues (gr)	Perdida (%)	Perdida Promedio
	Inicial	final				
4	23	23	997,3	869,3	12,83	12,27
5	24	24	978,2	868,3	11,23	
6	22	23	999,1	871,9	12,73	
PORCENTAJE DE ASFALTO 6%						
Briqueta	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues (gr)	Perdida (%)	Perdida Promedio
	Inicial	final				
4	25	25	995	885,1	11,045	11,995
5	25	26	998,4	879,6	11,899	
6	24	25	997,6	867,5	13,041	

Tabla 4.28: Resultados de Laboratorio para Ensayo Cántabro en estado seco. Fuente: Elaboración propia.

#### **4.3.5 CANTABRO HÚMEDO (MÁQUINA DE LOS ÁNGELES).**

El ensayo de desgaste en estado húmedo se realiza de igual forma que el descrito anteriormente, igual número de briquetas y condiciones para el ensayo, con la diferencia que estas han permanecido sumergidas en agua a 60 °C por un periodo de 24 horas, los cálculos se realizaron de igual forma que en el estado seco.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

CANTABRO HUMEDO							
PORCENTAJE DE ASFALTO 3,5%							
Briqueta	Masa antes del bano maria (gr)	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues	Perdida (%)	Perdida Promedio
		Inicial	final				
1	992	25	25	1023,8	444,3	56,603	57,028
2	951,6	25	25	979,3	410,3	58,103	
3	939,6	25	25	1001,6	436,9	56,380	
PORCENTAJE DE ASFALTO 4%							
Briqueta	Masa antes del bano maria (gr)	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues	Perdida (%)	Perdida Promedio
		Inicial	final				
1	998,8	25	25	1025,3	592,3	42,232	42,230
2	997,2	25	26	1021,5	587,4	42,496	
3	987	25	25	1022,8	593,6	41,963	
PORCENTAJE DE ASFALTO 4,5%							
Briqueta	Masa antes del bano maria (gr)	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues	Perdida (%)	Perdida Promedio
		Inicial	final				
1	996,3	25	26	1020,9	649,8	36,350	35,828
2	997,9	25	26	1019,1	684,3	32,853	
3	998,1	25	26	1019,6	629,3	38,280	
PORCENTAJE DE ASFALTO 5%							
Briqueta	Masa antes del bano maria (gr)	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues	Perdida (%)	Perdida Promedio
		Inicial	final				
1	999,6	25	25	1018,6	765,2	24,88	27,11
2	997,1	25	25	1018,6	713,5	29,95	
3	995,3	26	25	1019,7	749,6	26,49	
PORCENTAJE DE ASFALTO 5,5%							
Briqueta	Masa antes del bano maria (gr)	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues	Perdida (%)	Perdida Promedio
		Inicial	final				
1	998,5	24	24	1011,1	798,3	21,05	22,17
2	992,6	25	25	999,2	778,4	22,10	
3	987,2	25	25	1004,6	769,9	23,36	
PORCENTAJE DE ASFALTO 6%							
Briqueta	Masa antes del bano maria (gr)	Temperatura °C		Masa antes (gr)	Masa despues	Perdida (%)	Perdida Promedio
		Inicial	final				
1	996,9	25	26	1009,3	884,3	12,385	15,142
2	996,5	25	25	1008,1	830,5	17,617	
3	990,7	25	25	1006,9	851,6	15,424	

Tabla 4.29: Resultados de Laboratorio para Ensayo Cantabro en estado húmedo. Fuente: Elaboración propia.

#### **4.4 RESUMEN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIOS.**

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio es necesario realizar un análisis de los mismos para poder entender de qué manera puede servir en primera instancia la calidad de los resultados obtenidos.

Cuando hablamos de los vacíos podemos asegurar que mientras más contenido de asfalto presente la mezcla, menor será el contenido de vacíos en la misma, de la misma manera podemos observar que el desgaste es finamente relacionado con el contenido de asfalto que pueda presentar la mezcla, ya que el propio asfalto es el que le proporciona la estabilidad a la mezcla, y de la misma forma que con los vacíos, se puede esperar que mientras más asfalto contenga la mezcla, menor será el desgaste que presente y por lo tanto será más estable.

La permeabilidad en estas mezclas, al igual que el desgaste y los vacíos, está ligada con el porcentaje de asfalto que se utilice, mientras mayor sea este, menor será la permeabilidad de la mezcla.

La tabla siguiente muestra un resumen de manera puntual, de los valores necesarios para obtención del contenido óptimo de asfalto que veremos a continuación y a su vez la obtención del porcentaje de vacíos óptimo para este tipo de mezclas en nuestro medio.

RESUMEN DE ENSAYOS				
Contenido de asfalto (%)	Porcentaje de Vacíos (%)	Porcentaje de Desgaste (Cántabro Seco)	Porcentaje de Desgaste (Cántabro Húmedo)	Permeabilidad
3,5	23,21	43,51	57,03	8,12
4,0	20,00	33,54	42,23	9,65
4,5	19,28	23,66	35,83	10,23
5,0	17,48	13,79	27,11	12,54
5,5	17,20	12,27	22,17	14,59
6,0	14,50	12,00	15,14	16,89

Tabla 4.30: Resumen de resultados de los ensayos de porcentaje de vacíos, cántabro seco y húmedo) y permeabilidad. Fuente: Elaboración propia

Esta tabla nos muestra de que el comportamiento de nuestra mezcla es aceptable de acuerdo a la normativa que rige este tipo de mezclas.

Lo siguiente a realizar será encontrar el contenido óptimo de asfalto para que la mezcla presente sus mejores características mecánicas.

Para determinar el contenido óptimo del asfalto se realizaron dos análisis en base a los resultados obtenidos.

#### 4.4.1 ANÁLISIS No. 1.

Con la tabla de resumen que se muestra podemos realizar graficas que nos indiquen algunas características que buscamos.

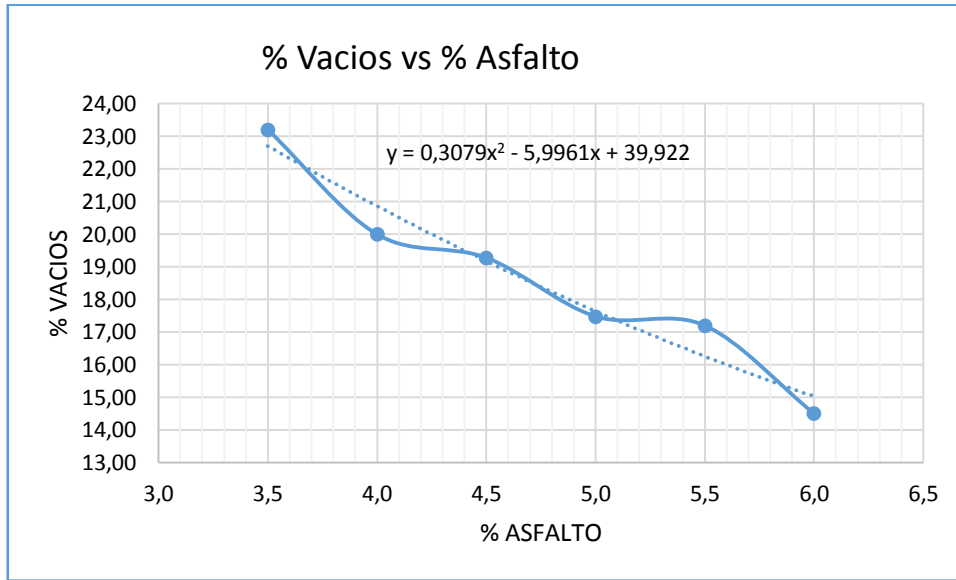


Figura 4.1: Grafico de porcentaje de Vacíos vs porcentaje de Asfalto. Fuente: Elaboración propia

Usando la línea de tendencia y buscando la que mejor se ajustase a nuestra grafica (figura 4.4) obtuvimos una ecuación polinómica que se muestra en la gráfica. El porcentaje de vacíos, como la norma lo indica, varían de 20% a 25%, siendo en algunos casos menor que 20% pero nunca mayor que 25%, contamos con estos dos valores como referencia; de tal manera que tenemos  $y_1 = 20\%$  y  $y_2 = 25\%$ , valores que podemos sustituir en la ecuación encontrada para poder así obtener valores de porcentaje de asfalto que puedan tal vez ser útiles.

Para  $y_1 = 20\%$  tenemos  $X_1 = 4.25 \%$

Para  $y_2 = 25\%$  tenemos  $X_2 = 2.92 \%$

Se observa que para tener un 25% de vacíos en nuestra mezcla, el contenido de asfalto es demasiado bajo, aun así si usamos el promedio de ambos valores  $X_1 =$

4.25 y  $X_2 = 2.92$  obtenemos el valor  $X_{prom} = 3.6 \%$ , como nuestro valor óptimo de asfalto, con el fin de garantizar vacíos del rango de 22.5% (promedio entre 20% y 25%) obtenemos lo siguiente:

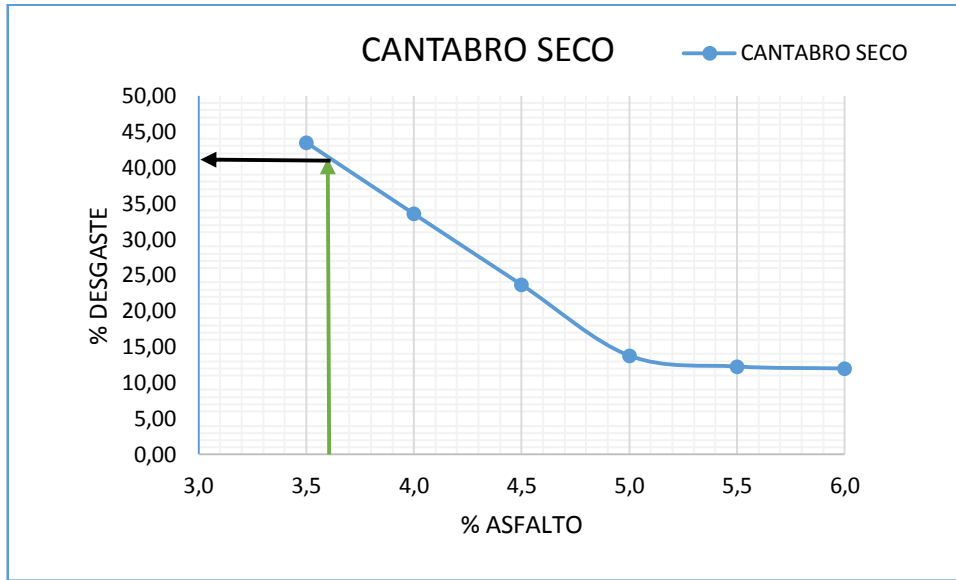


Figura 4.2: Gráfico del ensayo de desgaste cántabro seco (% de asfalto de 3.6%). Fuente: Elaboración propia

Al interceptar la gráfica (figura 4.5) en los valores anteriormente mencionados podemos observar que el desgaste que se produce (aproximadamente 42%) sobrepasa de amplia manera al impuesto por la norma que es de 25%.

Se concluye que el contenido de asfalto que se requiere para cumplir el desgaste debe ser mucho mayor al ideal obtenido en el caso planteado, de hecho, no hay que olvidar que dentro de los criterios establecidos por la normativa INVIAS nos indica que el contenido de asfalto mínimo no deber menor a un 4.5%, ya que según esta normativa con porcentajes menores no hay una buena envoltura de los agregados, y se pudo ver que es verdad, ya que en el presente trabajo se utilizó 3.5% de asfalto y se pudo apreciar que no parecía suficiente asfalto para garantizar una buena envoltura de los agregados.

#### 4.4.2 ANÁLISIS No. 2

Ya que vimos que el desgaste está íntimamente relacionado con el porcentaje de asfalto, se puede establecer cuál es el contenido de asfalto necesario para cumplir con el desgaste de 25% en el cántabro seco y luego se puede corroborar el porcentaje óptimo de vacíos a partir de este análisis.

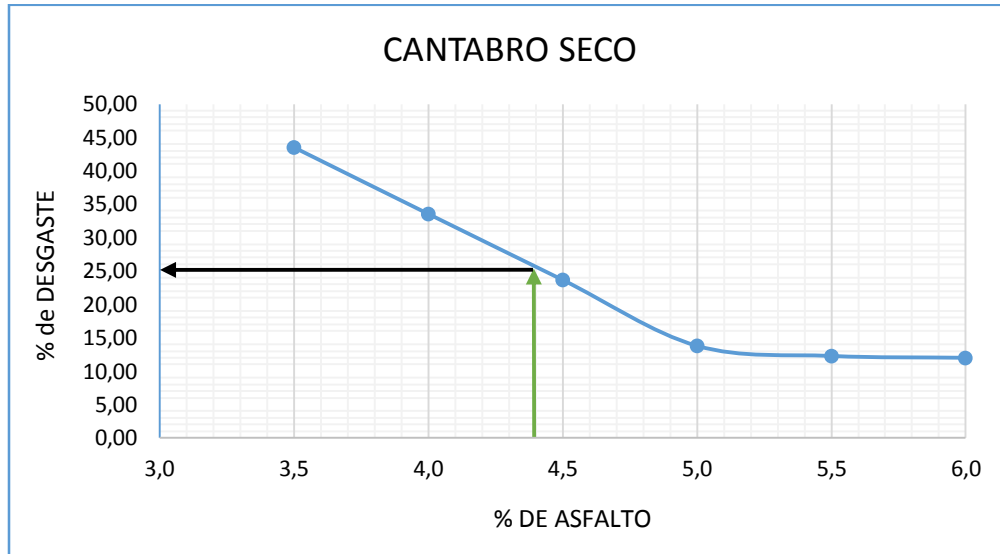


Figura 4.3: Gráfico del ensayo de desgaste cántabro seco (% de asfalto de 4.4%). Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la figura 4.6, que para un desgaste de 25% el contenido de asfalto es de aproximadamente de 4.4%, lo cual sigue siendo bajo de acuerdo a la norma, sin embargo es preferible que el contenido sea más alto, ya que estamos analizando un límite, de tal manera que con un 4.5 % de asfalto bastaría y este valor se encuentra establecido en norma.

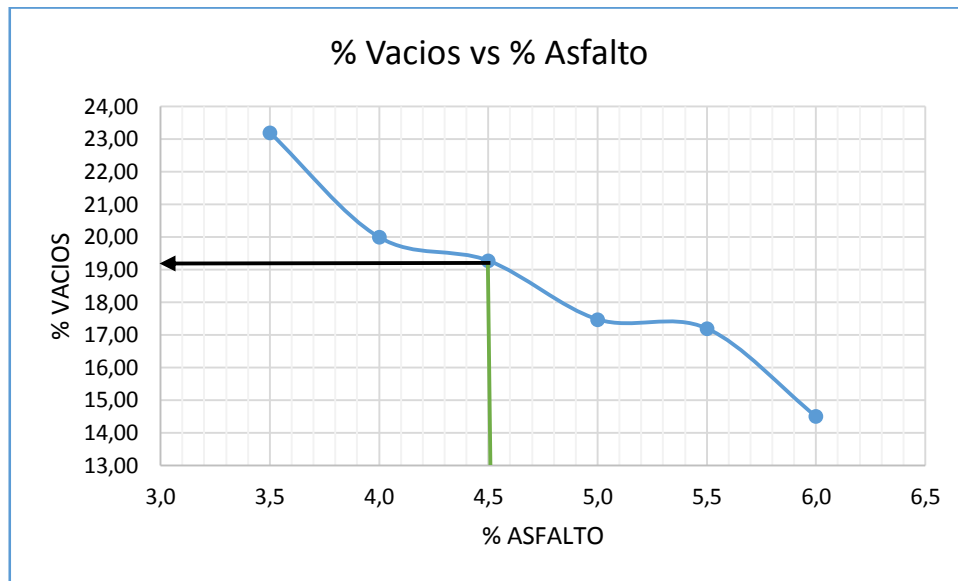


Figura 4.4: Grafico de porcentaje de Vacíos vs porcentaje de Asfalto (% de asfalto de 4.5%). Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar en la figura 4.7, con un 4,5% de asfalto obtenemos un 19.28 % de vacíos que es aproximadamente 20% y por lo tanto es un resultado satisfactorio, ya que si incrementamos el porcentaje de asfalto no se cumplirá con el porcentaje de vacíos establecidos por norma para este tipo de mezclas.

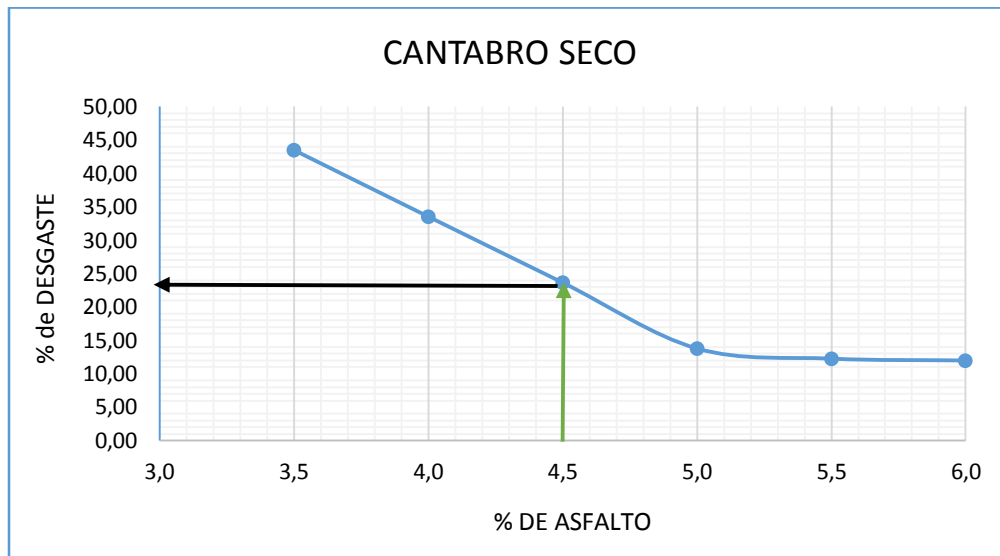


Figura 4.5: Grafico del ensayo de desgaste cántabro seco (% de asfalto de 4.5%). Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de desgaste obtenido es de 23.66%, que está por debajo de 25% permitido para el ensayo de Cántabro seco, como se muestra en la figura 4.8.

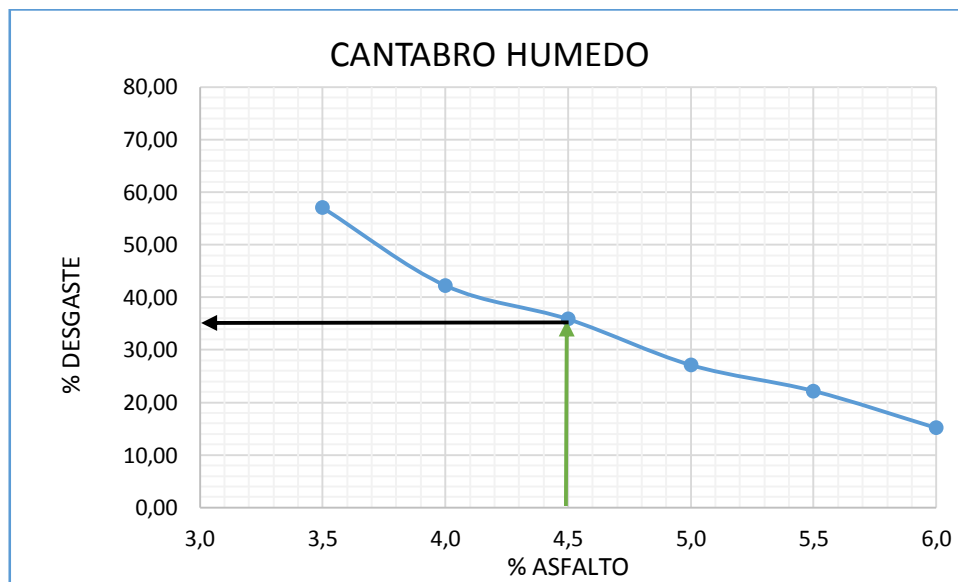


Figura 4.6: Grafico del ensayo de desgaste cántabro húmedo (% de asfalto de 4.5%). Fuente: Elaboración propia.

El desgaste para el cántabro húmedo también es aceptable ya con el 35.83% está por debajo de lo permitido por la norma, lo que indica que la adhesión de los materiales es buena, tal como se muestra en la figura 4.9.

**Permeabilidad:**

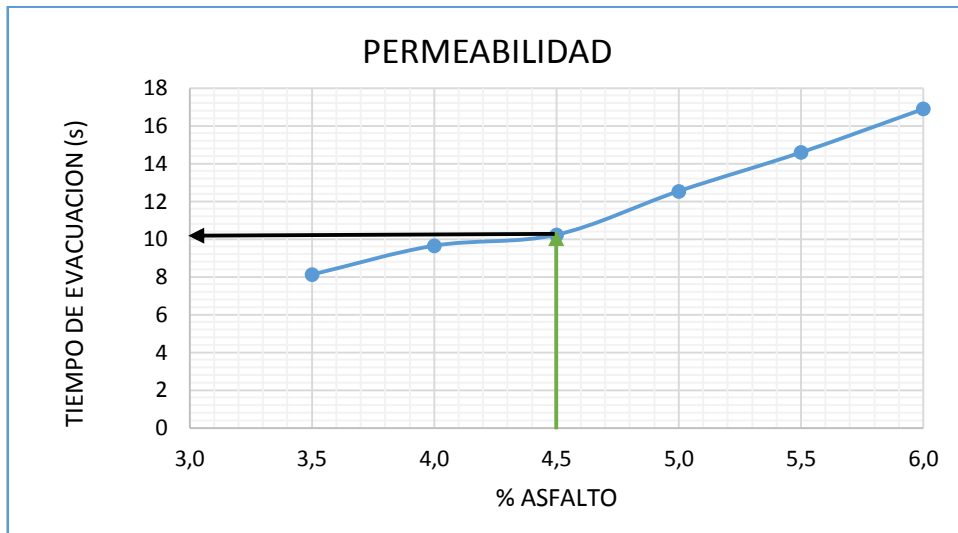


Figura 4.7: Permeabilidad vs porcentaje de asfalto. Fuente: Elaboración propia.

Para un contenido de asfalto de 4.5% se obtiene tiempo de evacuación de 10.23 seg.

#### 4.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL MÉTODO CÁNTABRO.

A continuación se presentara una tabla que muestra los resultados obtenidos en los análisis y los requerimientos que imponen las normas.

CRITERIOS DEL MÉTODO CÁNTABRO	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES	COMPARACIÓN
Vacíos	19.28%	20% < vacíos < 25%	CUMPLE
Permeabilidad.	10,23	100 ml en 15 s.	CUMPLE
Desgaste Cántabro Seco	23,66	< 25%	CUMPLE
Desgaste Cántabro Hum.	35,83	< 40%	CUMPLE
Contenido de asfalto	4,50%	≥ 4,5%	CUMPLE

Tabla 4.31: Resumen de Resultados. Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar que los resultados obtenidos en laboratorio son satisfactorios ya que son los establecidos por norma, por lo que se considera que el diseño de la mezcla con un 4.5% de asfalto nos proporcionara un porcentaje de vacíos óptimo, que es lo que estamos buscando en el presente trabajo.

#### 4.6 DISEÑO MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL.

En nuestro departamento, tanto las mezclas drenantes como el ensayo de Cántabro no son usadas comúnmente, sin embargo el método más común y el que más se usa es diseño de mezclas mediante el método Marshall, en el cual la evaluación de la estabilidad de la mezcla representa el parámetro más importante para la selección del contenido óptimo de asfalto.

Se considera prudente, en el presente trabajo realizar esta prueba a la mezcla drenante que ya cuenta con el porcentaje óptimo de asfalto con el propósito de establecer comparaciones y para obtener mayor información acerca de la misma.

El ensayo de estabilidad de Marshall evalúa la carga bajo la cual la muestra o briqueta falla.

El procedimiento se realizó de acuerdo a norma (AASHTO T 245) y con la granulometría usada para el diseño de la mezcla (80% de grava, 15% de arena y 5% de filler), y con el contenido óptimo de asfalto obtenido mediante el ensayo de Cántabro, que era de 4.5%.

Se realizó el ensayo con 4 muestras o briquetas, y a continuación se presentara el cálculo para una de ellas.

**DISEÑO MARSHALL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS  
PARA UN CONTENIDO DE ASFALTO DE 4,5%**

**DATOS**

Peso de la Briqueta	Seco (g) (Psec)	998,1
	Saturado con superficie seca (%) (PSSS)	1021,9
	Sumergido en agua (%) (Psum)	507,8
	Altura de la briqueta (cm) (h)	6,09
	Peso específico de la grava (1/2")	2,59
	Peso específico de la arena (γarena)	2,74
	Peso específico del filler (cal)	1,00
	Peso específico del asfalto (γasf)	1,01
	Lectura del dial de estabilidad (0,0001plg) (Ldial)	275
	Lectura del dial de fluencia (1/100 mm) (Ldialf)	190

**CALCULOS**

Peso específico de los agregados

$$G_{agreg} = \frac{PA}{VA} = \frac{100}{\frac{80}{\gamma_{1/2}} + \frac{15}{\gamma_{arena}} + \frac{5}{\gamma_{filler}}}$$

$$G_{agreg} = 2,546 \text{ gr/cm}^3$$

Volumen de la  
briqueta

$$Vol = P_{SSS} - P_{sum}$$

$$Vol = 514,1 \text{ cm}^3$$

Densidad real

$$D_{real} = \frac{P_{sec}}{Vol}$$

$$D_{real} = 1,941 \text{ gr/cm}^3$$

Densidad máxima  
teórica.

$$D_{maxteo} = \frac{100}{\frac{\%Asf}{\gamma_{asf}} + \frac{100 - \%Asf}{G_{agreg}}}$$

$$D_{maxteo} = 2,383 \text{ gr/cm}^3$$

Porcentaje de vacíos de la mezcla  
total

$$\%VMT = \frac{D_{maxteo} - D_{real}}{D_{maxteo}} * 100$$

$$\%VMT = 18,54 \%$$

Vacíos del agregado  
mineral

$$VAM = VMT + \frac{\%Asf * D_{real}}{\gamma_{asf}}$$

$$VAM = 26,71 \%$$

Relación Betumen  
vacíos

$$RBV = \frac{VAM - VMT}{VAM} * 100$$

$$RBV = 32,59 \%$$

Estabilidad Marshall

$$EST = \frac{4 * 10^{-6} * Ldial^3 - 3,8 * 10^{-3} * Ldial^2 + 5,55 * Ldial + 11,768}{0,4536}$$

$$EST = 2940,54 Lb$$

Fluencia Marshall

$$FLU = \frac{Ldialf}{25,4 * 100}$$

$$FLU = 0,071 plg/100$$

La estabilidad de la mezcla es medida en el dial en diezmilésimas de pulgada utilizando una ecuación de calibración, que relaciona el desplazamiento de la prensa con la carga que está siendo aplicada, se puede encontrar la carga en libras ejercida.

DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS DRENANTE METODO MARSHALL		UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAE SARACHO																		
<p style="text-align: center;">ESTRATURA</p> <p style="text-align: center;">Cemento Asfáltico AASHOTM 20 ASFALTOS (BRASIL)</p> <p style="text-align: center;">BETUFLEX 60/85</p> <p style="text-align: center;">Peso Especifico Total AASHOT T-228 1,010</p>		<p style="text-align: center;">No.de Golpes/Capa 50</p>																		
<p>Pesos Especificos (AASHOT -100, T-85)</p> <p>Mat. Retenido Tamiz N° 4 2,614</p> <p>Mat. Pasa Tamiz N° 4 2,304</p> <p>Peso Especifico Total 2,546</p>		<p>% de Agregados</p> <p>80</p> <p>20</p> <p>100</p>																		
Peso Esp. Max. de Mezclas Compact. (AASHOT T-96)																				
Peso Esp. Max. de Mezclas Compact. (AASHOT T-209)																				
N° Probeta	Altura de Probeta	Peso Probeta		Vol.	Densidad Probeta		Densidad Máxima Teórica	% de Vacíos		LEC. DIAL	Estabilidad Marshall		Carga Promedio	Flujo						
		Base Agregado	Base mezcla		Seco	Sat. Sup. Seca		Sumergida en Agua	Probeta		Densidad Real	Densidad Promedio			Total	V.A.M. (Vacíos Agregados Mineral)	R.B.V. (Relación Betumen Vacíos)	Carga	Factor corrección	Carga Real Corregida
		%	%	grs.	grs.	grs./cm3	grs./cm3	grs./cm3	%	%	Libras	Libras	Libras	En 1/100 pulgadas						
1	6,10	4,7	4,7	998,1	10219	5078	514,1	1941			275	2940,54	1071	3149,32	0,071	3452	1078	3189,91	0,072	7,18
2	6,11	4,7	4,7	997,4	10192	509,3	509,9	1956			270	2892,37	1068	3069,05	0,073					
3	6,0	4,7	4,7	998,5	10193	507,1	512,2	1949			280	2988,66	1071	3200,85	0,072					
4	6,08	4,7	4,7	997,5	10167	509,8	506,9	1968	1954	2,383	18,01	26,71	32,59	275	2940,54	1078	3189,91	0,072	7,18	

Tabla 4.32: Resultados de la estabilidad y fluencia mediante el método Marshall. Fuente: Elaboración propia

#### **4.6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MÉTODO MARSHALL.**

La estabilidad de una mezcla asfáltica es la medida de su resistencia a sufrir una deformación, una elevada estabilidad no es un sinónimo de calidad y durabilidad de la mezcla. Analizando los resultados obtenidos, se puede verificar que la mezcla asfáltica drenante alcanzó valores más elevados. Sin embargo, es importante mencionar, que todos los valores de este tipo de mezcla entran dentro de las especificaciones sugeridas por el Instituto de Asfalto para una mezcla asfáltica de pavimentación para vías con tráfico pesado (1800 lb). Característica que momentáneamente, hace aplicable el método.

La fluencia de una mezcla asfáltica es la medida de la deformación, hasta el punto de ruptura o falla. Detallando las características observadas en ambas mezclas, es llamativo que ambas alcanzan una fluencia permitida por las especificaciones, para un mismo contenido porcentual de asfalto.

Siendo el límite superior de las especificaciones 14 plg/100 y el inferior 8 plg/100, se puede observar que el resultado obtenido en promedio de las 4 briquetas ensayadas es de 7.18 plg/100, se aprecia que el resultado no se encuentra dentro del rango apropiado, pero tampoco se encuentra lejos de lo requerido por lo que en un futuro se deberán realizar más ensayos para poder perfeccionar este tipo de mezclas asfálticas.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### **5.1 CONCLUSIONES.**

- Los materiales pétreos a ser utilizados deberán ser cuidadosamente seleccionados con el objeto de cuidar que sean representativos de los mismos y puedan así garantizar una correcta dosificación, ya que si no se hace esto, puede influir de forma determinante en el trabajo final.
- Es de suma importancia la utilización de un asfalto modificado para este tipo de mezclas, ya que las partículas necesitan ser envueltas correctamente para que puedan formar una buena estructura y así evitar problemas que se pueden presentar durante la exposición permite del aire y del agua, que son el uso que se les da a este tipo de mezclas.
- El desgaste de cántabro seco estará garantizado por un óptimo contenido de asfalto y este deberá garantizar a su vez el contenido óptimo de los vacíos y el porcentaje de los mismos, así como también la permeabilidad de la mezcla.
- El ensayo de cántabro húmedo nos sirve para comprobar la adhesividad entre el agregado grueso y el asfalto, un resultado que no cumpla con lo requerido por la especificación, no necesariamente demuestra que el contenido de asfalto utilizado no es adecuado, sino que evidencia una mala adhesividad agregado-asfalto lo que puede solventarse mediante el uso de un aditivo que mejore su adherencia.
- En el trabajo desarrollado en laboratorio se utilizó una dosificación grava, arena, filler de 80%, 15% y 5% respectivamente, para lograr el alto contenido de vacíos requerido (de acuerdo a la especificación utilizada en esta investigación), se necesita de una granulometría especial, la cual se obtiene mediante un alto porcentaje de agregado grueso de más del 80% como mínimo, aproximadamente.

- El ensayo cántabro en condición seca, evalúa la cohesión que existe entre las partículas de la mezcla mediante el uso de la Máquina de los Ángeles, mismo equipo que se utiliza para el ensayo conocido como cántabro húmedo, el primero, determinante en el método de diseño empleado en la investigación; tanto el conocimiento y disponibilidad de este equipo se tienen localmente, por lo que la implementación del método de diseño desarrollado, resultaría factible, y rápido.
- Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de Cántabro seco y húmedo nos muestran que gran parte de la cohesión de la mezcla la aporta el asfalto, se observa que hay una variación muy alta entre el 3.5% al 5% de contenido de asfalto, obteniendo desgastes desde el 13.8% hasta casi un 43.5%, y esto con tan solo varias pocas puntos porcentuales en el contenido de asfalto.
- En cuanto a la prueba de estabilidad de Marshall podemos observar que los resultados obtenidos están dentro de los establecidos por norma para el diseño de la mezcla drenante.
- En la siguiente tabla podemos observar el porcentaje de vacíos obtenidos con un porcentaje de asfaltos de 4.5%. El porcentaje de vacíos obtenido con dicho porcentaje de asfalto es de 19.28%, mismo que se aproxima al 20% recomendado por la norma INV 453-07 (INVIAS).

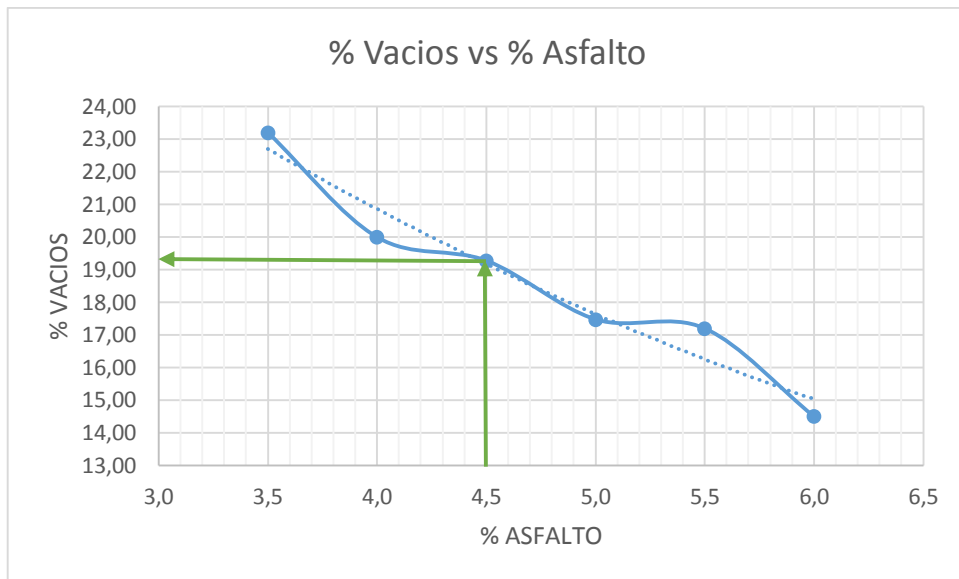


Figura 5.1: Tabla de Validación del porcentaje de asfalto y vacíos óptimos obtenido en el trabajo realizado. Elaboración propia.

- Los resultados obtenidos en el presente trabajo fueron cumplidos, el porcentaje de vacíos alcanzado nos muestra que la mezcla muestra las características mecánicas de estabilidad y fluencia deseadas para poder ser utilizadas en nuestro departamento.
- Es importante mencionar que el presente trabajo puede ser el principio para la realización de mayores investigaciones acerca del tema, ya que para un Ingeniero el buen desempeño de su trabajo y el perfeccionamiento del mismo es muy importante para poder brindar al usuario de las vías la comodidad y seguridad que tanto se desea.

## 5.2. RECOMENDACIONES.

- Esta investigación representa un inicio en lo que respecta al diseño de mezclas asfálticas drenantes, la información aquí presentada debe servir como incentivo para desarrollar nuevas investigaciones que amplíen los conocimientos ya adquiridos.
- El tamaño máximo del agregado grueso utilizado fue de  $\frac{3}{4}$ ", sin embargo debe de realizarse un estudio con tamaño máximo de  $\frac{1}{2}$ ", y establecerse parámetros de comparación entre estos y así determinar conveniencias.
- El material utilizado como filler fue cal, ya que presenta buenas características en el diseño de este tipo de mezclas.
- Aunque la especificación utilizada en el presente trabajo no contempla un procedimiento bien definido para la evaluación de la permeabilidad, debe establecerse uno, con el objeto de estandarizar las condiciones de ensayo y así evitar grandes variaciones.
- El porcentaje de vacíos obtenido en el trabajo fue de un 19.28%, resultado que se aproxima al 20% especificado por norma y que lo adoptamos como óptimo, sin embargo se deben realizar nuevos diseños de manera que se logre alcanzar un mayor contenido de vacíos, tomando como referencia la metodología planteada en el presente trabajo.

### 5.3 BIBLIOGRAFIA

- MONTEJO FONSECA Alfonso, “Ingeniería de Pavimentos para Carreteras”, Editorial de la Universidad Católica de Colombia, Tercera edición, Santa Fe de Bogotá, 2006.
- INSTITUTO DEL ASFALTO DE LOS ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMERICA, “Tecnología del Asfalto y Prácticas de Construcción”, 1985.
- MORA, GERMAN Y PEREZ, GABRIEL. Comparación de Mezclas Asfálticas Drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar. Universidad Militar “Nueva Granada”, Julio de 1998, Revista de la Facultad de Ingeniería.
- O. REBOLLO; R. GONZÁLEZ Y G. BOTASSO. Determinación del porcentaje de ligante optimo, en Mezclas asfálticas abiertas”. LEMaC UTN La Plata Argentina.
- UNIVESITAT POLITECNICA DE CATALUNYA, “Mezclas Asfálticas Drenantes”, España.
- UNIVERSIDAD JAVIERANA, “Caracterización dinámica de una mezclas asfáltica drenante”, Bogotá, Colombia.
- VALLE RODAS RAUL, “Carreteras, Calles y Autopistas” (Sexta Edición), 1999.
- JOHN JAIRO GARCIA PEÑA “Diseño Metodológico”, 2009
- MARIO JAIR “Asfaltos Drenantes”, Chile, Pro-Vial Chile, 2002
- AURELIO RUIZ RUBIO “Panorámica española de las mezclas bituminosas en caliente”, España, Artículo de INTEVIA, Artículo Núm. 149, Nov-Dic 2006.

### ESPECIFICACIONES Y NORMAS.

- ASTM D 2493 Viscosiy-Temperature Chart for Asphalt, 2000
- ASTM D5976 Standard Specification for Type I Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction, 2000.
- ASTM D5840 Standard Specification for Type II Polymer Modified Asphalt

- Cement for Use in Pavement Construction, 2000.
- ASTM D5841 Standard Specification for Type III Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction, 2000.
  - CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS.  
NLT-149/91 Resistencia al Desgaste de los Áridos por medio de la Maquina de Los Ángeles, Normas de laboratorio de Transporte, España, 2000.
  - CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS.  
NLT-159/00 Resistencia a la Deformación plástica de Mezclas Bituminosas empleando el aparato Marshall, Normas de laboratorio de Transporte, España, 2000.
  - CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS.  
NLT-327/00 Permeabilidad in situ de Pavimentos Drenantes con el Permeámetro LCS, Normas de laboratorio de Transporte, España, 2000.
  - CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS.  
NLT-352/00 Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste, Normas de laboratorio de Transporte,
  - CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS.  
NLT-362/92 Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste. Normas de laboratorio de Transporte, España, 1992.
  - COMISIÓN PERMANENTE DE ASFALTO, SUBCOMISIÓN REDACCIÓN DEESPECIFICACIONES, Especificaciones Técnicas Generales de Concretos Asfálticos Drenantes (CAD 12) para Carpetas de Rodamiento. Argentina, 2005.
  - DIRECCION DE VIALIDAD, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, Manual De Carreteras, Volumen Nº 5 Especificaciones Técnicas Generales De Construcción, Chile, 2003.

- DIRECCION DE VIALIDAD, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, Manual De Carreteras, Volumen Nº 8 Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control, Chile, 2003.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Articulo 453 Mezcla Drenante, Colombia, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Articulo 400 disposiciones generales para la ejecución de riegos de Imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de Arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y En caliente y reciclado de pavimentos asfálticos, Colombia, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Norma de Ensayo 736 Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas Compactadas densas y abiertas, Colombia, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Norma de Ensayo 712 Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos (Aparato de Anillo y Bola), Colombia, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Norma de Ensayo 706 Penetración de los Materiales Asfálticos, Colombia, 2007.