

1.1 Introducción

La mayor parte de las estructuras que se diseñan y construyen en el mundo son de Pavimento flexibles o cuentan con rodaduras o superficies construidas con capas asfálticas. Más del 90% de las vías en el mundo están construidas en pavimento asfáltico.

Para la construcción de este tipo de estructuras, en algunas ocasiones, el agregado pétreo que se explota en canteras no cumple los requisitos mínimos de calidad que exigen las especificaciones técnicas de construcción para conformar capas granulares de sub-base y base, generando la necesidad de estabilizar estos últimos materiales durante la construcción de obras viales, adicionándoles y ligándolos principalmente con cemento asfáltico. Cuando el ligante que se utiliza para cohesionar los granulares es el CA, la mezcla asfáltica resultante adquiere la denominación de material granular estabilizado con asfalto en caliente. Adicionalmente, el uso de estos materiales ha venido creciendo en los últimos años como reemplazo de las bases o sub- bases granulares no tratadas para soportar la capa asfáltica en pavimentos flexibles, principalmente en proyectos donde se necesitan plataformas más rígidas y menos permeables, o en zonas donde extender y compactar granulares se dificulte (p.e., zonas de alta precipitación).

Uno de los principales problemas que tiene la construcción de este material granular estabilizado en climas templados como la ciudad, es que el decaimiento de la temperatura, desde su fabricación hasta su compactación, puede ser de hasta 30°C, al no realizar una correcta planificación en el proceso constructivo.

La provincia Cercado se encuentra dentro las Isotermas 14 – 19 ° C y dentro las Isoyetas 800 a 1100 mm. De acuerdo a los datos obtenidos de las 9 estaciones climatológicas que se encuentran en la provincia la temperatura media anual de 17.4° C, la máxima media de 25.5° C, mínima de 9.4° C, se tiene en verano extrema máxima de 39.4° C, y extrema mínima de invierno de -8.6°C.; El contenido de CA que se utiliza para cohesionar el agregado pétreo es generalmente entre 5,0% y 6,0% con respecto a la masa de los agregados, en comparación con otros tipos de mezcla; Las distancias desde las plantas de producción de mezcla asfáltica hasta el sitio de la obra son grandes. Adicionalmente, la ciudad presenta problemas de congestión vehicular y movilidad. En algunas ocasiones, las volquetas transportadoras del material pueden demorar entre 1 y 2 horas desde la planta de asfaltos hasta el sitio de obra;

Tarija es una ciudad con un clima templado árido, y sus temperaturas varían de acuerdo a diferentes momentos. Bajo estas condiciones climáticas, las volquetas pueden permanecer en el sitio de la obra entre 30 minutos y 3 horas antes de que el interventor permita al contratista la extensión de la mezcla, previo al secado de la superficie humedecida por la lluvia; Constructivamente, es muy común que se extienda el material en un gran tramo de vía antes de su compactación. La mezcla puede durar extendida entre 10 y 20 minutos antes de su compactación.

También se reporta de manera general, que la influencia de la temperatura de compactación sobre las propiedades de mezclas asfálticas en caliente, depende del tipo de ligante asfáltico utilizado y principalmente de la granulometría empleada, ya que estos resultados solo serán para este tipo de mezcla asfáltica, este cemento asfáltico y esta granulometría. La aplicación en otros proyectos solo podrá ser usada de manera referencial, aunque se cuente con el mismo material granular y solo se utilice un solo tipo de cemento asfáltico.

El objetivo del presente estudio es analizar el cambio que experimenta las propiedades de la mezcla, bajo diferentes temperaturas de compactación. Para evaluar la resistencia de la mezcla se ejecutaron ensayos Marshall (AASHTO T 245-97).

La mezcla analizada, fue fabricada empleando con el cemento asfáltico que se utilizan en la ciudad de Tarija (CA 80-100). Adicionalmente, se empleó la granulometría de la mezcla y fueron compactadas bajo temperaturas de 110°C y 180°C en laboratorio, siendo 130°C, la temperatura de compactación inicial o de referencia de las mezclas en laboratorio.

La granulometría analizada, es la que comúnmente se encuentra en nuestro medio. Este tipo de mezcla y granulometría fue la escogida, debido a que es la más utilizada en obra y puede ser empleada como capa de base o sub-base en estructuras flexibles para cualquier nivel de tráfico.

1.2 Justificación

Esta investigación se la realiza para identificar, analizar y facilitar la información a las autoridades municipales, gubernamentales, estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil y público en general que se encuentre interesado sobre algunas de las causas que originan el deterioro de las calles y avenidas de la ciudad de Tarija por la falta de control de temperaturas

al momento de realizar la colocación de la mezcla en plataforma por diferentes aspectos, como ser ambientales y las distancias que estas cubrirían y el tiempo de traslado del mismo. Como estudiantes de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (U.A.J.M.S.) preocupados por el estado en el que se encuentren las calles de la ciudad y con las facilidades cognitivas que estamos adquiriendo en la universidad, brindamos un estudio de carácter investigativo científico aplicable a la realidad del entorno en que nos desenvolvemos a beneficio de la colectividad, como muestra palpable del desarrollo y mejoramiento académico acorde a las actuales exigencias globales.

En base a esta investigación se genera información que puedan ser utilizadas para tomar en cuenta en el diseño de las vías y así contrarrestar el deterioro que ella se origina, de tal manera, que podamos tener una ciudad en buen estado, permitiendo un mejor estado de la carpeta.

Por tal razón es de mucha importancia tener la información necesaria y conocimientos sobre las mezclas asfálticas y los efectos que producen en las propiedades de las mismas que tendrán a diferentes temperaturas de compactación.

En virtud de lo expuesto es recomendable como estudiante de la carrera de ingeniería civil que se tenga muy en cuenta los agentes atmosféricos que se presentan en la ciudad de Tarija, ya que el clima que se presenta es muy cambiante, llegando a extremos que si no son considerados generaran desperfectos en la carpeta.

1.3 Diseño Teórico

1.3.1 Planteamiento del Problema

1.3.1.1 Situación Problemática

En la ciudad de Tarija, no se brinda el interés necesario a la incidencia que tiene la temperatura de compactación sobre las propiedades de las mezclas asfálticas. Y si a esto agregamos que la elección del asfalto para el diseño de una mezcla se basa en procedimientos de clasificación de asfaltos a partir de ensayos determinados en laboratorio y otros procesos experimentales que solo pueden garantizar que la carpeta asfáltica soporte la carga de diseño, nos vemos en el problema de no poder garantizar un buen desempeño de la carpeta asfáltica

ante diferentes condiciones ambientales, elevadas cargas vehiculares y bajas velocidades de circulación, que son las principales causas de deterioros que se presentan en los pavimentos.

El hecho de no poder controlar estas temperaturas a las que llega a la plataforma y que no se tenga sistemas de control de las mismas en la colocación, o la omisión de las mismas, darán lugar a que se realice un pavimentado que no pueda cumplir con los parámetros de diseño de las mismas.

Las calles de la zona urbana de la ciudad de Tarija y sus alrededores al ser muy transitadas, presentan déficit en la calidad material asfáltico, ya que causa un malestar en conductores, habitantes y peatones que circulan por dichas calles y da una mala presencia a la ciudad afectando al turismo local y nacional.

1.3.1.2 Problema

¿Cómo influirá la temperatura de la mezcla asfáltica en caliente al momento de realizar la compactación en la plataforma, en las propiedades físico-mecánicas de la misma que se utilizan para el pavimentado en la ciudad de Tarija?

1.4 Hipótesis

“La temperatura de compactación influye directamente en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente”

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Determinar la influencia de la temperatura de compactación de las mezcla asfáltica en caliente con la finalidad de proponer una base de estudio sobre la variación de sus características y propiedades físico-mecánicas de las mezclas que deberán ser tomadas en cuenta para evitar el acortamiento de su vida útil.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Realizar un levantamiento de la información sobre agregados, cemento asfáltico y las mezclas asfálticas que se utilizan en el pavimentado de las calles de la ciudad.

- Realizar toma de muestras, ensayos de caracterización de los agregados y el cemento asfáltico y la obtención del contenido óptimo de cemento Asfáltico por el método Marshall.
- Realizar la variación de diferentes temperaturas de compactación de la mezcla asfáltica en base del procedimiento del Método Marshall, y realizar un análisis de los resultados y los gráficos del mismo.

1.6 Variables

Variable Independiente:

Temperaturas de compactación de las mezclas asfálticas en caliente.

Variables Dependientes:

Propiedades físico- mecánicas de las mezclas asfálticas.

1.7 Diseño Metodológico

1.7.1 Componentes

1.7.1.1 Unidades de Estudio y Diseño Muestral

En la presente investigación se medirán la variación de las propiedades físico–mecánicas por producto de las diferentes temperaturas de compactación de las mezclas asfálticas al momento de encontrarse en plataforma de la ciudad de Tarija.

1.7.1.2 Población

Mezcla asfáltica utilizada para el pavimento flexible de las calles de la ciudad de Tarija

1.7.1.3 Muestra

Mezclas asfálticas en caliente producidas en la planta de San José de Charaja.

1.7.2 Métodos y Técnicas Empleadas

Se plantea utilizar una investigación descriptiva (Investigación No Experimental), que ayudará a determinar las propiedades y características del objeto en estudio.

Para la obtención de muestras será un proceso planificado con el Servicio Departamental de Caminos en los Bancos de Materiales de agregados y zonas de almacenamiento del cemento asfáltico, ya que los mismos se encuentran en una zona alejada y es un sitio privado.

Para las muestras de material granular, según el procedimiento de la norma, del Método para Extraer y preparar Muestras AASHTO T2-91, se toma las muestras de tal manera que se verifica que tenga las características requeridas, tanto material grueso y fino, ya sean canto rodado o material chancado, de San José de Charaja-Chocloca.

Por producto de la chancadora se pudo evidenciar material granular de 3/4'', 3/8'' y arena chancada, y también se obtuvo muestra de arena Natural.

Se obtuvo aproximadamente 50 kg, para las muestras de 3/4'' y 3/8'' y 30 Kg. Para la arena natural y chancada. Estas muestras se obtuvieron de la parte central de los depósitos de bancos, de manera que la misma no tenga demasiado grueso ni demasiado fino por producto de la gravedad.

Una vez realizado la toma de muestras, procedemos a realizar una verificación visual del estado de la misma, de manera que se tuvo que vaciar las muestras en el laboratorio para realizar una buena distribución de las mismas para los diferentes ensayos. La muestra luego de transportada a laboratorio, se cuartaba y separaba para que sea homogénea, y no producir diferentes datos que darían por consiguiente, diferentes resultados.

Se informa que al momento de realizar la inspección visual se sabía no había disponibilidad de la arena natural, que luego influenciara para el diseño.

Para la toma de muestras del Cemento asfáltico se procedió con los ensayos de control de calidad del cemento asfáltico procedentes del depósito de almacenamiento que se encuentra en San José de Charaja en los predios de laboratorios del SEDECA.

El realizar el proceso de obtención de muestras se obtuvo a partir de turriles de almacenamiento del depósito, según el procedimiento de obtención de muestras de Cemento asfáltico A0 101 y 1 AASHTO T40, de aproximadamente de 2 Kg de muestra.

Se verificaba que las muestras obtenidas se encuentren libres de todo agente perjudicial y libre de humedad, y que los mismos turriles se encuentren debidamente sellados.

Con las 2 muestras obtenidas, se procederá a la elaboración de muestras de mezclas asfálticas en caliente, que son elaboradas en los laboratorios del SEDECA, y base al procedimiento Marshall.

Para la investigación se eligió el Ensayo Marshall, ya que este método es el más utilizado en nuestro medio de manera que nos facilita los datos de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica que es el objetivo de la investigación. Aunque la Universidad no contaba con el equipo completo para realizar el Ensayo Marshall, el mismo estaba disponible en los laboratorios del Servicio Departamental de Caminos, y junto a los materiales e instrumentos para la caracterización de los agregados y cemento asfáltico.

Debido a la complejidad y el procedimiento de los ensayos de caracterización, y el procedimiento Marshall, los mismos se encontraran más detallados en la parte de anexos.

Para la extracción de las muestras se utilizaron técnicas de muestreo no probabilísticos ya que el material granular y el cemento asfáltico tienen un proceso que estará condicionada por la facilidad de la extracción de la misma, que serán recogidas en las canteras

1.7.2.3 Descripción de Objetos para la Obtención de Datos

Las herramientas y materiales utilizadas en este proceso son:

- Pala: Para poder obtener las muestras de material granular, ya sea filler o natural.
- Pico: Para poder extraer las muestras de cemento asfáltico.
- Bolsas Azucarera de 1 quintal: Para transportar el material granular.
- Latas de leche de 5Kg: Para traer el cemento asfáltico

Con los 2 elementos esenciales se realizarán las briquetas en laboratorios, y la obtención de datos necesarios:

- Equipo de compactación y Rotura de briquetas Marshall.
- Hornalla, Balanza y pesas
- Baño María y fuentes.
- Equipos de caracterización del material granular y cemento asfáltico.

1.7.2.4 Procedimiento

Procederemos a obtener las muestras con el material necesario, ya sea agregados o cemento asfáltico. Continuamos con la caracterización de los mismos en base a los ensayos que se encuentran sustentados en la Norma Boliviana y la AASHTO, de manera que cumplan las especificaciones establecidas. Cumpliendo las mismas se procede a realizar el Ensayo

Marshall según el procedimiento, para así poder obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico. Obteniendo este dato nos enfocamos en el motivo de la investigación, el diseñar con ese contenido óptimo briquetas de mezcla asfáltica a diferentes intervalos de temperatura. Obtener resultados de las características físico-mecánicas de la mezcla y realizar las conclusiones del tema.

1.7.3 Análisis e Interpretación de la Información

Con los datos obtenidos con la investigación, procederemos a obtener valores promedios y junto a estos obtener graficas de las propiedades de la mezcla asfáltica, las cuales al tener datos dispersos, se tendrá q realizar el ajuste correspondiente con la estadística (mínimos Cuadrados).

1.7.3.1 Promedio o Media Aritmética

Es el resultado de la sumatoria de los valores obtenidos de las muestras en el laboratorio dividido sobre el número de muestra.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{N}$$

Donde:

\bar{X} = Media aritmética o Promedio

X_1, X_2, X_3 = Masa de las muestras de laboratorio

N = Número de muestras.

1.7.3.3 Correlación de datos por Mínimos Cuadrados

El procedimiento del mismo se utilizara para obtener las curvas de calibración tanto en diseño del contenido óptimo y para el trabajo de investigación, de manera que se obtenga los valores con mayor precisión. Se trabajara con ecuaciones polinómicas:

$$Y = a * x^n + b * x^{n-1} + \dots \dots \dots + f * X^0 + g$$

En base al cual se requiera obtener y la dispersión de los datos que exista, se obtendrá una ecuación de correlación que obtenga mejor ajuste en el gráfico.

1.8 ALCANCE

Esta investigación estará demarcada sobre la incidencia que se da en las mezclas asfálticas debido a efectos de la temperatura de compactación, en este caso en particular solo se tomara en cuenta los casos hipotéticos que se presentaría en obra o en el momento del colocado, dando a lugar la alteración de las propiedades de la misma, por medio de ensayos que ayuden a determinar el mismo.

La información obtenida de cemento asfáltico, agregado y mezcla asfáltica, es la necesaria para realizar la investigación, tanto como los conceptos básicos de cada uno y sobre procesos de control de la mezcla asfáltica, como los ensayos a realizar en cada uno de ellos.

Solo se realiza la toma de muestras del agregado y el cemento asfáltico primeramente para realizar los ensayos de caracterización de los mismos. Luego para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico en base al ensayo Marshall, el proceso de elaboración de las briquetas primeramente para 18 briquetas para el contenido óptimo.

Las temperaturas de compactación planteadas para la investigación serán de 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C, 160°C, 170°C y 180°C, y para cada una de ellas se realizó 4 briquetas, dando como resultado 32 briquetas de mezclas asfálticas. Donde solo se verá la variación de las propiedades de la mezcla en función de la temperatura de compactación, tanto en los resultados y los gráficos de la investigación, de tal manera que se obtenga diferentes ecuaciones para cada una de las propiedades, con la finalidad de encontrar un intervalo de temperatura donde todavía conserve las propiedades físico-mecánicas establecidas en normas y diferentes especificaciones.

Con los gráficos e interpretación de resultados, tendremos las conclusiones y recomendaciones del tema, de tal manera que se llegara a determinar si se logró alcanzar los objetivos planteados en la investigación, aconsejar los mismos.

2.1 Importancia del Agregado en una Mezcla Asfáltica

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados pétreos y el asfalto que para nuestro caso se usará asfalto normal o sea sin aditivos; los agregados por su parte son de una gran importancia ya que en una mezcla asfáltica constituyen entre el 90 y el 95 % en peso, y entre el 75 y 85 % en volumen; es de mencionar que la calidad de la mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales constituyentes y la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los materiales pétreos que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica, específicamente en lo que se refiere a una buena distribución granulométrica. Una pequeña variación en el porcentaje de un determinado tamaño de agregado o en las propiedades de éste puede causar cambios significativos en las propiedades de la mezcla elaborada por lo tanto es necesario llevar un control eficiente de los agregados que se está usando en la planta de producción de mezcla lo cual puede comprender:

- Control de calidad del agregado que se produce en la planta trituradora.
- Acopio de agregados.
- Alimentación en frío de agregados.

El control de la calidad del agregado usado es un factor crítico en el comportamiento de una carpeta de concreto asfáltico, sin embargo, además de la calidad se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación, estos criterios incluyen el costo, la disponibilidad del agregado su origen y además, deberá cumplir con ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para concreto asfáltico de buena calidad.

2.2. Tipos de Agregados

2.2.1 Definición de Agregado

Agregado, es un material granular duro de composición mineralógica, usado para ser mezclado en diferentes tamaños de partículas graduadas, como parte de una mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen la arena, la grava, la escoria de alto horno, o la roca triturada y polvo de roca. El comportamiento de un pavimento se ve altamente

influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad soportante.



Figura 1. Explotación de Agregados



Figura 2. Almacenamiento de Áridos

2.2.2 Conceptos para Tipos de Agregados

Entre los conceptos más usados relacionados a los agregados se encuentran:

- Agregado Grueso – Agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4).
- Agregado Fino – Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4) y queda retenido en el tamiz de 75 μ m (No. 200).
- Polvo Mineral – La porción de agregado fino que pasa el tamiz No. 200.
- Relleno Mineral – Producto mineral finamente dividido en donde más del 70% pasa el tamiz de 75 μ m (No. 200).

- Agregado de Graduación Gruesa – Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños gruesos.
- Agregado de Graduación Fina - Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños finos.
- Agregado Densamente Graduado – Agregado con una distribución de tamaños de partícula tal que cuando es compactado, los vacíos que resultan entre las partículas, expresados como un porcentaje del espacio total ocupado, son relativamente pequeños.
- Agregado de Graduación Abierta – Agregado que contiene poco o ningún llenante mineral, y donde los espacios de vacíos en el agregado compactado son relativamente grandes.
- Agregado Bien Graduado – Agregado cuya graduación va desde el tamaño máximo hasta el de un llenante mineral con el objeto de obtener una mezcla bituminosa con un contenido de vacíos controlado y alta estabilidad.

2.2.3.1 Clasificación de los Agregados

Los agregados usados en pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados, y agregados sintéticos o artificiales.

2.2.3.1.1 Agregados naturales

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Así mismo, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena. La grava se define, usualmente, como partículas de un tamaño igual o mayor que tamiz No. 4. La arena se define como partículas de un tamaño menor que tamiz No. 4 pero mayor que el tamiz No. 200. Las partículas de tamaño menor que 75 μm (tamiz No. 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

2.2.3.1.2 Agregados Procesados

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que son extraídas de canteras y que deben ser reducidas en tamaño en las plantas trituradoras antes de ser usados en la pavimentación. De la calidad de las rocas que se explotan en las canteras dependerá la calidad de los agregados procesados y dispuestos para ser utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

La roca es triturada por tres razones:

- Para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa,
- Para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y
- Para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas.

En la cantera, antes de trasladar las rocas en su tamaño adecuado a la trituradora, es controlada visualmente la calidad de la roca que se está extrayendo ya que puede darse el caso que las rocas no sean apropiadas para producir agregado de buena calidad que cumpla con todos los requisitos que se establecen para agregado de mezclas asfálticas o cualquier otro uso. El propósito de la trituración de las rocas es principalmente reducir las a un tamaño que sea manejable, el tamaño de la roca que es llevada a la trituradora es aproximadamente del tamaño de la roca que se utiliza para hacer los muros de contención, también los cambios en la textura superficial y apariencia en dureza son muy importantes a la hora de enviar la roca a la trituradora.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partículas. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con las especificaciones establecidas de granulometría. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

2.2.3.1.3 Agregados Sintéticos

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el refinamiento de metales. El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno, una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas al templarla inmediatamente en agua, o al triturarla una vez que se ha enfriado.

Básicamente cualquier agregado que sirve para mezcla asfáltica es bueno para concreto, pero no todo el agregado bueno para concreto sirve para mezcla asfáltica. Los requerimientos que debe cumplir el agregado para mezcla asfáltica son más altos. Las mezclas asfálticas de granulometrías abiertas no utilizan finos, pero una mezcla densa requiere una curva granulométrica que tenga una distribución de todos los tamaños.

2.2.3.2 Propiedades de los Agregados Utilizados en Mezclas Asfálticas en Caliente

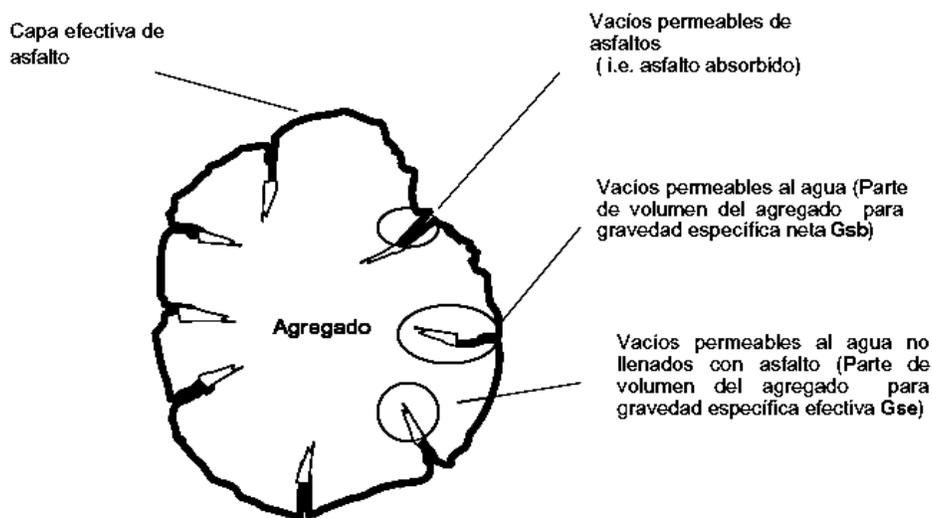


Figura 3. Vacíos en el Agregado

En una mezcla asfáltica en caliente densamente graduada, el agregado conforma el 90 a 95 % en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento de la carpeta de rodadura. Debido a su naturaleza los agregados pueden presentar distintas características e influir de manera diferente en el

comportamiento de la Mezcla Asfáltica. En la Figura 4 se muestra un resumen de las propiedades de los agregados para mezclas asfálticas en caliente. Los diferentes tipos de agregados en cuanto a forma, fuente, tamaño o combinaciones deben cumplir los requerimientos de las especificaciones de la mezcla que van a constituir. Estos materiales pueden tener diferentes propiedades que podrían cambiar las características de construcción de la mezcla. El tipo de trituración usada para procesar el agregado puede afectar la forma de partícula, la cual en últimas circunstancias puede influir en los vacíos del agregado mineral y en el grado de fricción entre ellas. Se prefieren las partículas que se acerquen a la forma cúbica, para las mezclas. La mezcla escogida, así como el diseño de la estructura del agregado, se puede manejar de diferente manera a través de la planta.

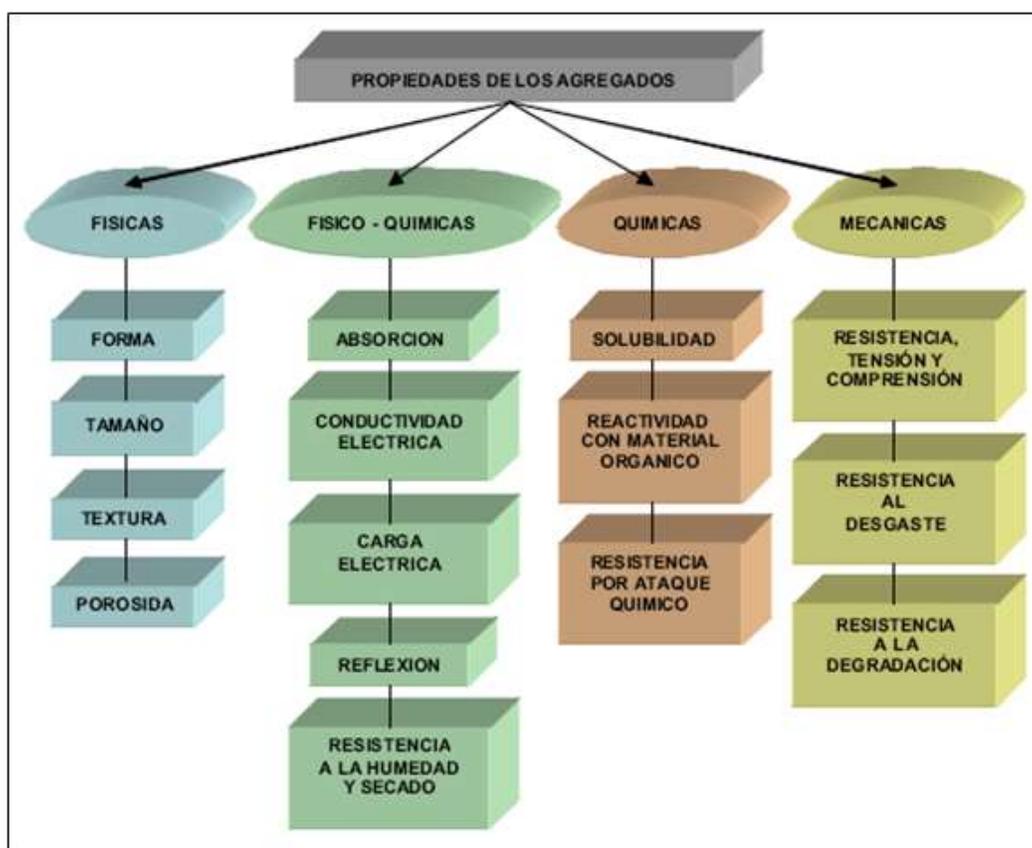


Figura 4. Propiedades en los Agregados

Las propiedades más relevantes a considerar para un agregado apropiado para concreto asfáltico de buena calidad, son las siguientes: Graduación y Tamaño Máximo de Partícula, Textura Superficial, Limpieza, Capacidad de absorción, Dureza, Afinidad con el Asfalto y Forma de la Partícula.

2.2.3.2.1 Graduación

Todas las especificaciones de mezcla asfáltica en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de distribución de diferentes tamaños y que cada tamaño de partículas estén presentes en ciertos porcentajes mayores o menores en una serie de tamices. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas y la graduación para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

2.2.3.2.2 Tamaño Máximo de la Partícula

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas para designar tamaños máximos de las partículas.

2.2.3.2.3 Tamaño Máximo del Agregado

Es designado como el tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de las partículas de agregado.

2.2.3.2.4 Tamaño Máximo Nominal del Agregado

Es designado como el tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices. Para ilustrar las diferencias entre las dos designaciones, considere el siguiente ejemplo: Se efectúa un tamizado de una muestra de agregado que va a ser usada en una mezcla de pavimentación. El tamiz de 19 mm ($\frac{3}{4}$ "") retiene 4% de todas las partículas de agregado. El tamiz de 12.5 mm ($\frac{1}{2}$ ""), inmediatamente por debajo del tamiz de 19 mm, retiene un total de 18% de todas las partículas de agregado. En este caso, el tamaño máximo nominal es 19 mm ($\frac{3}{4}$ ""), y el tamaño máximo es 25 mm (1"). Una mezcla de pavimentación se clasifica de acuerdo a su tamaño máximo o a su tamaño máximo nominal. Por lo tanto, en el ejemplo anterior la mezcla se denominaría "mezcla de 25 mm ($\frac{1}{2}$ "") de acuerdo al tamaño máximo del agregado, mientras que se denominaría "mezcla de 19 mm ($\frac{3}{4}$ "") de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado.

Tabla 1. Designación de la Mezcla usando el Tamaño Máximo Nominal de Agregado

Tamaño de Tamiz		37.5mm (1 ½ pulg)	25.0 mm (1 pulg)	19.0 mm (¾ pulg)	12.5 mm (½ pulg)	9.5 mm (3/8 pulg)
50 mm	(2 pulg)	100	--	-	--	--
37.5 mm	(1 ½ pulg)	90 a 100	100	--	--	--
25.0 mm	(1 pulg)	---	90 a 100	1	--	--
19.0 mm	(¾ pulg)	56 a 80	--	90 a 100	100	--
12.5 mm	(½ pulg)	---	56 a 80	-	90 a 100	1
9.5 mm	(3/8 pulg)	---	--	56 a 80	--	90 a 100
4.75 mm	(No. 4)	23 a 53	29 a 59	35 a 65	44 a 74	55 a 85
2.36 mm	(No. 8)*	15 a 41	19 a 45	23 a 49	28 a 58	32 a 67
1.18 mm	(No. 16)	---	----	-	--	--
0.60 mm	(No. 30)	---	----	-	--	--
0.30 mm	(No. 50)	4 a 16	5 a 17	5 a 19	5 a 21	7 a 23
0.15 mm	(No. 100)	---	--	-	--	--
0.075 mm	(No.200)**	0 a 5	1 a 7	2 a 8	2 a 10	2 a 10
Cemento Asfáltico, porcentaje en peso de total de la mezcla+		3 a 8	3 a 9	4 a 10	4 a 11	5 a 12

* Cuando se consideran las características de la graduación total de una mezcla asfáltica, resulta ser que la cantidad de material que pasa el tamiz de 2.36 mm (No. 8) es un punto importante y conveniente de control de campo entre los agregados finos y los agregados gruesos. Las graduaciones que se aproximan a la cantidad máxima permitida resultarían en superficies de pavimento con textura relativamente fina. Las graduaciones que se aproximan al valor mínimo permitido resultarían en superficies con textura relativamente áspera.

** El material que pasa el tamiz de 0.075 mm (No. 200) puede consistir de partículas finas de agregado o de relleno mineral, o de ambos.

+ La cantidad de cemento asfáltico está dada en porcentaje por peso de la mezcla total. La amplia diferencia en pesos específicos de varios agregados, así como la diferencia en absorción.

2.2.3.2.5 Textura Superficial

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie de la carpeta de rodadura. Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel de lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su

procesamiento, debido a que generalmente contienen superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula. No existe un método directo para evaluar la textura superficial; es tan solo, una característica, como la forma de la partícula, que está reflejada en la resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.



Figura 5. Textura Superficial de Agregados.

2.2.3.2.6 Limpieza

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etcétera) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento. La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No. 200).

2.2.3.2.7 Capacidad de Absorción

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina la porosidad. La capacidad de un agregado de absorber agua ó asfalto es un elemento importante de información; si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades más grandes de asfalto que un agregado menos poroso.

2.2.3.2.8 Dureza

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación, compactación de la mezcla de pavimentación y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en, o cerca de, la superficie, deben de tener mayor resistencia que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que en las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

2.2.3.2.9 Afinidad por el Asfalto

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas y las rocas traqueanas tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies. Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto. Por consiguiente este tipo de agregado, tiende a separarse de las partículas de asfalto cuando son expuestos al agua.



Figura 6. Agregados de Textura Superficial Lisa Repelen el Asfalto.

2.2.3.2.10 Forma de la Partícula

Las exigencias de forma de la partícula varían ligeramente para las mezclas asfálticas. Lo ideal es que las partículas presenten formas cuboides, evitando o restringiendo las formas redondas, planas, alargadas y en forma de lascas, ya que este tipo de forma es muy susceptible a quebrarse bajo condiciones de carga de tráfico, lo que modifica las granulometrías y las propiedades iniciales de las mezclas. La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida. Las partículas irregulares y

angulares benefician al esqueleto mineral debido al rozamiento interno que se genera entre las partículas, esto contribuye a que las partículas gruesas permanezcan en su lugar cuando el pavimento entre en funcionamiento y no se produzcan desplazamientos. El empleo de agregados triturados trae consigo el aumento de la angulosidad de las partículas.



Figura 7. Agregado de forma cúbica (agregado ideal), con aristas.

2.2.4. Especificaciones para Agregados en Mezclas Asfálticas en Caliente

2.2.4.1 Especificaciones Técnicas

Son aquellas que se utilizan para establecer los requisitos de calidad de los materiales pétreos que son utilizados para la elaboración del esqueleto de una carpeta asfáltica, ya que es el agregado que proporcionará la mayor resistencia a las cargas que ejercerá el tráfico he aquí la importancia de presentar las mejores propiedades establecidas en normas, disposiciones tanto internacionales como nacionales, relativos a la ejecución de la obra.

Proveen de un lenguaje común, preciso, y libre de ambigüedades que regula y facilita las interrelaciones que se darán entre las personas involucradas en el proyecto. Las especificaciones técnicas a su vez recurren a normas ya desarrolladas internacionalmente (Ej. ASTM, AASHTO o ABC, etc.), que conforman un estándar de terminologías, ensayos, patrones, etc. que facilitan y hacen útil la experiencia ingenieril en el intercambio de conocimientos tecnológicos a nivel internacional, así como la facilitación de licitaciones internacionales, enmarcadas en la globalización comercial.

Las especificaciones técnicas están incluidas y juegan un papel importante en los documentos de licitación y contratación del contratante (propietario).

2.2.5 Requisitos que Deben Cumplir los Agregados

2.2.5.1 Agregado grueso

Este material debe consistir en piedra o grava de buena calidad triturada (Retenidos en la malla de 4.75 mm) y mezclada de manera que el producto obtenido corresponda a uno de los tipos de granulometría estipulados y llene además los requisitos siguientes:

- Desgaste de los Ángeles, AASHTO T 96 40% máx.
- Sanidad en sulfato de sodio (5 ciclos), AASHTO T 104 12% máx.
- Caras fracturadas, ASTM D 5821 75% mín.
- Laminaridad del Material 15% máx.

2.2.5.2 Agregado fino

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra quebrada cernida, o su combinación y deberá tener una granulometría que (material que pasa la malla 4.75 mm), al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría requerida, y que llene además los requisitos siguientes:

- Sanidad en sulfato de sodio (5 ciclos), AASHTO T 104 12% máx.
- Equivalente de arena, AASHTO T 176 45% mín.
- Límite Plástico No posee

2.2.5.2.1 Especificaciones para agregado fino en mezclas de pavimentos bituminosos, según AASHTO M 29

La graduación del agregado fino será conforme a la graduación en la Tabla 2 para el número de graduación especificado en la orden, u otra graduación designada por el comprador.

Tabla 2. Requerimientos de Graduación para Agregados Finos.

Tamaño de tamiz		Cantidad más fina que cada tamiz de laboratorio (Aberturas cuadradas), Masa, %				
		Graduación No. 1	Graduación No. 2	Graduación No. 3	Graduación No. 4	Graduación No. 5
3/8I	9.5 mm	100	—	—	100	100
No. 4	4.75 mm	95 a 100	100	100	80 a 100	80 a 100
No. 8	2.36 mm	70 a 100	75 a 100	95 a 100	65 a 100	65 a 100
No. 16	1.18 mm	40 a 80	50 a 74	85 a 100	40 a 80	40 a 80
No. 30	600µm	20 a 65	28 a 52	65 a 90	20 a 65	20 a 65
No. 50	30µm	7 a 40	8 a 30	30 a 60	7 a 40	7 a 46
No. 100	150µm	2 a 20	0 a 12	5 a 25	2 a 20	2 a 30
No. 200	75µm	0 a 10	0 a 5	0 a 5	0 a 10	—

Límites de variabilidad en la graduación— Para continuar envíos de agregado fino de una fuente dada, el módulo de finura no variará más de 0.25 del módulo de finura base. El módulo base de finura será el valor que es típico de la fuente, del promedio de los valores del módulo de finura para las primeras 10 muestras en la orden.

Índice de plasticidad — El índice de plasticidad de la fracción que pasa el tamiz de 425- μ m (No. 40) no excederá de 4.0.

El siguiente requisito suplementario será aplicable sólo cuando sea especificado por el comprador en el contrato o la orden.

Sanidad de Sulfato — El agregado fino, estando sujeto a cinco ciclos del ensayo de sanidad según T 104, tendrá una pérdida de peso de no más de 15 por ciento cuando el sulfato de sodio es usado o 20 por ciento cuando el sulfato de magnesio es usado.

2.2.5.2.2 Granulometría de Agregados Combinados (Finos y Gruesos).

Consiste en la combinación de diferentes tamaños de agregado, que debe llenar los requisitos siguientes:

- Granulometría Tabla 2.4
- Grumos de arcilla y partículas friables, AASHTO T 112 1% máx.
- Libre de materiales vegetales, basura, terrones de arcilla y sustancias deletéreas.

Tabla 3. Rango de Valores para Graduación de Agregados para Pavimentos de Concreto Asfáltico en Caliente

Tamiz	Porcentaje de masa pasando, Designación de tamices (AASHTO T 27 y AASHTO T 11)					
	Designación de la Graduación					
	A	B	C	D	E	F
37.5 mm	100 ⁽¹⁾					
25.0 mm	97-100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾			
19.0 mm	—	97-100 ⁽¹⁾	90-100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	
12.5 mm	—	76-88(5)	*(5)	97-100 ⁽¹⁾	97-100 ⁽¹⁾	
9.50 mm	53-70(6)	—	*(6)	—	*(5)	100 ⁽¹⁾
4.75 mm	40-52(6)	49-59(7)	*(7)	57-69(6)	*(6)	33-47(6)
2.36 mm	25-39(4)	36-45(5)	*(5)	41-49(6)	*(6)	7-13(4)
600 μ m	12-22(4)	20-28(4)	*(4)	22-30(4)	*(4)	—
300 μ m	8-16(3)	13-21(3)	*(3)	13-21(3)	*(3)	—
75 μ m	3-8(2)	3-7(2)	3-8(2)	3-8(2)	3-8(2)	2-4(2)

(1) Procedimientos estadísticos no aplican.

* La contratante especifica el valor del rango y límites.

() Desviación permisible

(±) del rango de valores.

2.2.6 Guías de Ensayos para Agregados.

La nomenclatura que se le ha dado a cada guía de ensayo, es diferente a la de la teoría. Para poder llevar un orden, a la hora de que el lector necesite copiar un ensayo.

La Tabla 4 muestra los ensayos que se desarrollan en esta sección:

Tabla 4. Lista de Ensayos que se Desarrollan en esta Sección

Ensayo Número	Norma AASHTO	Título
1.	T 2-91 (2000)	Muestreo de Agregados
2	T 27-99	Análisis por Malla de Agregados Fino y Grueso
3	T 11-97 (2000)	Materiales más Finos que Pasan el Tamiz de 75 μm (No. 200) en Agregados Minerales por Lavado
4	T 19/T19M-00	Densidad Bulk (—Peso Unitario) y Vacíos en los Agregados
5	T 176-02	Finos Plásticos en Agregados Calificado y Suelos por el Uso del Ensayo Equivalente de Arena
6	D 4791-99	Partículas Planas, Partículas Alargadas o Partículas Planas y Alargadas en Agregado Grueso
7	T 104-99(2003)	Ensayo de Sanidad de Agregados por Sulfato de Sodio
8	T 84-00	Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino
9	T 85-91 (2000)	Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso
10	T 96-02	Resistencia al Desgaste de Agregado Grueso de Tamaño Pequeño por Impacto y Abrasión en la Máquina de Los Ángeles

Nota: El procedimiento de los ensayos se realiza de acuerdo a las normas especificadas en la parte de anexos.

2.3 Asfalto

El asfalto es un material viscoso, pegajoso de color negro, usado como aglomerante cementante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras o autopistas. También es utilizado como impermeabilizante. Su consistencia es entre sólido y semisólido a temperaturas ambientales. El uso moderno del asfalto para carreteras y construcción de calles comenzó a finales del siglo XIX, y creció rápidamente con el surgimiento de la industria automotriz.

Desde entonces la tecnología del asfalto ha dado grandes pasos y hoy en día los equipos y los procedimientos usados para construir estructuras de pavimentos asfálticos son mucho más desarrollados y eficientes. Este capítulo trata sobre el asfalto, desde sus antecedentes históricos hasta su composición, propiedades y características.

2.3.1 Propiedades Físicas del Asfalto

Antes que el intercambio de crudo en el mercado fuera algo corriente, las refinerías rara vez cambiaban sus fuentes de abastecimiento de crudo. Esto llevo a que las fuentes de asfalto tuvieran propiedades consistentes. Al integrarse 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, salió la necesidad de poderse evaluar el comportamiento del asfalto ante condiciones particulares y predecir su rendimiento en términos de conocidas formas de esfuerzo. Aun así, algunas propiedades físicas y químicas siguen siendo constantes en todos los tipos de asfaltos.

2.3.1.1 Adhesión y Cohesión

El tema de la adherencia entre el ligante y el agregado es complejo, interviniendo en su estudio un número considerable de variables. La adhesividad se define como la capacidad de un ligante para quedar fijo en el agregado, al que recubre sin peligro de desplazamiento, incluso en presencia de agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente las partículas de agregado en el pavimento terminado.

La falta de adherencia entre el agregado y el ligante asfáltico, ha sido tema de numerosos análisis tendientes a solucionar o disminuir los deterioros originados en los pavimentos como consecuencia de este fenómeno. La misma genera la formación de desprendimientos, los que afectan negativamente a la estructura, ya sea, a nivel de superficie de rodadura o favoreciendo el ingreso de los agentes agresivos a las carpetas inferiores del paquete estructural.

A los fines de analizar la adherencia agregado - ligante, existen innumerables métodos en la gran mayoría de ellos la evaluación se efectúa a partir de una valoración visual del desprendimiento también denominado “stripping”. Esta valoración se lleva a cabo luego de poner en contacto a la mezcla asfáltica (ó una determinada fracción de la misma) con agua bajo condiciones y tiempo determinadas conforme a cada uno de los métodos particulares.

Esto nos lleva a buscar una forma de valorar el fenómeno a través de otro tipo de ensayos o metodologías que, en principio, pongan en evidencia uno de los principales problemas a los cuales conduce una inadecuada adherencia entre agregado y ligante, al menos desde el punto de vista estructural, que consiste en la pérdida de cohesión interna con la posterior disminución de la capacidad portante de las mismas, tal el caso del ensayo de módulo.

2.3.1.2 Susceptibilidad Térmica

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

El Gráfico 1, ilustra este punto, muestra la susceptibilidad a la temperatura de dos asfaltos (Asfalto A y Asfalto B) que tienen el mismo grado de penetración pero que provienen de crudos de diferente origen. Obsérvese que a 25°C la viscosidad de los dos asfaltos es la misma. Sin embargo, a cualquier otra temperatura las viscosidades son diferentes. Esto se debe a que los dos asfaltos tienen diferente susceptibilidad a la temperatura. Lo mismo puede ocurrir con dos asfaltos con el mismo grado de viscosidad pero provenientes de crudos de diferente origen.

El Gráfico 2, muestra que el Asfalto C y el Asfalto D tienen la misma viscosidad a una temperatura de 60°C. Sin embargo, a cualquier otra temperatura las viscosidades son diferentes. La conclusión es que, sin importar el sistema de clasificación utilizado, puede haber asfaltos derivados de crudos diferentes con diferente susceptibilidad a la temperatura. Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues 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. Puede observarse que a temperaturas mayores de 25°C, las cuales abarcan todas las temperaturas de construcción, el Asfalto A es menos viscoso (más fluido) que el Asfalto B. Como resultado, la temperatura necesaria para que el Asfalto A sea lo suficientemente fluido y pueda cubrir apropiadamente las partículas de agregado en la mezcla es menor que la temperatura necesaria para obtener los mismos resultados con el Asfalto B. Lo mismo ocurre con las temperaturas de compactación. Puede ser necesario compactar una mezcla con el Asfalto A usando una temperatura menor que la requerida por una mezcla que contiene el Asfalto B.

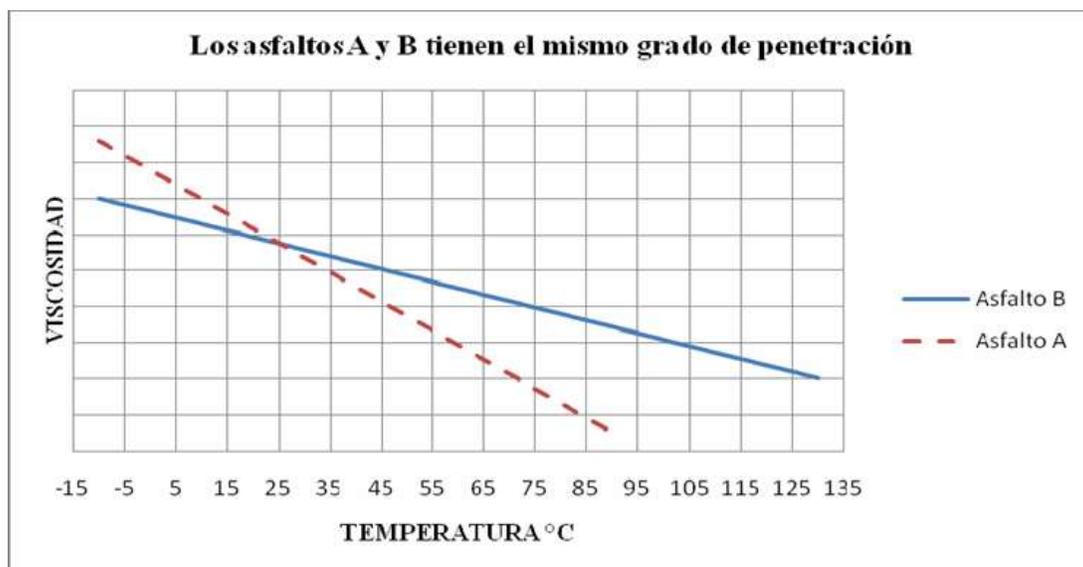


Gráfico 1. Variación de viscosidad con la temperatura de dos asfaltos graduados por penetración

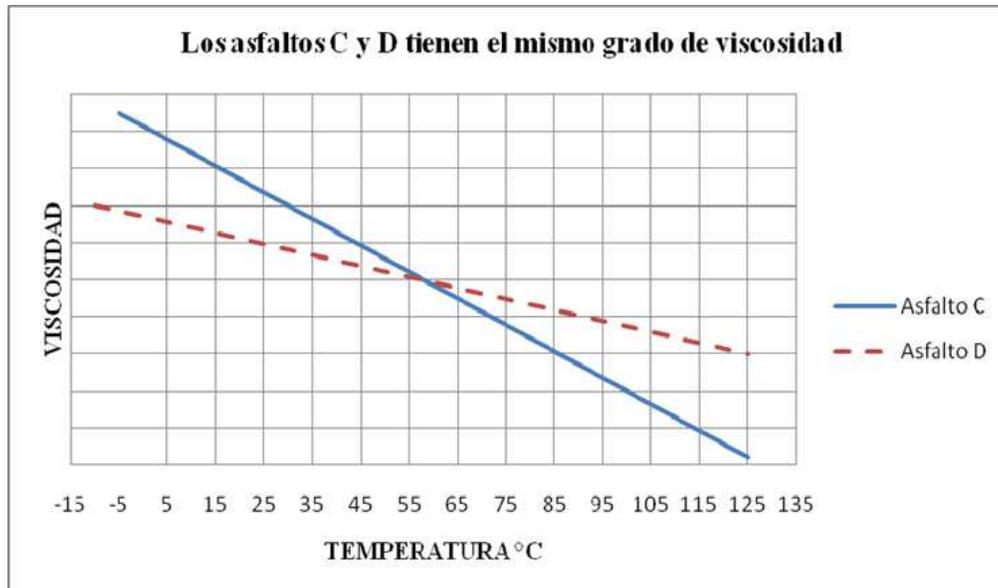


Gráfico 2. Variación de viscosidad con la temperatura de dos asfaltos graduados por viscosidad.

2.3.1.3 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 misma durabilidad del asfalto. Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar la durabilidad del asfalto. Estas son la Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO). Ambas incluyen el calentamiento de películas delgadas de asfalto.

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.

2.3.2 Especificaciones Técnicas de los Cementos Asfálticos

Las especificaciones que deben cumplir los cementos asfálticos, se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 5. Requisitos para Cemento Asfáltico Clasificado por Penetración

PRUEBA DE ACEPTACIÓN (2)	CONDICIÓN DE ENVEJECIMIENTO	TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO (1)				
		40-50	60-70	85-100	120-150	200-300
Viscosidad cinemática a 135°C (máximo, cStoke)	Original	3000 máx	3000 máx	3000 máx	3000 máx	3000 máx
Ductilidad a 25°C (cm)	Original	100 mín	100 mín	100 mín	100 mín	-
Penetración a 25°C (1/100cm)	Original	40-50	60-70	85-100	120-150	200-300
Punto de llama en copa abierta Cleveland (°C)	Original	232 mín	232 mín	232 mín	232 mín	177 mín
Solubilidad en tricloroetileno (%)	Original	99.0 mín	99.0 mín	99.0 mín	99.0 mín	99.0 mín
Índice de susceptibilidad térmica VTS (3)	Original	3.90 máx	3.90 máx	3.90 máx	3.90 máx	3.90 máx
Pérdida de peso por calentamiento en el horno de película delgada RTFO (%)	Original	1.0 máx	1.0 máx	1.0 máx	1.0 máx	1.0 máx
Penetración residual (%) (4)	Residuo RTFO	58 mín	54 mín	50 mín	46 mín	40 mín
Ductilidad a 25°C (cm)	Residuo RTFO	-	50 mín	75 mín	100 mín	100 mín

PRUEBAS OPCIONALES DE ACEPTACIÓN (5)	CONDICIÓN DE ENVEJECIMIENTO	TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO (1)				
Índice de inestabilidad coloidal (6)	Original	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Porcentaje de ceras	Original	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Razón de viscosidades (7)	Residuo RTFO	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

- (1) Criterio de clasificación
- (2) Ensayo de acuerdo con la normativa definida en la Subsección 702.01(d)
- (3) $VTS = 11.3358 \times [\log [\log (\text{viscosidad absoluta a } 60^{\circ}\text{C (cPoise)})] - \log [\log (\text{viscosidad absoluta a } 135^{\circ}\text{C (cPoise)})]]$
- (4) Penetración residual (%) $\square \square \square$ penetración a 25° C para residuo TFO (Poise) penetración a 25° C para asfaltooriginal (Poise)
- (5) Requisitos de aceptación cuya aplicación en un proyecto particular es definida por el contratante.
- (6) Índice de inestabilidad coloidal $\square \square$ asfaltenos(%) $\square \square$ saturados(%) resinas(%) $\square \square$ aromáticos(%)
- (7) Razón de viscosidades $\square \square$ viscosidad absoluta a 60° C para residuo RTFO (Poise) viscosidad absoluta a 60° C para asfaltooriginal (Poise)

2.3.3 Ensayos Realizados al Asfalto para Determinar sus Propiedades.

2.3.3.1 Muestreo de Asfalto

La única manera de saber si el cemento asfáltico entregado en la planta cumple con las especificaciones, es tomar muestras del material y hacerlas ensayar en el laboratorio. Las muestras deben ser representativas del cargamento total para poder obtener resultados confiables. Es muy probable que se obtengan resultados engañosos en los ensayos si las muestras están alteradas o contaminadas. Tales resultados podrían ser usados para rechazar un cargamento completo de cemento asfáltico, aun cuando el asfalto este cumpliendo con las especificaciones.

2.3.3.2 Punto de Ablandamiento

Los asfaltos son materiales termoplásticos, que son afectados por los cambios de temperatura y se ablandan conforme la temperatura aumenta, puesto que no poseen un punto de fusión determinado, sino que se ablandan gradualmente, se calcula el punto de ablandamiento que se define como la temperatura que necesita el asfalto para alcanzar un determinado estado de fluidez.

2.3.3.3 Peso Específico

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen de material al peso de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada.

El peso específico de un cemento asfáltico no se indica, normalmente, en las especificaciones de la obra. De todas maneras, hay dos razones importantes por las cuales se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

- El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando es enfriado. Esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen, las cuales serán discutidas más adelante.
- El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos (espacios de aire) de un pavimento compactado.

2.3.3.4 Penetración

El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba está incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean usados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a 25°C. Este es un ensayo aplicable tanto a cementos asfálticos sólidos como a residuos de destilación de asfaltos líquidos, dónde se determina la consistencia del producto bituminoso. Los asfaltos presentan a temperaturas moderadas, viscosidades muy altas que no pueden cuantificarse con equipos convencionales, esta prueba busca determinar la dureza del asfalto a diferentes temperaturas.

2.3.3.5 Punto de Flama y de Llama

El punto de flama y de llama de un cemento asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un destello en presencia de una llama abierta. El punto de flama y de llama no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se está separando del asfalto.

El punto de flama y de llama de un cemento asfáltico se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame. Esta información es muy importante debido a que el cemento asfáltico es generalmente calentado en su almacenaje con el fin de mantener una viscosidad lo suficientemente baja para que el material pueda ser bombeado.

2.3.3.6 Viscosidad

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, generalmente, ciertos valores de viscosidad a temperaturas de 60°C y 135°C. La viscosidad a 60°C es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135°C corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que está siendo diseñado. Con el ensayo de viscosidad se puede determinar la temperatura de mezcla y de compactación hasta la cual se debe llevar el asfalto para conformar la mezcla.

2.3.3.7 Carta Viscosidad-Temperatura

Es una gráfica que se elabora para conocer el rango de temperaturas para la compactación y el mezclado de los especímenes, donde se toma la viscosidad a 2 o más temperaturas y luego se grafican dichos puntos, conociéndose los rangos de viscosidad para la compactación y el mezclado de especificaciones.

2.3.4 Guías de Ensayos para el Ligante Asfáltico.

La nomenclatura que se le ha dado a cada guía de ensayo, es diferente a la de la teoría. Para poder llevar un orden, a la hora de que el lector necesite copiar un ensayo. La Tabla 6 muestra los ensayos que se desarrollan en esta sección:

Tabla 6. Lista de Ensayos que se desarrollan en esta sección:

Ensayo Numero	Norma AASHTO	Titulo
11	T 40-02	Muestreo de Materiales Bituminosos
12	T 53-96	Punto de Ablandamiento del Asfalto
13	T 228-04	Gravedad Específica de Materiales Bituminosos Sólidos y Semi-Sólidos
14	T 49-04	Penetración de Materiales Bituminosos
15	T 48-04	Punto de Flama y Llama
16	T 201-03	Viscosidad Cinemática de Asfaltos (Betunes)

Nota: El procedimiento de los ensayos se realiza de acuerdo a las normas especificadas en la parte de anexos.

2.4 Definición de Mezcla Asfáltica

Las mezclas asfálticas, es un material que está formada por una combinación de agregados pétreos, ligante hidrocarbonado, y aditivo en algunos casos; de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste.

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. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento de la carpeta de rodadura 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.

2.4.1 Clasificación de las Mezclas Asfálticas

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

a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más cemento asfáltico.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso, agregado fino, polvo mineral y cemento asfáltico.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más cemento asfáltico.

b) Por la Temperatura de puesta en obra.

- Mezclas asfálticas en Caliente: El concreto asfáltico mezclado en planta y compactado en caliente, se compone de una mezcla de agregados graduados y asfalto, fabricado a una temperatura aproximada de 150°C colocada y compactada en caliente a una temperatura de 140 °C. Las plantas para la producción de mezclas en caliente se construyen de tal manera que, después de secar y calentar los agregados, los separa en diferentes grupos de tamaños, los recombina en las proporciones adecuadas, los mezcla con la cantidad debida de asfalto caliente y finalmente los entrega a los vehículos transportadores, que a su vez la colocan en la máquina pavimentadora para

que esta la deposita sobre la vía con un espesor uniforme, después se compacta mediante rodillos mientras la temperatura se conserva dentro de los rangos de especificación. .

- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

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

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

- Mezclas Cerradas o Densas: Contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. La proporción de vacíos no supera el 5 %. Las mezclas densamente graduadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo son poco permeables. En las mezclas asfálticas en caliente, deben preferirse agregados con granulometría densa, o muy cercana a la densa.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 5 % y el 10%.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: Mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura, que se caracteriza por tener un elevado porcentaje de huecos interconectados entre si. Permitiendo el paso del agua a través de la mezcla y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de las calzadas. La proporción de vacíos es superior al 20 %.

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas Finas: También llamadas micro aglomerado, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un agregado

fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

e) Por la Estructura del agregado pétreo.

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

f) Por la Granulometría.

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico (Zona comprendida entre dos curvas granulométricas).
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

2.4.2 Características de la Mezcla (Analizando el Método Marshall)

La mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Las cuales se detallan a continuación:

2.4.2.1 Densidad

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante *para obtener un rendimiento duradero*. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrará en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más

durable. La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/ft^3), se calcula al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua. La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar si la densidad del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

2.4.2.2 Vacíos de aire

Están presente entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre **3% y 5%**. La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico. A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Por otra parte un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

2.4.2.3 Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)

Son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una

mezcla. Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VMA establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

2.4.2.4 Contenido de asfalto

El contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas. Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (No. 200)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Caso contrario al efectuar pequeñas disminuciones de filler nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).



Figura 8. Diagrama de componentes una mezcla asfáltica de HMA

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Técnicamente se habla de dos tipos de asfalto al referirse al asfalto absorbido y el no-absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto: Cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto: volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva 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 una mezcla.

2.4.2.5 Vacíos Llenos de Asfalto VFA

Son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire del VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando su valor como un porcentaje.

2.4.3 Propiedades de las Mezclas Asfálticas

Para obtener una mezcla de calidad, esta debe poseer las propiedades siguientes: Estabilidad, Durabilidad, Flexibilidad, Resistencia a la Fatiga, Resistencia al Deslizamiento, Impermeabilidad y Trabajabilidad.

2.4.3.1 Estabilidad

Es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas por el tránsito. La carpeta asfáltica debe de ser capaz de mantener su forma y textura ante las secuencias de carga que a diario le son impuestas. La fricción interna depende de la textura superficial, graduación del agregado, forma de la partícula, densidad de la mezcla, y, del contenido y tipo de asfalto. La estabilidad es función de la fricción y la resistencia inter-bloqueada del agregado en la mezcla. Cuando sobrepasamos el nivel óptimo de asfalto la película es demasiado gruesa y esto genera que la cohesión decrezca,

resultando en pérdida de fricción entre las partículas que componen la mezcla asfáltica. Es importante que las partículas que componen el agregado sean angulares y ásperas en su textura superficial, esto dará una alta estabilidad a la mezcla.

Los problemas clásicos debido a una estabilidad baja se detallan a continuación:

a) Ahuellamiento:

Consiste en una depresión continua a lo largo de la capa de rodadura. Las cargas repetitivas de tránsito conducen a deformar permanentemente cualquier capa que componen la estructura del pavimento, sin embargo cuando la carpeta asfáltica recién colocada presenta ahuellamiento es debido al exceso de asfalto en la mezcla, es decir el óptimo de asfalto se ha sobrepasado y genera por consiguiente pérdida de cohesión. El ahuellamiento también es producido por la forma redondeada de la partícula, por la falta de textura áspera, falta de adherencia y absorción del agregado. Es decir, si una mezcla tiene un óptimo de asfalto y sus agregados no cumplen con las siguientes propiedades tales como: graduación, limpieza, dureza, textura superficial, capacidad de absorción, afinidad con el asfalto, peso específico, también nos generara ahuellamiento y diferentes tipos de problemas.



Figura 9. Ahuellamiento

b) Corrimiento: desplazamiento de la mezcla asfáltica provocando distorsiones en la superficie de la carpeta asfáltica.

Acompañado a veces por levantamiento de material formando cordones principalmente laterales. Estos desplazamientos son ocasionados por las cargas de tránsito y son debido al exceso de asfalto, falta de vacíos o bien por falta de confinamiento lateral. La una serie de ondulaciones constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección del tránsito, siendo próximas unas de otras, por lo general menores a 1.0 mts entre ellas.

c) Exudación del asfalto:

Es el afloramiento del asfalto o ligante asfáltico hacia la superficie de la carpeta asfáltica. Formando una película continua de ligante, creando una superficie brillante, reflectante, resbaladiza y pegajosa durante las altas temperaturas. Es causado específicamente por un excesivo contenido de asfalto. Ocurre en mezclas con un porcentaje de vacíos deficiente, durante épocas calurosas. El proceso de exudación no es reversible durante el tiempo frío, por tal motivo el asfalto se acumula en la superficie.

2.4.3.2 Durabilidad

Es la propiedad de una mezcla asfáltica para resistir los efectos perjudiciales causados por el agua, aire, temperatura y las cargas debidas al tráfico. Estos efectos perjudiciales provocan desintegración del agregado, cambio en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), envejecimiento, segregación, etc. Puede mejorarse la durabilidad de una mezcla asfáltica de tres maneras:

a) Utilizando un contenido óptimo de asfalto: Se aumenta la durabilidad de la mezcla ya que las partículas del agregado están cubiertas por una película gruesa de asfalto. Esto evita el envejecimiento y el endurecimiento del asfalto, reteniendo por más tiempo las características originales tanto del asfalto como de los agregados.

b) Utilizando una graduación densa: Esto proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, mejorando así la impermeabilidad de la mezcla.

c) Diseñar y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad: Esto se logra mediante la compactación por medios mecánicos utilizando maquinaria y equipo adecuado.

Tabla 7. Causas y Efectos de la Poca Durabilidad.

Causas	Efectos en la carpeta
Bajo contenido de asfalto	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregado susceptibles al agua (hidrofilitos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando una carpeta de rodadura desgastada ó desintegrada

2.4.3.3 Flexibilidad

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamiento, soportando los movimientos graduales y asentamientos de la base y sub-base. Los asentamientos en el pavimento pueden ocurrir debido a que falle cualquiera de sus componentes. Provocando daños visibles en la carpeta de rodadura. De hecho, todas las estructuras tienden a tener asentamientos diferenciales. La flexibilidad de las mezclas asfálticas es incrementada agregando mayor contenido de asfalto, hasta llegar al contenido óptimo, a partir de este, si se aumenta en exceso el contenido de asfalto la carpeta tiende a ser extremadamente flexible y provoca entonces una mezcla con estabilidad baja. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

2.4.3.4 Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir la flexión repetida causada por las cargas de tránsito. Si el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Por tal razón, las mezclas asfálticas de graduación densa presentan mayor resistencia a la fatiga que las mezclas asfálticas de graduaciones abiertas. El envejecimiento y endurecimiento del asfalto en la carpeta de rodadura da como resultado menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la sub-rasante, influyen determinantemente en la vida útil de una carpeta de rodadura asfáltica. Si la carpeta asfáltica presenta buena resistencia a la fatiga y la sub-base está mal compactada, se verán claramente los asentamientos y la resistencia a la fatiga disminuye considerablemente. Caso contrario si la sub-base está bien compactada y la carpeta asfáltica presenta mala resistencia a la fatiga la carpeta se dañara. Por lo anterior, el pavimento debe trabajar en conjunto para que pueda resistir la flexión causada por el tránsito.

Entre algunos daños visibles debido a una mala resistencia a la fatiga se detallan a continuación:

a) Fisura Piel de Cocodrilo:

Serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de la carpeta asfáltica, donde las tensiones y deformaciones por tracción alcanza su valor máximo, cuando el pavimento es solicitado por una carga. Las fisuras se propagan a la superficie, evolucionan interconectándose y formando una malla cerrada, que asemeja el cuero de un cocodrilo. La fisura piel de cocodrilo son causadas por la fatiga que sufre la carpeta de asfáltica al ser sometidas a las cargas repetidas del tránsito. Por lo general, el fisuramiento indica que el pavimento ya no tiene capacidad estructural de sostener las cargas de tránsito y ha llegado al fin de su vida útil. El ligante por lo general ha envejecido y por ende ha perdido la flexibilidad de sostener cargas repetidas al tránsito sin agrietarse.

b) Fisuras en Bloque:

Serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0.10 a 9.0 m². Se presenta generalmente en una gran área de la carpeta asfáltica y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico.

Son causadas principalmente por la contracción de las mezclas asfálticas debido a las variaciones diarias de temperatura. A menudo es difícil constatar si las fisuras y grietas son debido a contracciones producidas en la carpeta asfáltica o en la base y sub-base.

La presencia de fisuras en bloques generalmente es un indicativo de que el asfalto se ha endurecido significativamente.

c) Fisura Transversal:

Fracturación de longitud variable que se extiende a través de la superficie de la carpeta asfáltica, formando un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril como limitarse a los 0.60 m próximos al borde lateral de la carpeta de rodadura. La contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad, es decir si una carpeta asfáltica no tiene la capacidad de flexionar repetitivamente la resistencia a la fatiga es menor o nula. Puede ser ocasionado por un exceso de filler, envejecimiento asfáltico, etc. Particularmente ante la baja temperatura y gradientes térmicos importantes.

d) **Peladura:**

Desintegración superficial de la carpeta asfáltica como consecuencia de la pérdida de ligante bituminoso y del desprendimiento del agregado pétreo, aumentando la textura de la carpeta asfáltica pavimento y exponiendo cada vez más los agregados a la acción del tránsito y el clima. Esta anomalía es un indicativo que el asfalto se ha endurecido apreciablemente, perdiendo sus propiedades ligante, o bien que la mezcla asfáltica existente es de deficiente calidad, ya sea por un contenido de asfalto insuficiente, empleo de agregados sucios o muy absorbentes, como también por deficiencias durante la construcción, especialmente en tratamientos superficiales bituminosos.

2.4.3.5 **Resistencia al deslizamiento**

Es la habilidad de una carpeta asfáltica, particularmente cuando esta mojada, de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos. Esto implica que el neumático debe mantenerse en contacto con las partículas del agregado y no sobre una película de agua en la superficie del pavimento, conocido como hidropilaje. Una buena resistencia al deslizamiento lo contribuyen agregados con textura áspera y contenidos adecuados de asfalto. Los contenidos altos de asfalto producen mezclas inestables las cuales tienden a deformarse y exudar, generando así, mayor deslizamiento.

Tabla 8. Causas y Efectos de la Poca Resistencia al Deslizamiento.

Causas	Efectos en la carpeta
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Carpeta asfáltica lisa, posibilidad de hidropilaje
Agregado canto rodado, textura lisa	Poca resistencia al deslizamiento

2.4.3.6 **Impermeabilidad**

Es la resistencia de una carpeta asfáltica al paso del aire y agua hacia su interior o a través de él. El contenido de vacíos puede ser una indicación a la susceptibilidad de una mezcla compactada al paso del agua y el aire.

Tabla 9. Causas y Efectos de Mezcla Demasiado Permeable.

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

2.4.3.7 Trabajabilidad

Es la facilidad con la cual una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. El asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad.

Tabla 10. Causas y Efectos de la Mala Trabajabilidad.

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

Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

2.4.4 Método de Diseño Marshall

2.4.4.1 Metodología

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas asfálticas fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios

de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas.

2.4.4.2 Propósito de la Metodología

El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla.

El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

2.4.4.3 Descripción General

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2.5 pulg) de espesor por 102 mm (4 pulg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica. Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad- vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Tabla 4.5 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D 3515.

2.4.4.4 Especificaciones de la Metodología

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en este capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. El rango de vacíos de aire es de 3% al 5%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 4.6). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Tabla 11. Graduaciones Propuestas para Mezclas Cerradas (ASTM D 3515)

Aberturas de los tamices	Mezclas Cerradas								
	Tamaño Máximo Nominal del Agregado								
	2 pulg (50.0mm)	1 ½ pulg (37.5mm)	1 pulg (25.0mm)	¾ pulg (19.0mm)	½ pulg (12.5mm)	3/8 pulg (9.5mm)	No. 4 (4.75mm)	No. 8 (2.36 mm)	No. 16 (1.18mm)
	Gradaciones para Mezclas de Agregados (Gruoso, Fino y Filler)								
2 ½ – (63 mm)	100	---	---	---	---	---	---	---	---
2½ (50 mm)	90-100	100	---	---	---	---	---	---	---
1 ½ (37.5 mm)	---	90-100	100	---	---	---	---	---	---
1 – (25.0 mm)	60-80	---	90-100	100	---	---	---	---	---
¾ (19.0 mm)	---	56-80	---	90-100	100	---	---	---	---
½ (12.5 mm)	35-65	---	56-80	---	90-100	100	---	---	---
3/8 (9.5 mm)	---	---	---	---	---	90-100	100	---	---
No. 4 (4.75 mm)	14-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	---	---
No. 8 (2.36 mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	---	10 0
No. 16 (1.18 mm)	---	---	---	---	---	---	40-80	---	95-100
No. 30 (600µm)	---	---	---	---	---	---	35-65	---	70-95
No. 50 (300 µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	---	45-75
No. 100 (150 µm)	---	---	---	---	---	---	3-20	---	20-40
No. 200 (75 µm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	---	9-20
	Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla.								
	2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12

Tabla 12. Criterios del Instituto del Asfalto para el Diseño Marshall

CRITERIOS PARA MEZCLA DEL MÉTODO MARSHALL	TRÁNSITO LIVIANO CARPETA Y BASE		TRÁNSITO MEDIANO CARPETA Y BASE		TRÁNSITO PESADO CARPETA Y BASE	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0.25mm (0.01pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver Tabla 13					
% VFA	70	80	65	78	75	82

NOTAS

1 Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60 OC, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38 OC, y si se colocan a 100 mm o más por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas mas extremas puede ser necesario usar temperaturas mas bajas de ensayo.

2 Clasificaciones del Tránsito

Liviano Condiciones de tránsito que resultan en un ESAL de diseño < 104

Mediano Condiciones de tránsito que resultan en un ESAL de diseño entre 104 y 106 Pesado Condiciones de tránsito que resultan en un ESAL de diseño > 106

3 Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el tránsito.

4 Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

5 Cuando se esté calculando el porcentaje de vacíos, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico pérdida por absorción en las partículas de agregado.

6 El porcentaje de vacíos en el agregado mineral debe ser calculado con base en el peso específico total ASTM del agregado.

Tabla 13 Porcentaje Mínimo de VMA

TAMAÑO MÁXIMO EN MM PORCENTAJE		VMA MÍNIMO, POR CIENTO Vacíos de Diseño, por ciento ³		
mm	pulg	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

¹ Especificación Normal para Tamaño de Tamices usados en Pruebas AASHTO M 92 (ASTM E 11).

² El tamaño máximo nominal de la partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% del material.

³ Interpole el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están listados.

2.4.4.5 Ensayos Realizados a la Mezcla Asfáltica Compactada.

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

2.4.4.5.1 Determinación de la Gravedad Específica bulk

El ensayo de gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas utilizando especímenes saturados superficialmente secos puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado. Este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma AASHTO T 166-05 (Ensayo No. 24), para la gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas usando especímenes cubiertos con parafina la norma AASHTO T 275 es aplicada. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se utiliza la norma AASHTO T 166-05, en caso contrario, se recurre a la norma AASHTO T 275.

2.4.4.5.2 Ensayo de Estabilidad y Flujo

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

Sumergir el espécimen en un Baño María a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Remueva el espécimen de ensayo del baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocar la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga. Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una velocidad constante de 50.8 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que el ensayo de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm (1/100 —) será el valor del flujo Marshall.

2.4.4.5.3 Análisis de densidad y vacíos

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (V_a); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

2.4.5 Guías de Ensayos para Diseño de Mezclas

La nomenclatura que se le ha dado a cada guía de ensayo, es diferente a la de la teoría. Para poder llevar un orden, a la hora de que el lector necesite copiar un ensayo. La Tabla 14 muestra los ensayos que se desarrollan en esta sección:

Tabla 14 Lista de Ensayos que se Desarrollan en esta Sección

Ensayo Numero	Norma AASHTO	Título
17	AASHTO T245	Resistencia al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas Utilizando Equipo Marshall
18	AASHTO T209	Gravedad Específica Teórica Máxima y Densidad de Mezclas Bituminosas para Pavimentación
19	AASHTO T166	Gravedad Específica Bulk de Mezclas Asfálticas Compactadas Utilizando Especímenes Saturados Superficialmente Secos

Nota: El procedimiento de los ensayos se realiza de acuerdo a las normas especificadas en la parte de anexos.

2.5 Producción de Mezcla Asfáltica en Caliente

2.5.1 Plantas Asfálticas

Las plantas de mezcla asfáltica existen en diferente capacidad, y pueden ser fijas (situada en un lugar permanentemente) o portátiles (transportada de una obra a otra). Por la forma en que se realiza la producción, tenemos las plantas de dosificación (tipo batch) y las continuas, las que se definen según la norma AASHTO M 156 —Requerimientos para Plantas de Mezclado para Mezclas en Caliente y Mezclas de Pavimentos Bituminosos Colocados en Caliente:

Planta de dosificación: Es una instalación en la que se producen mezclas bituminosas para pavimentación la cual proporciona el agregado y los constituyentes asfálticos en la mezcla por cargas previamente pesadas, añade el material bituminoso por peso o volumen, y mezcla dicha combinación (ver Figura 5.1).

Planta de mezcla continua: Es una instalación en la que se producen mezclas bituminosas para pavimentación en la cual se proporciona continuamente el agregado y los constituyentes bituminosos en la mezcla, por un sistema de proporcionamiento continuo sin definir intervalos de carga.

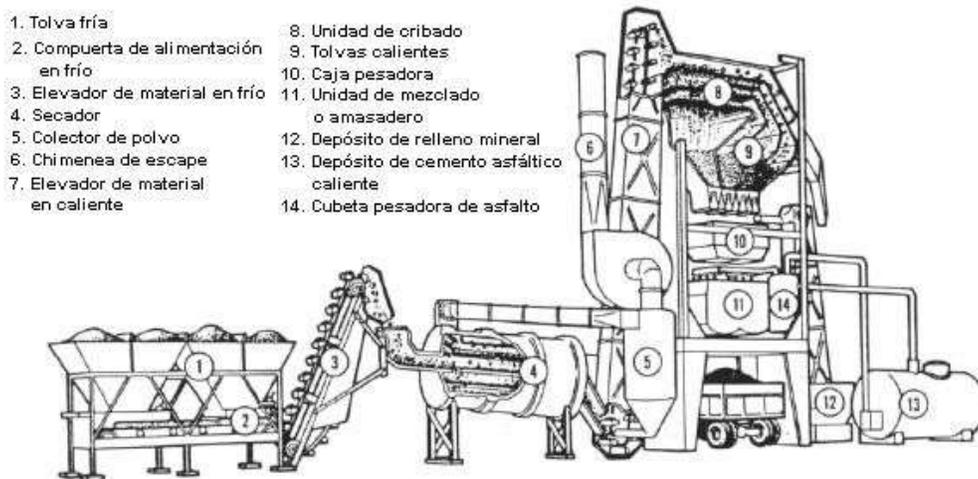


Figura 10. Partes Componentes de una Planta de Dosificación

Existen plantas que pueden realizar el proceso de secar y calentar el agregado, así como el de mezclarlo con el asfalto en un solo compartimiento, estas plantas se conocen como plantas mezcladoras de tambor, las cuales son instalaciones que producen mezclas bituminosas de pavimentación en la que continuamente se proporciona, seca y calienta el agregado en un tambor rotatorio, mezclándolo simultáneamente con una cantidad controlada de material bituminoso. La misma planta puede producir mezclas bituminosas de pavimentación en frío sin secar ni calentar el agregado. Estas plantas pueden ser de flujo paralelo o contraflujo, en las cuales la única diferencia es que en las plantas mezcladoras de tambor de flujo paralelo el agregado se mueve en la misma dirección que los gases y en las plantas de contra flujo el agregado se mueve en dirección contraria a los gases.

2.5.2 Componentes de la Planta Mezcladora de Tambor

Los componentes principales de una planta mezcladora de tambor son (ver Figura 10 y Figura 11):

- Tolvas de agregado de alimentación en frío
- Sistema de transporte y pesado de agregado
- Mezclador de tambor
- Sistema colector de polvo
- Transportador de mezcla en caliente
- Silo de compensación para mezcla

- Cabina de control
- Tanque de almacenamiento de asfalto

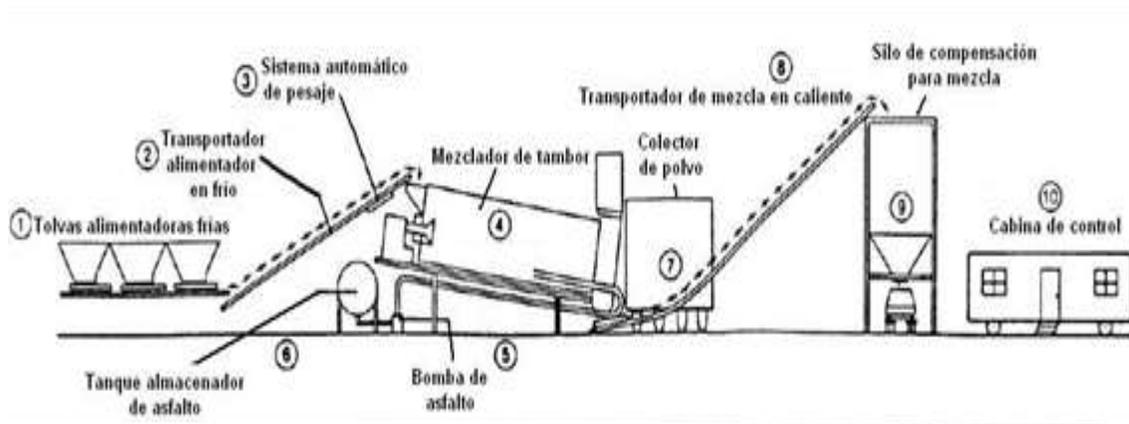


Figura 11. Distintas partes de una Planta Mezcladora de Tambor. Estas partes son las que generalmente deberán tener las plantas mezcladoras.

2.6 Control de la Mezcla en Planta

El propósito de una planta de mezclas asfálticas en caliente (MAC) es combinar, secar y calentar el agregado para mezclarlo con el cemento asfáltico en caliente, produciendo por medio de dicho proceso una mezcla asfáltica homogénea para pavimentación. El agregado utilizado puede ser un solo material, tal como agregado triturado o de banco, o también una combinación de agregados gruesos y finos, sin o con filler mineral. El material ligante usado es normalmente cemento asfáltico en caliente. Muchos aditivos, incluyendo materiales líquidos o en polvo, pueden ser incorporados también en la mezcla.

2.6.1 Inspección de la Mezcla en Caliente

Cuando se está produciendo mezcla en caliente se debe realizar inspecciones visuales a la mezcla a medida que esta es descargada al camión, y también cuando va saliendo de la planta al lugar donde será colocada. Muchos problemas graves en la mezcla pueden ser detectados mediante una cuidadosa inspección visual.

En primer lugar se debe tomar la temperatura, ya sea en los camiones introduciendo un termómetro con vástago unos 15 cms o con un medidor térmico infrarrojo, tipo pistola, con el cual se podrán hacer lecturas en el camión, aunque es mucho mejor disparar el medidor en

la mezcla al momento que es descargada en el camión para una lectura más confiable sobre la temperatura de la mezcla.

Otros problemas que se pueden observar en la mezcla es cuando se forma un pico pronunciado el cual puede indicar una falta de calentamiento o que el contenido de asfalto en la mezcla es muy bajo. Por otro lado si la mezcla se asienta en el camión (no forma un pico bien definido), puede ser que tenga demasiado asfalto o demasiada humedad.

Humo azul que se eleva de la mezcla es una indicación de sobrecalentamiento de la mezcla. Otra forma en la que se puede notar una temperatura baja es que la muestra se observe inactiva a medida que se deposita en el camión y puede mostrar una distribución no uniforme de asfalto.

2.6.2 Importancia de Verificar la Calidad de la Mezcla Producida.

El control de calidad de la mezcla producida es una de las partes más importantes en las plantas de mezcla asfáltica en caliente, puesto que este determina si la mezcla es apta o no para ser colocada en un proyecto en específico. Tanto el control de la temperatura de la mezcla, el muestreo y los ensayos que se realizan a la mezcla son fundamentales para verificar si las propiedades de la mezcla cumplen o no con las propiedades establecidas por el diseño y las especificaciones para un proyecto en particular. Por las razones anteriormente mencionadas deben seguirse los procedimientos de muestreo y ensayos al pie de la letra; así como deben realizarse los ensayos que sean necesarios en cuanto a tipo de ensayo y cantidad para garantizar que los resultados provean las características verdaderas de la mezcla que se está produciendo.

El Instituto del Asfalto recomienda la realización de los siguientes ensayos a la mezcla producida:

Ensayo de extracción, Análisis granulométrico, Análisis de estabilidad y densidad.

Con el ensayo de extracción se determina el contenido de asfalto, con el análisis granulométrico del agregado remanente del ensayo de extracción se verifica que la granulometría este dentro de la banda de control, ya sea esta especificada por el contratante, el diseñador o algún organismo que provea especificaciones para dicha mezcla; y en último lugar el análisis de estabilidad y densidad, que corresponden al ensayo de Estabilidad y Flujo,

así como el ensayo para la Gravedad Específica Bulk y Gravedad Específica Teórica Máxima donde se verifica la densidad y el porcentaje de vacíos, VMA, VFA de la mezcla a un espécimen previamente compactado. Todos estos valores son comparados con los parámetros del diseño Marshall para verificar si se encuentran dentro de los límites que establece dicho método.

Es de notar que el proceso de control de calidad de las mezclas asfálticas producidas en planta no sólo se remite a los ensayos de Extracción de Ligante Asfáltico, Comprobación Granulométrica de Agregado Extraído, Estabilidad y Flujo, Gravedad Específica Bulk y Gravedad Específica Teórica Máxima los que se hacen a la mezcla producida, sino que también se debe controlar que todas las partes de la planta operen adecuadamente para que se produzca una mezcla de buena calidad, estos controles son los que se han mencionado en los apartados anteriores e incluyen el almacenamiento de los materiales en forma adecuada, control del sistema de alimentación en frío, sistema colector de polvo, quemador del calentador de agregados y la temperatura del quemador, sistema de tolvas calientes (para plantas de dosificación), calibración del sistema de pesaje de agregado ya sea en la banda transportadora para plantas continuas o cajas de pesaje para plantas de dosificación, calibración de cubeta para dosificación de asfalto, mezclador y el sistema de silos en cuanto a su forma de carga y descarga para disminuir la segregación de la mezcla. Una revisión de los sistemas eléctricos y mecánicos de toda la planta es de suma importancia para controlar adecuadamente todos los procesos que conlleva la producción de mezcla.

2.7. Colocado Y Compactación de Mezclas Asfálticas en Caliente

El colocado y compactación de mezcla asfáltica en caliente para formar un producto terminado como una carpeta asfáltica, consiste de dos actividades muy importantes y que además están fuertemente relacionadas, cada una tiene su procedimiento y controles respectivos, a los cuales debe apegarse todo constructor para lograr una calidad en la carpeta de acuerdo a los requisitos contractuales de cada proyecto, y de ésta forma sea aceptada por la supervisión. Por lo contrario, un control deficiente durante el proceso de colocado y compactación *puede ocasionar que no se logre alcanzar la densidad estipulada, vacíos, entre otros factores*; esto influirá negativamente en la calidad de una carpeta asfáltica, no cumplirá con las especificaciones de proyecto, presentará un desempeño deficiente y probablemente

fallará a corto plazo, lo que en muchas ocasiones hace tachar a los pavimentos asfálticos de mala calidad, cuando en la mayoría de las ocasiones lo que realmente se hacen son malas prácticas de construcción; las cuales podemos mejorarlas tan sólo ejecutando los proyectos con los procedimientos correctos y la maquinaria adecuada. En este capítulo se hace énfasis en la importancia de la colocación y compactación de mezclas asfálticas en caliente, recalcando los aspectos generales y fundamentales que todo ingeniero relacionado a la construcción de un proyecto vial de mezcla asfáltica debe conocer y sobre todo, ejercer un buen control para que todos los procesos se realicen de la forma establecida en las especificaciones técnicas de cada uno de los proyectos viales.

2.7.1 Aspectos que Debe Conocer el Ingeniero

El conocimiento del ingeniero y su control sobre la operación de pavimentación (colocado y compactación), pueden significar la diferencia entre carpeta asfáltica durable de buena calidad; y una áspera, poco firme y de mala transitabilidad.

Por lo tanto el ingeniero tiene dos grandes responsabilidades durante la operación de pavimentación:

- Asegurar que las especificaciones del proyecto sean cumplidas, y
- Darle al contratista la oportunidad de cumplir las especificaciones de la manera más económica posible.

Al cumplir con la primera responsabilidad, el ingeniero le está garantizando al público un pavimento que va a tener buen funcionamiento sin necesidad de reparaciones durante cierto tiempo, según el periodo de su vida útil y el tiempo que se estima para iniciar las primeras reparaciones preventivas. El cumplimiento de la segunda responsabilidad garantiza la cooperación con el contratista, la cual es esencial para la construcción de un pavimento o una carpeta asfáltica de buena calidad.

Es muy importante realizar una reunión a nivel de empresa constructora antes de iniciar los trabajos relacionados a colocación y compactación de mezclas asfálticas en caliente, el objetivo de dicha reunión es que el ingeniero residente, el jefe de pavimentación, el contratista, el supervisor y otros directamente involucrados con la operación, discutan asuntos como los siguientes:

- Quién está autorizado para recibir órdenes del ingeniero y quién está autorizado para entregar dichas ordenes al contratista.
- Revisiones del programa de pavimentación o de las especificaciones.
- Discutir sobre el uso y manejo de equipos nuevos
- Exponer y aclarar el uso de métodos nuevos de ensayo.
- Establecer como se construirá el tramo de prueba.
- Procedimiento para construcción de las juntas longitudinales
- Procedimiento para construcción de las juntas transversales.
- Capacidad de producción de la planta y colocación de la pavimentadora asfaltador.
- Como se controlará el tránsito.
- Como se realizarán y mantendrán los registros.
- Equipo necesario y personal.
- Procedimientos de control de calidad y su repetibilidad.

Se debe hablar sobre la reunión de las preparatorias. **¿Qué se debe hablar?**

En dicha reunión es dónde todas las dudas deben ser aclaradas, los problemas deben ser resueltos y los canales de comunicación y mando deben ser establecidos. Es el momento de establecer relaciones con todo el personal de la obra para que puedan evitarse más adelante, las confusiones y las fricciones.

El ingeniero que esté a cargo de la construcción o de la supervisión de carpetas de mezcla asfáltica en caliente en un proyecto vial, ya sea construcción de un pavimento nuevo, colocación de una carpeta asfáltica sobre una capa asfáltica existente o sobre una de concreto, deberá tener muy en claro y conocer lo siguiente:

- Todos los procedimientos necesarios para colocar una mezcla asfáltica en caliente.
- Estar familiarizado con el funcionamiento, fundamentos de la pavimentadora (finisher) y de la enrasadora.
- Como planear y controlar una operación de pavimentación de un ancho y un espesor definido.
- Procedimientos para construir juntas transversales y longitudinales.

- Posibles deficiencias que puede haber en la colocación y en las características de la mezcla, y conocer como pueden ser corregidas.
- Debe conocer completamente las especificaciones de la obra.

Se presenta un esquema de factores importantes relacionado específicamente a la construcción, que también son importantes de mencionar los cuales ayudarán a la planificación y monitoreo del proyecto, ya que su control ayuda a la calidad del proceso constructivo.

Planificación del proyecto

- Toneladas de asfalto diarias
- Ancho de pavimentación
- Especificaciones
- Grado de condiciones
- Posibles problemas

Segregación Controles:

- Desde la planta
- En el almacenamiento en la planta
- En la entrega de la mezcla

Supervise defectos en la capa

- Material demasiado grande causa raspaduras en la capa.
- Conozca las condiciones de la base
- Puntos altos pueden causar que la regla compactadora triture agregados
- La capa muestra textura abierta
- Controle la temperatura de la capa

2.7.2 Responsabilidades del Ingeniero

El ingeniero de pavimentación deberá comprender las responsabilidades que tiene bajo su oficio, por lo tanto, debe estar atento en:

- Las especificaciones del proyecto y deberá garantizar que estas se cumplan durante la operación de pavimentación.

- Deberá asegurarse que cada carga de mezcla sea satisfactoria, que los datos de la boleta del camión estén registrados con precisión,
- Que el asfaltador esté siendo operado correctamente. Si aparecen deficiencias en la carpeta durante la colocación, el ingeniero deberá estar seguro de que estas se rectifiquen antes de que la mezcla se enfríe.
- Debe prestar atención a los detalles como el espesor correcto de la capa, el perfil transversal apropiado, la construcción y el aparejamiento correcto de las juntas, textura y uniformidad de la superficie.
- Monitorear la temperatura de la mezcla en caliente para asegurar que la temperatura correcta se mantenga durante la operación de pavimentación.
- Mantener un registro diario como referencia futura, y deberá registrar cualquier cosa inusual o cualquier evento que pueda ser usado más adelante.

El ingeniero deberá saber apreciar su responsabilidad. Cuando sea necesario, deberá ser prudente en el trato con el contratista y en sus solicitudes de acciones remediales.

El ingeniero deberá mantener registros precisos y detallados. Además de la información incluida en los boletos de carga, el ingeniero deberá registrar cualquier evento o cambio inusual en los métodos de construcción, en el equipo, en la apariencia o manejo de la mezcla, junto con la estación (localización) de la vía donde se presentó el cambio.

El registro del ingeniero se usa para su conveniencia durante la construcción, pero también debe formar parte de los registros permanentes de la obra, una vez esta termine.

2.7.3 Colocado de Mezcla Asfáltica en Caliente

El colocado de mezclas asfálticas es el procedimiento en el cual la mezcla es extendida por medio de una pavimentadora con un espesor y ancho definido, dentro de un rango de temperatura aceptable. Durante este proceso se deben realizar una serie de controles partiendo desde la sincronización entre el despacho de la mezcla en planta y la correspondiente entrega en el proyecto, y subsiguientes controles después que la mezcla es extendida. Para colocar mezcla es necesario tener una buena coordinación entre la planta y el proyecto, para despachar solamente la mezcla que es necesaria, estos controles son explicados en las siguientes secciones

2.7.4 Coordinación entre Planta y Proyecto

La coordinación entre planta y proyecto durante las operaciones de pavimentación es esencial a la hora de colocar mezclas asfálticas en caliente. Las operaciones coordinadas y continuas de la pavimentadora producen un pavimento de alta calidad, de aquí la importancia de llevar una buena coordinación con la producción en planta, el despacho de los camiones y la colocación de la mezcla en obra según la capacidad de la pavimentadora, ya que la planta debe producir y despachar sólo la mezcla que se necesita diariamente en el proyecto.

No hay ninguna ventaja en operar la pavimentadora a una velocidad que requiera que la mezcla deba ser suministrada más rápido de lo que la planta puede producirla. El tratar de pavimentar demasiado rápido puede ocasionar que la pavimentadora tenga que parar frecuentemente, para esperar que los camiones lleguen y descarguen más mezcla. Si la parada es demasiado larga (más que unos minutos en un día frío), la uniformidad del pavimento va a ser afectada desfavorablemente cuando la pavimentadora empiece a operar de nuevo y coloque mezcla mucho más caliente a continuación de una más fría.

Por consiguiente, es esencial que la producción de la planta esté coordinada con las operaciones de pavimentación. La pavimentadora debe cargarse continuamente con suficiente mezcla y, al mismo tiempo, los camiones no deben esperar mucho tiempo para descargar sus contenidos en la tolva del asfaltador.

Si la carpeta que está siendo colocada es uniforme y tiene una textura aceptable, y su espesor es correcto, entonces no es necesario hacer ajustes en el enrasador. Cuando estos ajustes son requeridos, deberán efectuarse en incrementos pequeños, y deberá permitirse cierto tiempo entre cada ajuste para que el enrasador reaccione completa y secuencialmente a cada uno de los ajustes.

Es igualmente importante que los controles de espesor del enrasador no sean ajustados excesivamente en cantidad o en frecuencia. Cada ajuste de los controles de espesor resulta en un cambio de elevación de la superficie de la carpeta. Los cambios excesivos de elevación superficial en el borde de la primera carpeta son extremadamente difíciles de igualar en el carril paralelo, cuando se está construyendo la junta longitudinal.

2.7.5 Control Durante la Entrega de Mezcla en la Obra.

El control durante la entrega de mezcla asfáltica en caliente en un proyecto de pavimentación es muy riguroso, ya que en buena parte, de esto dependerá la calidad del producto terminado. En la obra todo inicia con el recibimiento de los camiones que van llegando y su respectivo control, el cual comprende la verificación de los boletos de cada uno y por supuesto un control visual de la mezcla que lleva dicho camión; estos controles se explican en las siguientes secciones.

2.7.5.1 Boletos de carga

Los boletos de carga proveen los registros esenciales para el control de calidad de las operaciones de la obra, así como para el control de la cantidad de mezcla entregada. Cada empresa tiene un formato distinto, pero ciertos detalles de los boletos de carga permanecen generalmente iguales de una empresa a otra. Los boletos de carga tienen una numeración correlativa son generalmente expedidos en la planta. En ellos se encuentra el origen de la carga, nombre del proyecto, la hora en que el camión fue cargado y despachado, temperatura y peso de la carga, temperatura y hora de llegada al proyecto, número del camión, tipo de mezcla, y el lugar donde la mezcla fue colocada.

2.7.5.2 Inspección visual de la mezcla

Los procedimientos de inspección visual de mezclas deberán discutirse a fondo durante la reunión sostenida antes de la construcción. Aunque la mezcla es inspeccionada en la planta, existen ocasiones en que el ingeniero de planta puede pasar por alto, inadvertidamente, una carga defectuosa que puede ser el resultado de una falla en la planta. Algunas de estas deficiencias pueden ser notadas por el Ingeniero a cargo de la pavimentación antes de que la mezcla sea descargada. Estas deficiencias se hacen aparentes cuando se revisa la temperatura o cuando se eleva la caja del camión. Algunas indicaciones de deficiencias en la mezcla en caliente, que pueden requerir una inspección más rigurosa y posiblemente una rectificación, son:

Humo Azul — El humo azul que asciende de la mezcla del camión, o tolva distribuidora, puede ser indicación de una carga sobrecalentada. En este caso, la temperatura deberá revisarse inmediatamente.

Apariencia Dura — Generalmente, una carga que parezca dura o presente un pico alto (más de lo normal), puede estar demasiado fría para cumplir con especificaciones. Su temperatura deberá revisarse. Si esta es menor que la temperatura óptima de colocación, pero se encuentra dentro del margen aceptable, entonces se deben tomar medidas inmediatas para corregir la deficiencia en temperatura, y así evitar tener que desechar la mezcla.

Asentamiento de la Mezcla en el Camión — Normalmente el material en el camión se encuentra en forma de domo (cúpula). Si una carga se encuentra plana, o casi plana, puede ser que contenga demasiado asfalto o demasiada humedad. Inmediatamente se debe hacer una inspección más rigurosa. El exceso de asfalto también puede detectarse debajo del enrasador si la superficie de la carpeta aparece excesivamente brillante. Por otro lado, una mezcla que contenga gran cantidad de agregado grueso puede ser confundida con una que contenga demasiado asfalto, debido a su apariencia lustrosa. Sin embargo, usualmente, dicha mezcla no se asentará dentro del camión.

Apariencia Opaca y Magra — Una mezcla que contiene muy poco asfalto puede ser detectada inmediatamente en el camión o en la tolva distribuidora por su apariencia magra (seca) y granular, por un revestimiento incorrecto del agregado y por una falta del lustre típico brillante y negro. En la carretera, la falta de asfalto en la mezcla puede detectarse por su apariencia magra, parda y opaca en la superficie, y por una compactación inaceptable. Por otro lado, el exceso de finos en una mezcla puede dar la misma apariencia que una mezcla con muy poco asfalto. El exceso de finos puede ser detectado al inspeccionar la textura de la mezcla y observar si la mezcla se desplaza bajo el compactador.

Vapor Ascendente — El exceso de humedad aparece, frecuentemente, como vapor ascendente en la mezcla, cuando esta se descarga en la tolva del asfaltador. La mezcla en caliente puede estar burbujeando y reventando como si estuviera hirviendo. Una humedad excesiva también puede causar que la mezcla aparezca y actúe como si tuviera demasiado asfalto.

Segregación — La segregación de agregados puede ocurrir durante la pavimentación debido a un manejo inadecuado de la mezcla. En otros casos, la segregación puede ocurrir antes de que la mezcla llegue a la pavimentadora. En cualquier caso, esta se debe corregir inmediatamente, en el origen de la causa.

Contaminación — Las mezclas se pueden contaminar con sustancias extrañas, incluyendo gasolina, kerosene, aceite, trapos, papel, basura y mugre. La contaminación se puede corregir si no es muy extensa; sin embargo, una carga que ha sido contaminada en su totalidad debe ser rechazada.

Exudación — Aunque es recomendable usar sustancias que no tengan una base de petróleo para rociar las cajas de los camiones, todavía hay agencias que permiten el uso de combustible diesel para este propósito. El exceso de diesel que se acumula en la caja del camión puede ser absorbido por la mezcla. En el pavimento, el diesel diluye el asfalto y causa que este se filtre (exude) hacia la superficie, resultando en lo que se conoce como una —mancha grasientall. Además, en la mezcla, el exceso de diesel puede disolver y drenar el asfalto. Una mezcla en caliente contaminada con diesel deberá ser removida y reemplazada.

2.7.6 Inspección de la Capa Colocada antes de la Compactación

El ingeniero debe ser capaz de identificar las deficiencias en la carpeta colocada y conocer las posibles causas de esas deficiencias. En algunos casos, el muestreo y los ensayos son el único medio confiable para analizar un problema de la carpeta colocada.

Las siguientes sub-secciones tratan en una forma breve, varias de las partidas importantes en una lista de inspección de mezcla colocada.

2.7.6.1 Temperatura de la mezcla colocada

La temperatura de la mezcla colocada debe ser monitoreada, inmediatamente después de ser colocada, éste control en la temperatura sirve para identificar posibles diferencias perjudiciales de temperatura en la mezcla, además sirve para conocer cuándo ésta ha llegado a la temperatura a la cual debe de iniciar la compactación inicial, la cual deberá estar en el rango de las temperaturas establecidas durante la construcción del tramo de prueba. También del monitoreo de la temperatura se obtiene una idea de cómo están influyendo las condiciones naturales del tiempo (medio ambiente) sobre la mezcla, el viento puede influir en un enfriamiento rápido de la mezcla, humedad, intensidad solar, temperatura promedio del día y la temperatura de la superficie sobre la cual se extendió la mezcla. La temperatura también deberá revisarse cuando la mezcla parezca fría.

La temperatura de la carpeta se toma al introducir el vástago de un termómetro hasta la mitad de su espesor. La mezcla debe ser apisonada, con el pie, contra el vástago del termómetro.

2.7.6.2 Apariencia de la superficie del pavimento.

La textura de la carpeta deberá ser uniformemente densa, tanto en el sentido transversal como en el sentido longitudinal.

Si se observa una textura abierta, o un desgarre de la mezcla, al comenzar la operación del día, puede deberse a un calentamiento insuficiente del enrasador. Si aparece un desgarre de la mezcla debajo de las extensiones del enrasador, deberá revisarse el alineamiento de la extensión, las barras apisonadoras y los vibradores.

Cuando una inspección de la carpeta revele una segregación de la mezcla, deberá determinarse la causa y deberán efectuarse, inmediatamente, las correcciones necesarias.

- Desgarre o Rasgado que ocurre con frecuencia en una mezcla que está demasiado fría, y que aparece abierta y gruesa. El desgarre y el rasgado también ocurren debido a un ajuste inadecuado de un asfaltador equipado con barra apisonadora en la unidad del enrasador.
- Irregularidades en la Textura ya que una mezcla que contenga demasiada humedad no podrá colocarse correctamente y tendrá la apariencia de una mezcla fría o de una mezcla con demasiado asfalto. Además de presentar un posible desgarre, este tipo de mezcla presentará burbujeo y ampollamiento.
- La lisura del pavimento se ve afectada desfavorablemente por la falta de uniformidad en las operaciones de pavimentación, las graduaciones incorrectas de agregado, las variaciones de velocidad de la pavimentadora, la operación incorrecta de los camiones, y las prácticas deficientes de construcción de juntas.
- Falta de Uniformidad por la interrupción del asfaltador puede causar asperezas en la mezcla colocada. Cada vez que se detiene la pavimentadora, existe la posibilidad de que el enrasador deje una marca en la superficie de la carpeta. Si el enrasador se asienta dentro de la mezcla, el sensor automático actúa como si la pavimentadora estuviera pasando por una depresión. Por consiguiente, el enrasador comienza a colocar una carpeta gruesa cuando la pavimentadora reanuda la marcha. Esto continúa hasta que el sensor se da cuenta del espesor excesivo y entonces disminuye la

pendiente del enrasador. Esto crea una depresión hasta que el enrasador se vuelve a nivelar, lo cual ocurre aproximadamente a 9 metros (30 pies) de donde el enrasador se detuvo.

Los pavimentos ásperos también son el resultado de cambios en la cantidad de material depositado en frente del enrasador. El enrasador bajará de nivel si no hay suficiente material en frente; y viceversa.

- Granulometría Incorrecta de Agregado, como exceso de agregado grueso puede resultar en una mezcla áspera, la cual produce una superficie desigual de textura áspera. El exceso de finos en la mezcla puede causar una estabilidad baja, permitiendo que se formen ondulaciones en la superficie.

2.8 Compactación de Mezclas Asfálticas en Caliente

2.8.1 Que es la Compactación y que debe Conocer el Ingeniero.

La compactación es el proceso mediante el cual consiste en comprimir un volumen determinado de mezcla asfáltica en caliente, en uno más pequeño hasta lograr una densidad óptima. Esto se logra al comprimir las partículas de agregado, revestidas de asfalto, eliminando así la mayoría de los vacíos (espacios) en la mezcla y aumentando la densidad (proporción de peso a volumen) de la misma. Se considera que la compactación ha sido exitosa cuando la carpeta terminada tiene contenidos óptimos de vacíos y de densidad.

La necesidad de compactar un pavimento hasta alcanzar su densidad óptima puede entenderse mejor si se advierten los efectos del agua, el aire, y el tránsito en una mezcla subcompactada. Los vacíos en una mezcla subcompactada tienden a estar interconectados y permiten la penetración de aire y agua a través del pavimento. El aire y el agua contienen oxígeno, el cual oxida al asfalto (Ligante asfáltico) en la mezcla, causando que esta se vuelva frágil. En consecuencia, el pavimento no podrá resistir las deformaciones repetidas causadas por el tránsito, lo cual conducirá a su falla. Por otro lado, la presencia interna de agua, envejece al asfalto y puede ayudar a que el asfalto se desprenda de los agregados.

El contenido óptimo de vacíos, en una carpeta recién construida, es de 4 por ciento o menos para mezclas densamente graduadas. En este nivel, los vacíos no están, generalmente, interconectados. La Figura 9 es una representación gráfica del efecto de los vacíos sobre la

durabilidad del pavimento. Cuando el contenido de vacíos es demasiado alto, el pavimento tiende a presentar desmoronamiento y desintegración. Cuando el contenido de vacíos es demasiado bajo, hay peligro que el pavimento presente exudación y se vuelva inestable.

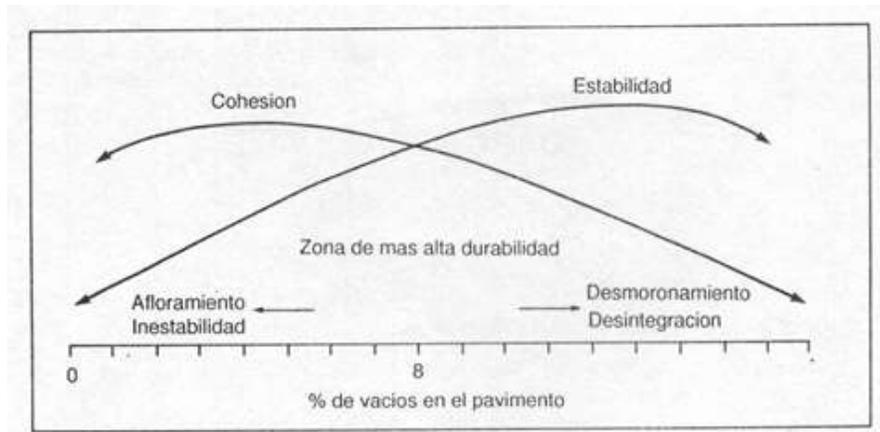


Figura 12. Durabilidad del Pavimento vs Contenido de Vacíos

La compactación logra dos objetivos importantes al comprimir las partículas de agregado. Estos son: resistencia y estabilidad de la mezcla. Adicionalmente, la compactación cierra los espacios a través de los cuales el agua y el aire pueden penetrar y causar un envejecimiento rápido, y desprendimiento. Por lo tanto el ingeniero debe de estar familiarizado con ciertos factores como los siguientes:

- Conocer los fundamentos del proceso de compactación.
- Estar familiarizado con el equipo normal de compactación.
- Conocer el proceso de compactación establecido por el tramo de prueba.
- Conocer los efectos de la segregación de temperatura en una mezcla asfáltica.
- Evitar los gradientes de densidad en las juntas.
- Diferenciar y aplicar los procesos para juntas longitudinales y transversales
- Distinguir las razones por las cuales las operaciones de compactación deben ser ajustadas para compensar las variaciones en las propiedades de la mezcla y en las condiciones ambientales.
- Conocer cómo se debe garantizar que un pavimento terminado cumpla con los requisitos de textura, rasante, y densidad.

El proceso de compactación parece ser simple y claro, pero en realidad es un procedimiento que requiere de la habilidad y conocimientos del operador de equipo y del ingeniero. Ambos deben tener un entendimiento completo del proceso de compactación que se estableció en la construcción del tramo de prueba, ya que es el procedimiento que el operador realizará y mantendrá durante todo el proyecto, además el operador debe conocer los factores que afectan la compactación de una capa de mezcla asfáltica en caliente.

2.8.2 Importancia de la Compactación.

La compactación está dirigida para producir una carpeta con una densidad específica, la cual por lo general es un porcentaje de la densidad de laboratorio. Según las normas establecidas; el proceso de compactación será monitoreado con densímetros nucleares calibrados de acuerdo con los resultados de compactación en los tramos de prueba. Se compactará con la meta de obtener densidades en sitio no menores del 92 % y no más del 98 %, respecto a la densidad máxima teórica determinada de acuerdo con AASHTO T 209.

En ocasiones se toman valores de densidad en base a la densidad bulk determinada con AASHTO T 166; pero expertos en control de calidad de mezcla recomiendan que la mejor opción para establecer un porcentaje de densidad para mezcla compactada en campo, es en base a la densidad teórica máxima, ya que la gravedad específica teórica máxima se mantiene casi constante durante los controles diarios de mezcla que se realizan en una planta asfáltica; mientras que la gravedad específica bulk presenta cambios más significativos, ya que depende de la temperatura de compactación, como es operado el equipo de compactación, vacíos en la mezcla, entre otros factores que pueden influir. Además en dicha sección también menciona que no se permitirá la compactación cuando la temperatura en la mezcla descienda de 100 °C (para capas asfálticas de espesor inferior a 75 mm) y de 110 °C (para capas asfálticas de espesor superior o igual a 75 mm); en cuyo caso se deberá retirar del sitio de la obra.

La compactación es la etapa final de las operaciones de pavimentación de mezclas asfálticas en caliente. Es la etapa en la cual se desarrolla la resistencia total de la mezcla y en donde se establecen la lisura y textura de la carpeta.

En consecuencia, es durante el proceso de compactación, que el ingeniero debe de estar sumamente atento, como ya se dijo es la etapa final de un proceso de trabajo complementario

el en cual intervienen cuatro etapas: diseño en laboratorio, producción en planta, colocación y por último la compactación.

El ingeniero no puede darse el lujo de descuidar o no aplicar el procedimiento adecuado y correcto de compactación, ya que, si la compactación se realiza mal, no se valora el trabajo de las tres etapas previas a la compactación, una mala compactación tiene serias consecuencias, ya que se llegan a dar opiniones erróneas acerca del desempeño de la carpeta asfáltica como producto terminado, cuando ésta falla prematuramente, fácilmente suelen decir que el diseño no satisface las exigencias (que no es un buen diseño) ó que se produjo mal en la plantas; cuando en realidad la etapa que se hizo mal es la compactación.

El ingeniero, además de mantener registros precisos y detallados y observar la confiabilidad del proceso, debe asegurar que la compactación se efectúe correctamente y que el pavimento terminado cumpla con todas las especificaciones. Para lograr esto, el ingeniero debe conocer todo el procedimiento de compactación que se va aplicar, este se obtiene del tramo de prueba; además, debe de estar familiarizado con el equipo a utilizar.

2.8.3 Factores que Afectan la Compactación.

Los factores que afectan la compactación pueden dividirse en tres clases:

- Propiedades de la mezcla.
- Efectos ambientales.
- Espesor de la capa.

2.8.3.1 Propiedades de la mezcla.

Ciertas propiedades del asfalto y el agregado tienen un efecto pronunciado sobre la trabajabilidad de la mezcla, a diferentes temperaturas. Estas propiedades, así como la temperatura de la mezcla en la compactación, deben tenerse en cuenta cuando se selecciona un procedimiento de compactación.

2.8.3.1.1 Agregado

La granulometría, textura superficial y la angulosidad del agregado, son las principales características que afectan la trabajabilidad de la mezcla. A medida que aumenta el tamaño máximo de agregado, o el porcentaje de agregados gruesos en la mezcla, la trabajabilidad disminuye, y por consiguiente se requiere un mayor esfuerzo de compactación para obtener

la densidad de referencia. Igualmente, una textura superficial áspera en el agregado, en vez de una textura lisa y vidriosa, resulta en una mezcla más estable y requiere de un mayor esfuerzo de compactación. Las mezclas producidas con grava son, frecuentemente, más trabajables que las producidas con piedra de cantera.

Las arenas naturales son añadidas a las mezclas, con frecuencia, para buscar economía. Una mezcla con demasiada arena, especialmente en los tamaños medianos (alrededor del tamiz de 0.60 mm (No. 30)), puede resultar en una mezcla con alta trabajabilidad pero poca estabilidad. Frecuentemente, estas mezclas son susceptibles a desgarrarse y deformarse bajo el tránsito, aún después de varias semanas de haber sido compactadas.

El contenido de finos o relleno mineral en la mezcla también afectará el proceso de compactación. La combinación de relleno mineral y asfalto proporciona la fuerza adherente en los pavimentos de mezcla en caliente; por consiguiente, la mezcla debe tener suficientes finos para que se combinen con el asfalto y puedan producir la cohesión necesaria cuando la mezcla se enfríe. La adición de relleno mineral ayudará a compensar las propiedades desfavorables de las mezclas que contienen demasiada arena.

2.8.3.1.2 Asfalto

A temperatura ambiente el asfalto es virtualmente sólido, mientras que a temperaturas entre 120 y 150°C (250 a 300°F) es completamente fluido. Para que una mezcla pueda ser compactada correctamente, el asfalto debe tener suficiente fluidez para permitir que las partículas de agregado se muevan unas respecto a otras. En efecto, el asfalto trabaja como un lubricante durante la compactación. A medida que la mezcla se enfría, el asfalto pierde su fluidez (se vuelve más viscoso). Es así como a temperaturas por debajo de 85°C (185°F), el asfalto, en combinación con los finos de la mezcla, comienza a ligar firmemente las partículas de agregado: En consecuencia, la compactación de la mezcla se hace extremadamente difícil cuando se ha enfriado por debajo de 85 °C.

La viscosidad del asfalto está determinada por el grado de asfalto usado, y por la temperatura a la cual se produce la mezcla. Un asfalto de alta viscosidad puede requerir una temperatura ligeramente mayor de compactación y/o un mayor esfuerzo de compactación, siempre y cuando todos los demás factores permanezcan constantes.

A medida que aumenta el contenido de asfalto, el espesor de la película de asfalto sobre las partículas de agregado también aumenta. Este aumento de espesor de película aumenta, a su vez, el efecto lubricante del asfalto a las temperaturas de compactación, y hasta cierto punto hace que la compactación sea más fácil de efectuar.

2.8.3.1.3 Temperatura de Mezclado.

La temperatura a la cual una mezcla asfáltica es producida afecta la facilidad de la compactación y el tiempo que le toma a la mezcla para enfriarse hasta 85 °C la temperatura mínima a la cual todavía puede haber densificación. Hasta cierto nivel, entre más caliente este la mezcla, más fluido será el asfalto y menos resistente será la mezcla bajo la compactación. El límite superior para la temperatura de la mezcla es de 163 °C (325 °F).

La densidad de la carpeta compactada es afectada por la segregación de temperatura durante el transporte y la subsiguiente colocación de la mezcla asfáltica. La segregación de temperatura es cuando la mezcla asfáltica presenta porciones de mezcla con diferentes temperaturas, en una mezcla que se compacte bajo estas circunstancias las zonas que tengan una temperatura menor comparada con la demás mezcla al ser compactas tendrán una menor densidad, lo que influye en la calidad del pavimento, mediante el uso de una cámara infrarroja durante la construcción de una vía, se observa que el diferencial de temperatura en la carpeta de asfalto colocada era significativamente mayor de lo pensado, en la figura 10 se pueden apreciar zonas frías (zona negras) y un diferencial de temperatura de 29.65 °C.

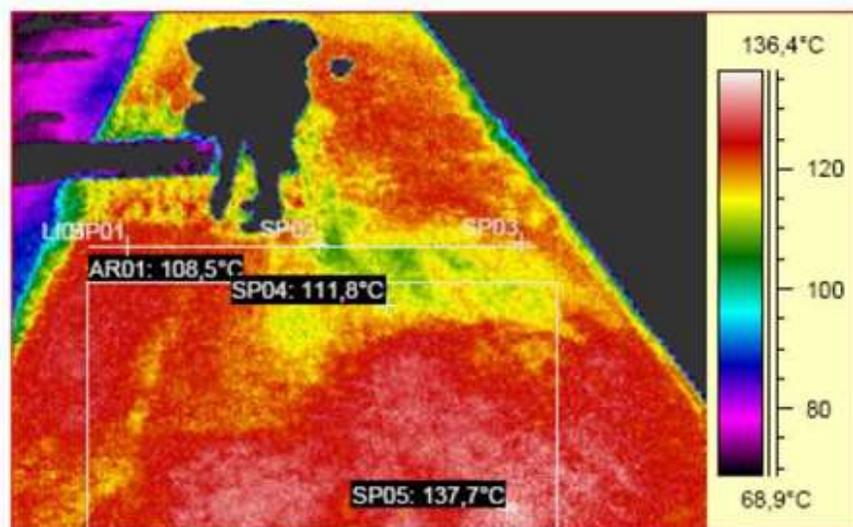


Figura 13. Segregación de Temperatura en una Mezcla Extendida

2.8.4 Control de la Mezcla en Obra y de su Compactación

Durante la construcción de un pavimento es necesario establecer Planes de Control de Calidad para garantizar un producto satisfactorio; el término de control de calidad encierra un proceso muy grande el cual involucra a muchos sectores de una empresa constructora incluyendo por supuesto el personal, a continuación se hace mención de los conceptos más importantes con dicha actividad.

Control de Calidad

Son métodos y actividades establecidas para alcanzar un determinado fin y cuyo objetivo es cumplir, verificar y actuar para consumir y mantener requisitos, que son necesarios para producir con una calidad determinada; además dichos métodos permiten establecer límites de aceptación para materiales, actividades, procesos y resultados.

Como resultado podemos mencionar que Control de la Calidad:

- Son métodos y actividades establecidos por la empresa.
- Surge a partir de requisitos impuestos por la calidad de lo que se debe producir.
- Debe de mantener, cumplir y efectuar dichos requisitos.
- Permite establecer límites de aceptación para materiales, procesos y resultados.

Pero el término de control de calidad es bastante completo y requiere de un Aseguramiento de la Calidad, el cual se comprende como: conjunto de actividades sistemáticas que planean, organizan, dirigen y controlan la calidad y que se aplican en un sistema de la calidad, para verificar y asegurar el buen desarrollo; proporcionando de esta manera la confianza, que el producto brindado, cumple con las normas y especificaciones requeridas por el cliente.

3.1 Desarrolla de la Investigación

Para dar inicio al trabajo de investigación sobre las mezclas asfálticas que se utilizan en la ciudad de Tarija, primeramente comenzaremos con la caracterización del material pétreo y el cemento asfáltico, de tal manera que estos cumplan con las especificaciones establecidas por normas.

3.2 Ubicación Banco de Materiales

San José de Charaja se encuentra ubicado pasando el valle de la concepción, ruta hacia Chocloca a 35 min. de la ciudad de Tarija dónde se procesa el material chancado y se extrae la arena natural y se encuentra almacenado el cemento asfáltico.



Figura. 14 y 15. Ubicación de Banco de Materiales

3.3 Ubicación de Laboratorios

El presente trabajo de investigación se realizó en los laboratorios asfaltos del SEDECA (Servicio Departamental de Caminos) ubicado por la zona del barrio SENAC.

3.4 Caracterización del Agregado Grueso y Fino

Se realizaron ensayos de control de calidad de agregados triturados procedentes de la chancadora de San José de Charaja en los predios de laboratorios del SEDECA; los resultados de la arena natural, material chancado, se adjunta las características de calidad del material; todos estos componentes de la carpeta asfáltica se ejecutaron y aprobaron según norma AASHTO y especificaciones de proyecto.

3.4.1 Obtención de Muestras

Siguiendo el procedimiento de la norma, del Método para Extraer y preparar Muestras AASHTO T2-91, se toma las muestras de tal manera que se verifica que tenga las características requeridas, tanto material grueso y fino, ya sean canto rodado o material chancado.

Banco de Materiales y Chancadora

- San José de Charaja - Chocloca

Por producto de la chancadora se puede evidenciar material granular de 3/4'' y 3/8'' y arena chancada, y también se obtuvo muestra de arena Natural.

Se obtuvo aproximadamente 50 kg, para las muestras de 3/4'' y 3/8'' y 30 Kg. Para la arena natural y chancada.



Figura. 16 y 17. Obtención de Muestras Material Granular

3.4.2 Selección del Material

Una vez realizado la toma de muestras, procedemos a realizar una verificación visual del estado de la misma, de manera que se tuvo que vaciar las muestras en el laboratorio para realizar una buena distribución de las mismas para los diferentes ensayos.

Se informa que al momento de realizar la inspección visual se tuvo el conocimiento de la disponibilidad de la arena natural, que luego influenciara para el diseño.

3.4.3 Composición Granulométrica de los Agregados.

A continuación se presenta una figura y la tabla de resultados de las granulometrías del material chancado y el natural y el juego de tamices utilizados para el procedimiento.



Figura 18 Granulometría

Tabla 15. Granulometrías de Producción

Tamices	% que pasa 3/4"	% que pasa 3/8"	% que pasa Arena Natural"	% que pasa Arena Chancada"
1"	100			
3/4"	98,9			
1/2"	21,8	100	100	
3/8"	2	90,8	99,3	100
Nº 4	0,7	20,2	84	98,6
Nº 8	0,7	13,9	74,6	8,4
Nº 10	0,7	7,6	65,2	82,2
Nº 16	0,7	6,6	56,5	72
Nº 40	0,7	4,7	34,9	44,6
Nº 50	0,7	4,1	29,1	37,4
Nº 80	0,4	3,4	24,1	30

N° 200	0,3	2	21,8	18,1
--------	-----	---	------	------

- Valores Promedios de Granulometrías

Con la granulometría se obtiene el tamaño máximo nominal que servirá para el diseño de la mezcla asfáltica.

3.4.4 Resumen de Características de los Agregados

A continuación se muestra la tabla de resumen de resultados de caracterización del agregado tanto fino y grueso, en base a la Norma Boliviana y/o la AASHTO

Tabla 16. Características de los Agregados

AGREGADOS					
Ensayo	Unid.	Resultados	Especificaciones		Designación
			Mínimo	Máximo	AASHTO
Peso específico agregado grueso	gr./cm ³	3			T-166
Peso específico agregado fino	gr./cm ³	3			T-100
Laminaridad Material (3/4´´)	%	0,24		15	
Laminaridad Material (3/8´´)	%	2,68		15	
Chatas y Alargadas (3/4´´)	%	0,24		10	
Chatas y Alargadas (3/8´´)	%	2,5		10	
Desgaste de Los Ángeles (3/4´´)	%	22,92		40	T-96
Desgaste de Los Ángeles (3/8´´)	%	23,08			
Durabilidad Agregado Grueso	%	6,12		12	T-104
Durabilidad Agregado Fino	%	7,76			
Caras Fracturadas (3/4´´)	%	95,4	75		
Caras Fracturadas (3/8´´)	%	99,5			
Límite líquido	%	19,2			T-89
Límite Plástico	%	N.P.			T-90
Equivalente de arena	%	59,2	45		T-176

- Con los valores de peso específico del agregado grueso y fino, al no tener limitaciones pero influirán más adelante en el ensayo Marshall
- Cabe recalcar que las para Laminaridad, Chatas y Alargadas, Desgate de los Ángeles Durabilidad, Caras Fracturadas y equivalente de Arena, están dentro de las especificaciones (mínimas y máximas) requeridas para el Diseño Marshall.

3.5 Caracterización del Cemento Asfáltico

Se realizaron ensayos de control de calidad del cemento asfáltico procedentes del depósito de almacenamiento que se encuentra en San José de Charaja en los predios de laboratorios del SEDECA; los resultados obtenidos se adjuntan con las especificaciones requeridas, el cual será un componente de la carpeta asfáltica, se ejecutaron y aprobaron según norma AASHTO y especificaciones de proyecto.

3.5.1 Obtención De Muestras

El realizar el proceso de obtención de muestras se obtuvo a partir de turriles de almacenamiento del depósito, según el procedimiento de obtención de muestras de Cemento asfáltico A0 101 y 1 AASHTO T40, de aproximadamente de 2 Kg de muestra.



Figura 19 y 20 Toma de muestra de cemento Asfáltico

3.5.2 Resumen De Características Del Cemento Asfáltico

En la siguiente tabla se muestra los valores obtenidos de los ensayos utilizados para la caracterización del cemento asfáltico en base a la Norma Boliviana y la AASHTO:

Tabla 17. Resumen de Características del Cemento Asfáltico

CEMENTO ASFÁLTICO 85 - 100					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Peso específico	gr./cm ³	1.008	1.00	1.050	T-228
Punto de Inflamación	°C	>232	232		T-48
Penetración a 25 °C; 100 gr., 5 seg.	mm.	89	85	100	T-49
Punto de Ablandamiento	°C	44	49		T-53
Viscosidad Saybol Furol a 135°C	seg.	130	100		T-72

En cada uno de los ensayos muestras las especificaciones requeridas, y en todos ellos se cumplen los máximos y mínimos requeridos, de tal manera que es adecuado para realizar el diseño Marshall.

3.6 Contenido Óptimo de Mezclas Asfáltica por el Ensayo Marshall

Dados los resultados de caracterización del material pétreo y cemento asfáltico, procedemos a realizar el cálculo del contenido óptimo de cemento asfáltico

3.6.1 Selección Curva Granulométrica

Durante el proceso y análisis de la combinación granulométrica para su aplicación en el proyecto y conforme con los requisitos exigidos por las especificaciones técnicas, CONCRETO MEZCLADO EN CALIENTE se realizó una evaluación de las fajas correspondientes de la tabla 18, REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA LA MEZCLA, observándose lo siguiente:

Considerando las fajas de las especificaciones para el trabajo de investigación, se procedió a dosificar teóricamente los materiales para verificar si estos se encuadran dentro de lo establecido; el método empleado para tal fin fue el de tanteos, por razonamiento lógico. Dada la naturaleza de las granulometrías de producción, se pudo cumplir con los requisitos que se establece en la faja de diseño (Ver tabla N° 1) de las especificaciones para las características de la zona (tipo de clima y tráfico de la región).

Tabla 18. Requisitos de Graduación para la Mezcla

Tamices	Tamaño Máximo Nominal del Agregado $\frac{3}{4}$ mm Porcentaje total que pasa	
	Mínimo	Máximo
1''	100	100
$\frac{3}{4}$ ''	80	100
$\frac{1}{2}$ ''	67	85
$\frac{3}{8}$ ''	60	77
Nº 4	43	54
Nº 10	29	45
Nº 40	14	25
Nº 80	8	17
Nº 200	4	8

3.6.2 Composición Granulométrica de la Curva de Proyección de los Agregados.

Después de analizar el cuadro de la composición granulométrica de los agregados y cumpliendo las exigencias de las especificaciones técnicas, la composición porcentual en peso de los agregados, resultado de varias tentativas alcanza los siguientes valores, en base s agregados:

Tabla 19. Aporte Porcentual de Agregados en Peso

Material	Cantidad (%)
Grava $\frac{3}{4}$ ''	33%

Grava 3/8"	28%
Arena Chancada	39 %
TOTAL	100%

Se muestra en la anterior tabla donde ya no se toma en cuenta la arena Natural en el diseño Marshall, debido a su falta de disponibilidad de la misma. Se puede ver más a detalle en la parte de anexos de agregados.

Con los porcentajes obtenidos se obtiene la curva proyectada para el diseño, de tal manera que esta se encuentre dentro de los valores de la faja de diseño:

Tabla 20. Valores para la Curva Proyectada

Tamices	Curva Proyectada	Faja de diseño	
		Mínimo	Máximo
1"	100.00	100	100
3/4"	99.6	80	100
1/2"	74.2	67	85
3/8"	64.54	60	77
Nº 4	44.3	43	54
Nº 10	34.40	29	45
Nº 40	18.9	14	25
Nº 80	12.8	8	17
Nº 200	7.7	4	8

- Faja de diseño obtenida en relación al tamaño máximo nominal del agregado.

3.6.3 Valores Característicos de la Mezcla Asfáltica

Efectuado lo anteriormente en función de las granulometrías de cada uno de los agregados, establecida la curva granulométrica, la faja de trabajo y los pesos específicos se realizó el ensayo DISEÑO DE MEZCLAS EN CALIENTE METODO MARSHALL, el cual exige material que pasa el tamiz de una pulgada (1") 100%, y que el tamaño máximo exigidos sea de 2/3 del espesor total del pavimento, revisión para el contenido óptimo y las cantidades de aporte porcentual en peso de los áridos para la mezcla y la definición de la curva de trabajo en obra.

A continuación se muestra la tabla de resultados que darán lugar a la obtención del contenido óptimo de cemento asfáltico

Tabla 21. Resumen de Valores Marshall con Diferentes Contenidos de Asfalto

DESCRIPCIÓN	1	2	3	4	5	6
% de asfalto	4,3	4,8	5,3	5,8	6,3	6,8
Densidad Máxima Teórica (gr./cc)	2,499	2,466	2,445	2,427	2,409	2,391
Densidad Real de la Mezcla (gr./cc)	2,311	2,333	2,347	2,356	2,338	2,304
Vacíos de la mezcla en (%)	6,907	5,311	4,046	2,933	2,959	3,659
Vacíos del agregado mineral (%)	16,767	16,421	16,384	16,490	17,571	19,201
Relación betumen vacíos	58,806	67,659	75,303	82,212	83,160	80,945
Estabilidad (Libras)	3.963	3.849	3.489	2.872	2.460	1.879
Fluencia (1/100")	6,700	9,600	10,533	11,133	13,067	14,800



Figura. 21 y 22. Elaboración de Briquetas



Figura. 23, 24 y 25. Elaboración de Briquetas

Con los gráficos obtenidos anexos obtenemos el % de vacíos de la mezcla y relación Betumen Vacíos, encontraremos un valor tentativo del contenido óptimo de cemento asfáltico de 5.77 %, redondeamos este valor al 5.7%, y vemos que los resultados se encuentran dentro del rango, dando a lugar a que 5.7% sea el contenido óptimo de la mezcla asfáltica para esa granulometría.

A continuación se muestra la siguiente tabla que será utilizada para el trabajo de investigación las cuales nos interesan los porcentajes de cada material utilizado y porcentaje de peso del cemento asfáltico.

Tabla 22. Relación Materiales / Asfalto.

MATERIAL	%	Unidad
% que pasa ¾"	31,119	En peso
% que pasa 3/8"	26,404	En peso
% que pasa Arena Natural"	0	En peso
% que pasa Arena Natural"	36,777	En peso
C.A. 85-100	5,7	En peso

3.6.4 Características de la Mezcla.

Se presenta un resumen de los valores característicos de la mezcla y las especificaciones de la misma, que se encuentran dentro de los parámetros establecidos.

Tabla 23. Características de la Mezcla

CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA			ESPECIFICACIONES	
DESCRIPCION	Unidad	Valor	Mínimo	Máximo
Peso específico de C.A.	gr./cc	1,008	1.000	1.050
Densidad Teórica	gr./cc	2		
Densidad Real de la Mezcla	%	2		
Vacíos totales	%	3,29	2	4
Vacíos del agregado mineral	%	16,574	>15	
Relación bitumen vacíos	%	80,1	75	82
Estabilidad	Libras	3006,2	1800	

Fluencia	1/100"	11,55	8	18
% Cemento asfáltico	%	5,7		

3.6.5 Temperaturas.

Las temperaturas de trabajo para las diversas etapas del procedimiento Marshall, fueron basadas en las recomendaciones del "Asphalt Institute", tomándose como regencia la correlación de la curva "Viscosidad / Temperatura", conforme gráfico anexo:

Tabla 24. Temperaturas de Trabajo

Calentamiento de los Agregados en planta	<i>157 – 162 °C</i>
Temperatura del cemento Asfáltico	<i>159 – 162 °C</i>
Temperatura de Compactación	<i>133 – 137 °C</i>

3.7 Aplicación del Trabajo de Investigación

Cumpliendo con lo estipulado en el trabajo de investigación, aplicar la variable de la temperatura de compactación con el % óptimo de Cemento Asfáltico de diseño para estudiar la variación de sus propiedades de la mezcla compactada.

3.7.1 Toma de Muestras

Con todos los valores de la granulometría de la curva proyectada, y el porcentaje de contenido óptimo se prepararan las muestras para el trabajo de investigación, controlando los pesos de cada granulometría y los pesos del cemento asfaltico, que en este caso ya no a de variar sino la variable es la temperatura a las que se realizaran las briquetas

3.7.2 Variaciones de Temperatura de Compactación

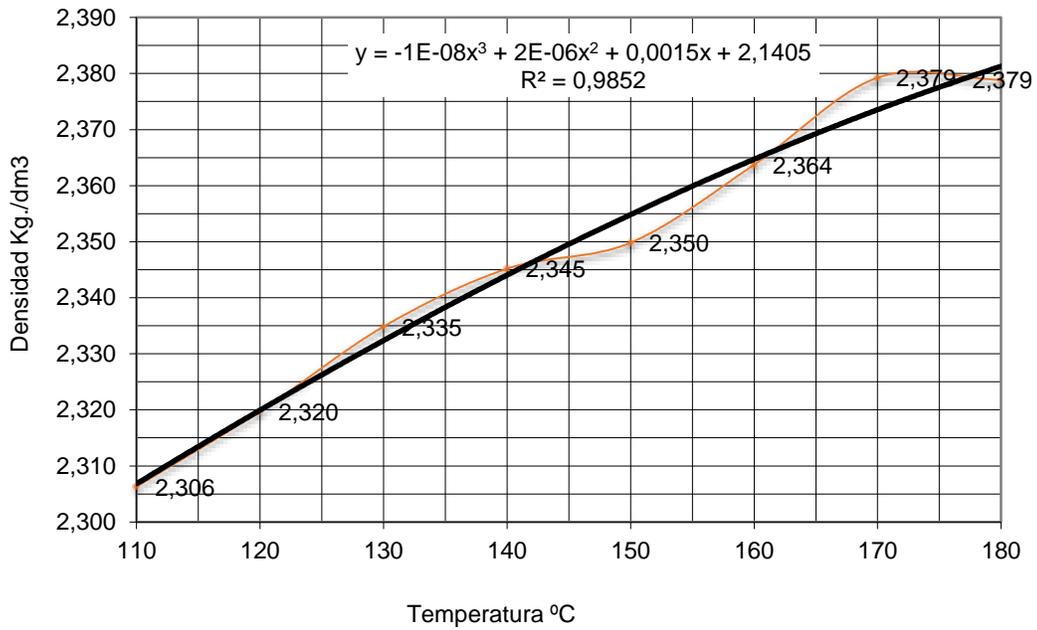
Se respetara la mayoría del ensayo Marshall, donde se verá afectado la parte de temperatura de compactación de tal manera que ya no se tome en cuenta las temperaturas obtenidas por la carta de viscosidad, sino aquellas que tendrá al momento de llegar al colocado en plataforma por diferentes factores.

En la Siguiete tabla se muestra los resultados de las aplicaciones de diferente temperatura de compactación

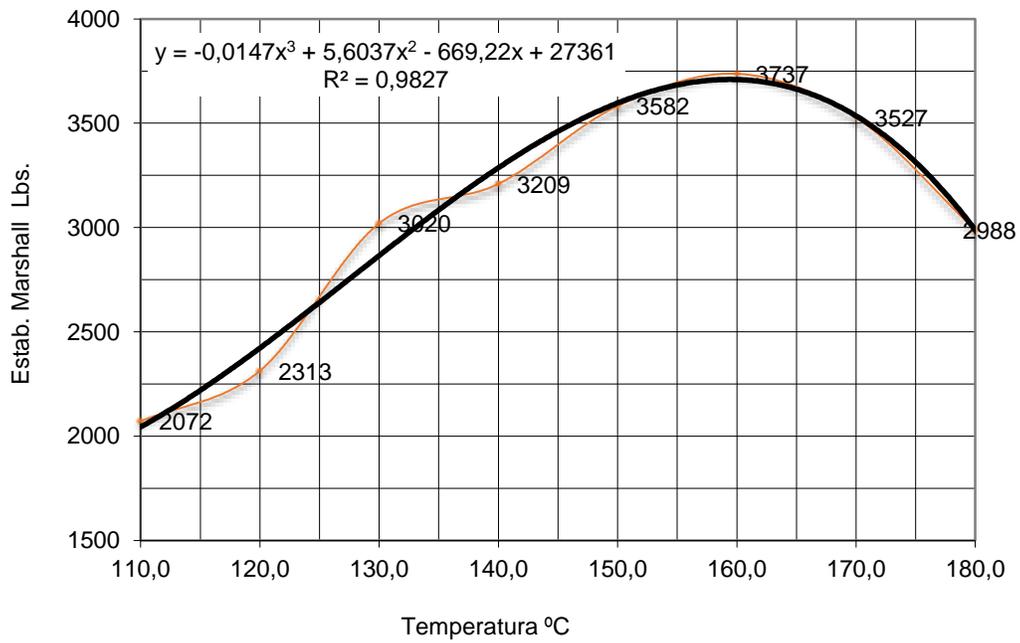
Tabla 25. Resultados del Trabajo de Investigación

Temperaturas de Compactación	Densidad	Vacíos	R.B.V	Estabilidad Marshall	Flujo	V.A.M.
°C	gr./cc	%	---	Libras	1/100”	%
110,0	2,306	5,12	71,79	2072	17,7	18,17
120,0	2,320	4,57	74,15	2313	16,7	17,69
130,0	2,335	3,95	76,97	3020	15,6	17,15
140,0	2,345	3,52	79,00	3209	16,7	16,79
150,0	2,350	3,33	79,94	3582	17,7	16,62
160,0	2,364	2,76	82,87	3737	18,3	16,13
170,0	2,379	2,12	86,37	3527	19,1	15,58
180,0	2,379	2,14	86,28	2988	19,69	15,59

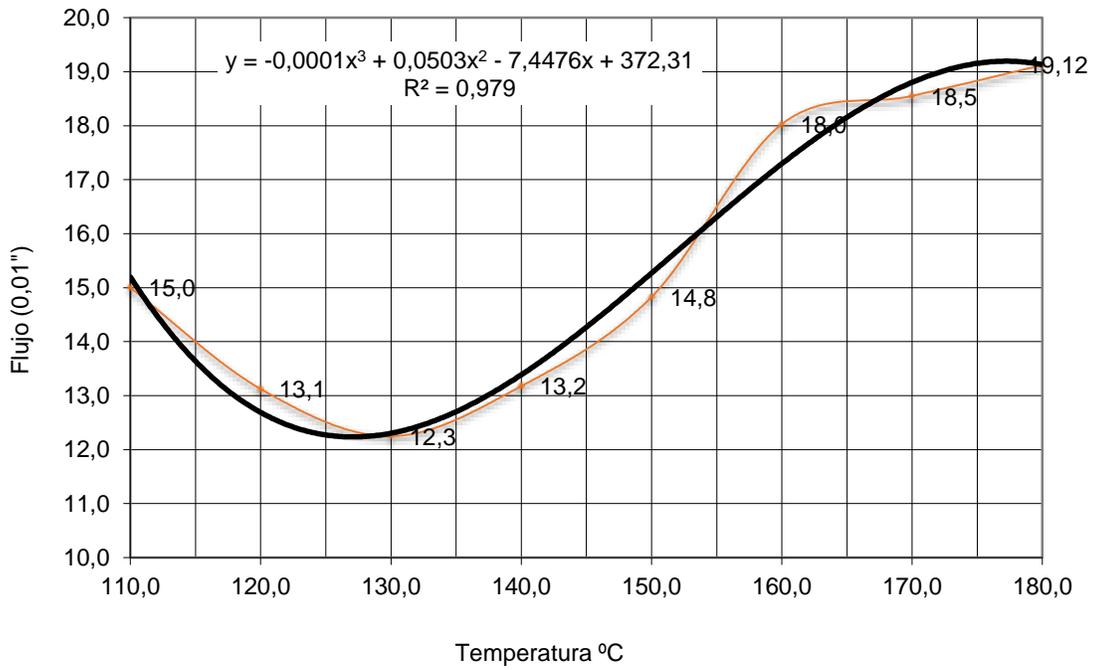
3.7.3 Gráficos de Resultados obtenidos de la Investigación



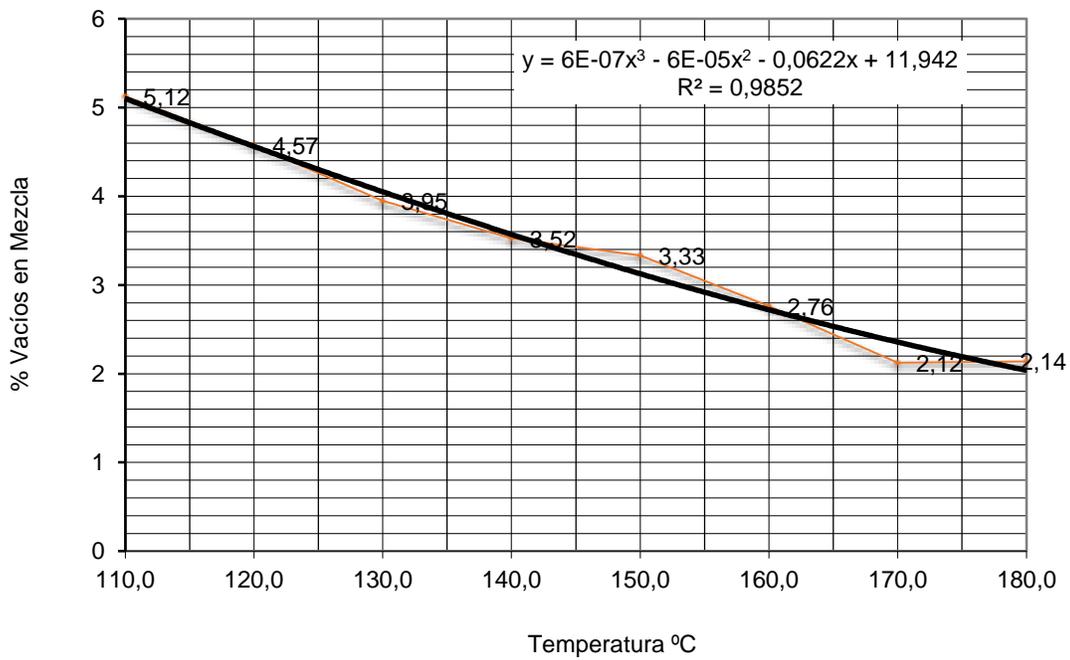
Gráfica 3. Densidad vs. Temperatura de Compactación



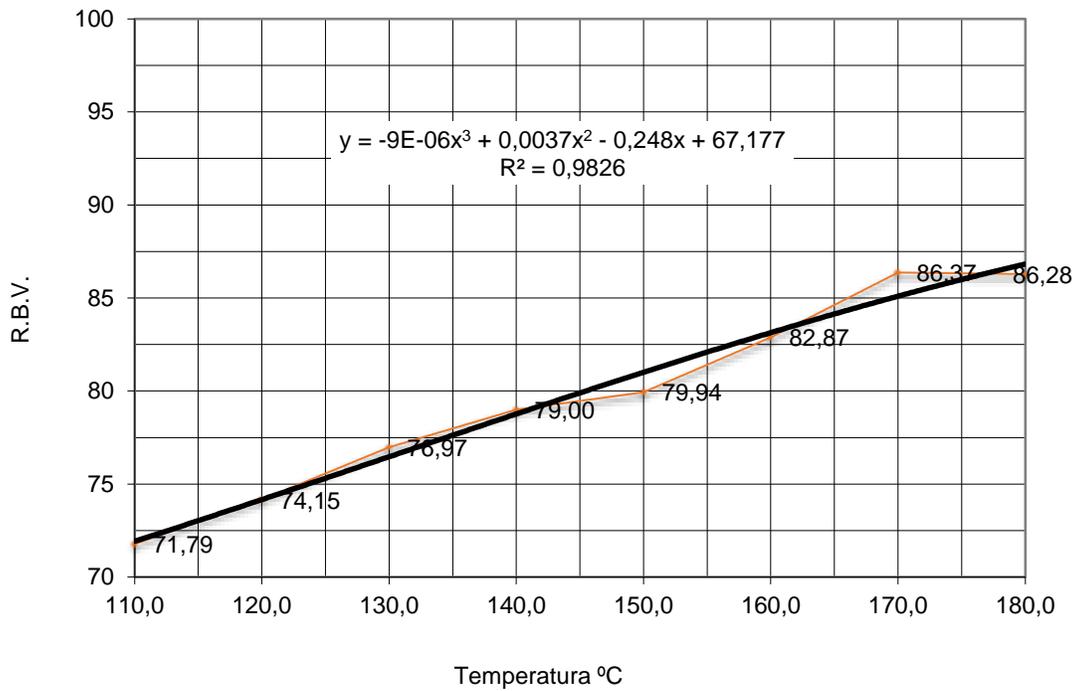
Gráfica 4. Estabilidad vs. Temperatura de Compactación



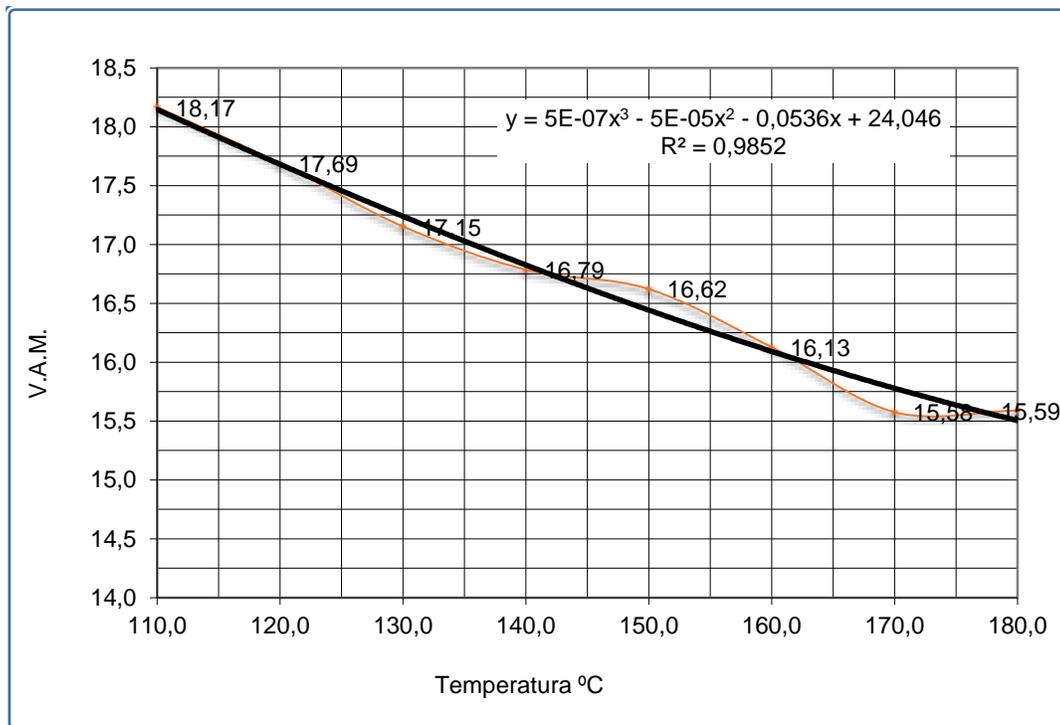
Gráfica 5. Flujo vs. Temperatura de Compactación



Gráfica 6. % de Vacíos vs. Temperatura de Compactación

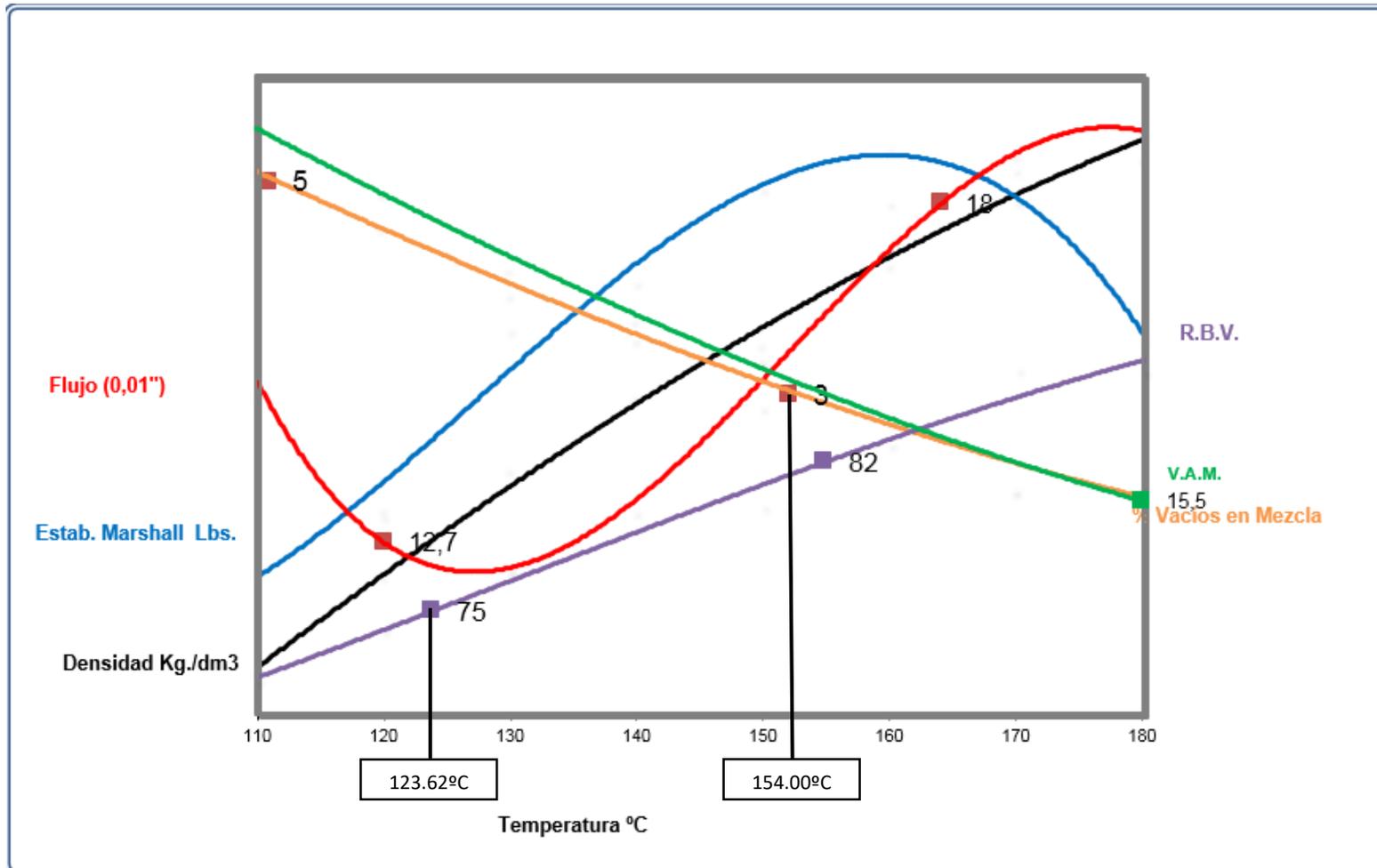


Gráfica 7. Relación Betumen Vacíos vs. Temperatura de Compactación



Gráfica 8 Vacíos del Agregado Mineral vs. Temperatura de Compactación

Comportamiento de las propiedades de la mezcla en función a la temperatura



Gráfica N° 9. Obtención de la Temperatura Adecuada a Compactar

3.8 Análisis Estadístico

Con los resultados que se obtienen de la investigación se obtiene gráficos, debido a dispersión que tiene los datos, se realiza el cálculo de una ecuación de correlación que este en función de las temperaturas de compactación y las propiedades estudiadas.

El hecho que los gráficos ya contienen las ecuaciones de correlación, por el método de los mínimos cuadrados que servirá para determinar a las temperaturas que conservas las especificaciones requeridas.

Podemos observar que los modelos seleccionados son ecuaciones polinómicas de tercer grado, dando como resultado correlaciones con ajuste elevado superiores al 97% en todos los casos.

- El proceso de cálculo de las ecuaciones polinómicas de tercer grado se encuentra en la parte de anexos del análisis estadístico

3.9 Análisis e Interpretación de Resultados

Cabe mencionar que la totalidad de los datos obtenidos fue por productos en ensayos realizados en laboratorio y que incluso fueron usados valores de temperatura de compactación superiores a los recomendados para analizar los mismos, ya que en algunos análisis estos no influyen mucho.

3.9.1 Análisis de los Gráficos

Con los resultados obtenidos y los gráficos ya señalados anteriormente, se procede a analizarlos cada uno de ellos, e identificar el comportamiento de las gráficas y el comportamiento de las mismas

- Densidad.

Analizando la Gráfica de Densidad vs. Temperatura de compactación, el Valor de la Densidad decae cuando la temperatura desciende y la densidad aumenta cuando esta sube, hasta el momento que alcanza las altas temperaturas se ve que alcanzaría su densidad máxima, porque el cemento asfáltico se vuelve muy trabajable que hace que se compacte mejor, trabajando de mejor manera con los finos que tiene la mezcla asfáltica, se ve que al llegar a altas temperaturas extremas, como ser 170 y 180, sus valores no suben, si no se

mantienen, a estas temperaturas el cemento asfáltico y el material granular se comienza a cambiar (se quema) afectando de manera las propiedades de las mezclas.

- Estabilización

La gráfica de Estabilidad Marshall vs. Temperatura de compactación vemos que la resistencia de la mezcla decae a temperaturas menores ya que no lograr formar una buena masa con el material y el cemento asfaltico se enfría y logra acomodarse de buena manera, pero al aumentar la temperatura esta adquiere más resistencia por la misma razón que adquiere menor resistencia, pero se ve que al llegar a temperaturas extremas decae la resistencia debido a la los mismos motivos mencionados en la densidad.

- Fluencia

Con la gráfica de Fluencia vs. Temperatura de Compactación, se espera que la temperatura menores a las de diseño alcanzo su valor mínimo de deformación que estaría dentro de las especificaciones, pero al aumentar la temperatura sus valores suben ya sea porque no se no se lograr una buena cohesión de la mezcla, haciéndola más quebradiza, y por ser más flexible en mayores temperaturas.

- % de Vacíos

Con la Gráfica de Vacíos vs Temperatura de Compactación, Se espera tener el comportamiento deseado, que los vacíos aumenten a menores temperaturas y aumenten a mayores, debido a como se entrelazan el cemento asfáltico y el agregado, mezcla asfáltica más trabajable llenando los vacíos de las muestras.

- Relación Betumen Vacíos

La gráfica Relación de Betumen vacíos vs. Temperatura de compactación, solo es el resultado de los vacíos y el porcentaje de cemento asfáltico.

- Vacíos del Agregado

La gráfica de Vacíos del Agregado Mineral vs. Temperatura de compactación hace que las vacíos en el agregado aumentan a menores temperaturas ya que el cemento asfáltico no logra ingresar a tapar los huecos en el agregado, y a mayores temperaturas se puede ver que el cemento asfaltico es más fluido ingresando en los vacíos.

Con los Gráficos y resultados de la misma, podemos determinar las conclusiones del tema, analizando la evolución de las propiedades de la mezcla asfáltica junto con los gráficos y realizando una buena interpretación de los mismos.

Con los análisis realizados y las gráficas obtenidas podremos interpretar los resultados y las conclusiones, para obtener las recomendaciones del tema.

- Junto con los 6 gráficos, se tendrá un intervalo de valores donde la mezcla asfáltica todavía continúe conservando propiedades dentro de los parámetros mínimos.

3.9.2 Análisis de los Resultados en Conjunto

El hecho de solo mencionar el comportamiento de cada uno en función de la temperatura solo son resultados en los cuales los comportamientos eran predecible, pero desde este punto es la interpretación del conjunto que dará lugar a alcanzar los objetivos planteados.

- Está claro que por temperaturas por inferior a la recomendada, esta es menos densa, tiene más vacíos, su estabilidad es baja, y su V.A.M. es alto, será menos trabajable, sería más permeable permitiendo el paso del agua y aire, volviéndola disminuyendo su resistencia a las deformaciones, haciéndola menos durable.
- Al ser a temperaturas superiores a las recomendadas, la densidad aumenta, su estabilidad es alta y el V.A.M. es bajo, sea más trabajable, hasta volviéndola más rígida se disminuirá el % neto de asfalto para generar la película, haciéndola quebradiza a la acción del tráfico y por consiguiente menos durable.

EL hecho que se comporte de esta manera, y con los ecuaciones de los gráficos, junto con las especificaciones mínimas requeridas de la mezcla, encontramos los valores en los cuales todavía conserven las propiedades y características requeridas, dando a lugar un intervalo de temperatura de compactación dónde cumpla las expectativas deseadas. Que es mencionado a continuación:

- Empezando con los porcentajes de vacíos según la ecuación calibrada tenemos q cumple las especificaciones máximas y mínimas a unas temperaturas de 111 °C a 152 °C.
- Por los vacíos del agregado mineral tenemos que las temperaturas deben ser inferiores a los 175 °C para poder cumplir con las especificaciones.

- Por la relación Betumen asfalto con la ecuación calibrada, tenemos que para cumplir con las especificaciones máximas y mínimas, las temperaturas deben estar entre el rango de 123.62 °C a 154.55 °C.
- La mezcla siempre cumplirá el valor de estabilidad a cualquier temperatura,
- Cuando se trata de la fluencia, podemos determinar que la temperatura menores a 164°C, cumplirán con las especificaciones mínimas y máximas de la mezcla.
- Por la densidad, cumple con los valores, pero se debe tomar en cuenta que la norma recomienda que los rangos de la densidad deben estar entre el 92 y 98%, dando a lugar a que no cumpla las especificaciones mayores a 170 °C.

Con este análisis se obtiene que el rango de trabajo donde conservara las especificaciones mimas y máximas requeridas que deben tener una mezcla asfáltica es de 123.62 °C a 152 °C.

Con la finalidad de tener resultados satisfactorios en el proceso constructivo, se creó una especificación técnica, para realizar un mayor control en la compactación y garantizar su funcionalidad. (ANEXO V)

4.1 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos junto con un análisis previo darán lugar a interpretación y conclusiones del tema.

- El levantamiento de la información nos dio la base de conocimiento sobre el agregado, cemento asfáltico, mezcla Asfáltica. el proceso de elaboración de la misma y algunos conocimientos cuando se realizan la compactación de la mezcla asfáltica en caliente, dando pautas y que valores recomendados, ensayos y metodología utilizar para el trabajo de investigación.

- Gracias a la toma de muestra del material granular y cemento asfáltico, se logró realizar la caracterización y el trabajo de investigación de manera que se logró estimar que el mismo contaba con las especificaciones mínimas y máximas requeridas para su uso en la investigación basados en la información levantada y Normas existentes

- Con las muestras de cemento asfáltico y material granular tanto fino y grueso, se logró realizar el Ensayo de diseño Marshall para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico (5.7%) para la mezcla asfáltica que fue utilizado en la investigación.

- En referencia hacia la aplicación del trabajo de investigación, se obtuvo los resultados esperados a los que se quería llegar y las variables que se quería encontrar, que ayudo para la interpretación, conclusión y recomendaciones del mismo.

- El análisis realizada de los resultados son los que se esperaba obtener o mejor dicho el comportamiento que se esperaba observar de la mezcla asfáltica estudiada, observando su evolución de la misma a diferentes temperaturas de compactación.

Al haber encontrado los objetivos específicos planteados, y una vez realizado la interpretación de los resultados, llegaremos a obtener el objetivo principal:

- Que las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente al momento de realizar la compactación en plataforma, sufrirán variaciones en las mismas de acuerdo a la temperatura a la que se aplica la compactación dando como resultado que las mezclas asfálticas no cumplan con los requerimientos que se desea tener, produciendo fallas prematuras y diferentes tipos de fisuras, acortando su rango de vida útil.

- Resultado de esta investigación, obtenemos que la mezcla asfáltica en estudio conservara sus propiedades físico-mecánicas requeridas entre un rango de 123.62°C a

154.0°C. Este valor se obtuvo del análisis de los gráficos y las especificaciones de la mezcla asfáltica.

- Cualquier mezcla asfáltica que se compacte fuera del rango mencionado dará como lugar a que no cumpla con las especificaciones.

4.2 RECOMENDACIONES

Podemos mencionar las siguientes recomendaciones del tema:

- Realizar una buena recolección de información para que el tema de investigación se encuentre sustentado.

- Asegurarse que tanto el agregado grueso y fino, el cemento asfáltico cumplan con los especificaciones requeridas para no caer en resultados erróneos.

- Usar la protección necesaria para realizar los trabajos con mezclas asfálticas en caliente por las temperaturas que se trabaja.

- Por los resultados obtenidos en laboratorio se recomienda tener mucho cuidado con las temperaturas en las cuales se realizan la compactación, ya que algunas de sus características mejoran de manera individual, si las analizamos en conjunto, tienden a presentar problemas, tal hecho es el resultado de intervalo de temperatura donde cumplirá con las especificaciones mínimas solo es de 30° C.

- Si tomamos en cuenta los resultados se recomienda contar con una buena planificación del proceso constructivo de la plataforma, que darán lugar a que la mezcla no sufra una segregación térmica.

- Proceder a realizar controles en el proceso de fabricación de la mezcla en planta, que no sea superior a la temperatura de diseño recomendada.

- Se deben realizar controles de temperatura de la mezcla asfáltica en caliente, al momento de llegar a plataforma, de manera que no se encuentre ni por encima ni por debajo de los valores recomendados.

- El hecho de sobrecalentar la mezcla, no es conveniente para largas distancias, ya que puede ser perjudicial en las características de la misma.

