

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Las mezclas asfálticas son la combinación de agregados pétreos con un cemento asfáltico y conforman una de las partes estructurales más importantes dentro de los pavimentos flexibles que es la capa de rodadura y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda y segura a sus usuarios ante la necesidad creciente de contar con productos que tengan un mejor comportamiento bajo la acción del tránsito vehicular y de los distintos factores climatológicos. Una de las principales causas para el deterioro de los pavimentos es la deficiencia de la calidad de los materiales utilizados, de aquí la necesidad de adicionar nuevos materiales que involucren el mejoramiento del comportamiento de las propiedades de la mezcla asfáltica como así también una gran ayuda a la parte ambiental, ya que al utilizar el material reciclado ayudaría a la descontaminación ambiental siendo una de las principales contaminaciones en el país, como también en el mundo.

La utilización de polímeros en la preparación de mezclas asfálticas data desde hace más de medio siglo en los países con mayor avance tecnológico, desde entonces se ha mostrado el interés en conocer el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros, a través de pruebas de laboratorio

Ante las situaciones mencionadas, el presente trabajo de investigación se realizó con el fin de analizar la incidencia en el comportamiento de las propiedades en mezclas asfálticas modificadas, además de apelar a nuevas tecnologías constructivas y del resto de los materiales, tal es el caso del uso de los polímeros policarbonato de bisfenol-A y dióxido de silicio, buscando obtener un mejor comportamiento mecánico y por ende, obtener periodos de vida útil mayores que el de los pavimentos flexibles.

El aporte es profundizar el tema de las mezclas asfálticas modificadas, incorporando nuevos polímeros en la mejora de las propiedades de las mezclas asfálticas, estableciendo el conocimiento de nuevos materiales para la construcción de asfaltos dando un mejor

comportamiento mecánico, brindando un aporte académico en el campo vial de interés de estudiantes, docentes y profesionales que tengan relación con el área.

1.2. Justificación

Realizar un análisis para brindar un aporte de polímeros en mezclas asfálticas utilizando productos químicos y plásticos, los materiales empleados en la construcción de la mezcla asfáltica integran un papel fundamental a la hora de obtener una mezcla ideal; es por eso que surge la necesidad de buscar nuevos polímeros que mejoren las características y propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas y así un mejor desempeño de nuestros pavimentos flexibles.

Es así como se propone la utilización de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio como polímeros en las mezclas asfálticas ya que presentan características físicas requeridas para la utilización en las mezclas asfálticas que podrían emplearse en nuestro departamento.

Como aporte social de esta investigación es que se podrá implementar un nuevo polímero en la construcción de mezclas asfálticas, en busca de mejorar su comportamiento mecánico, generando otra alternativa para aumentar la calidad de servicio de las carreteras y así también al utilizar el policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) que es un material reciclado y contribuye a la descontaminación ambiental.

1.3. Diseño teórico

1.3.1. Planteamiento del problema

1.3.2. Situación problemática

Las estructuras viales son prioridad fundamental de la sociedad y de la economía de un territorio, son el medio principal de comunicación y transacción de bienes y servicios, entre dos o más puntos. Un mal estado de éstas recaería fuertemente como problemática para una comunidad y su desarrollo.

En Bolivia la mayor parte de la red vial que está pavimentada, está constituida por pavimentos flexibles, debido a que éstos permiten mayores deformaciones sin rotura. No obstante, estos pavimentos presentan otros inconvenientes principalmente generados por las fuertes variaciones de temperatura, las precipitaciones, la erosión, las corrientes de

agua, la creciente demanda del tráfico en las vías, y la capacidad portante del suelo que soporta la infraestructura vial, entre otros. Los pavimentos flexibles están conformados por una capa asfáltica, que es el producto obtenido de la adición y mezclado uniforme de un cemento asfáltico en un agregado granular. Estas mezclas son conocidas como mezclas asfálticas y según el procedimiento de mezclado se pueden clasificar en mezclas densas en caliente y mezclas densas en frío. Por lo anterior, y por muchas otras causas la cantidad de vías en excelente estado del territorio boliviano son muy pocas, debido a que los pavimentos muchas veces trabajan en condiciones extremas de diseño, y terminan por hacer fallar el pavimento antes del periodo para el cual se diseñó. Por consiguiente, se busca solucionar la capa de rodadura realizando diversas investigaciones que mejoren las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales, adicionado a su composición polímeros o materiales de reciclaje que aumenten sus propiedades de resistencia y durabilidad, y sean amigables con el medio ambiente.

A lo largo de dichas investigaciones, se han planteado soluciones para que la mezcla asfáltica mejore; que además de cumplir con sus funciones básicas de diseño, aporte a mitigar los impactos y sea amigable con el medio ambiente, incorporando a su composición materiales reciclados, como lo pueden ser: cauchos, cueros, plásticos, escoria, PVC, entre otros

1.3.3. Problema

¿Será que con la adición de Policarbonato de Bisfenol-A(residuo de CD) y Dióxido de silicio como aditivos en las mezclas asfálticas convencionales, mejoraran las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales?

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Analizar las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente modificadas con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el agregado granular y el cemento asfáltico componentes de la mezcla asfáltica.
- Realizar la dosificación de la mezcla asfáltica en caliente con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD).
- Realizar la dosificación de la mezcla asfáltica en caliente con dióxido de silicio.
- Determinar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente con la adición de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio.
- Analizar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente con la adición de policarbonato de bisfenol-A (residuo CD) y dióxido de silicio.
- Comparar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio.

1.5. Hipótesis

Si se adiciona policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio como aditivos, mejorara las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales en caliente

1.6. Definición de variables independientes y dependientes

1.6.1. Variables independientes

Policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio

1.6.2. Variables dependientes

Mezclas asfálticas modificadas en caliente

1.6.3. Operacionalizacion de las variables

Variable independiente

Tabla 1.1. Operacionalización de las variables independientes

| Variable | Conceptualización | Dimensión | Indicador | Valor/acción |
|---|---|-------------------------|------------------|------------------------|
| Policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) | Aditivo formado por residuos de cd que es un policarbonato de bisfenol-A, que se utilizara en la mezcla asfáltica | Características físicas | Densidad | 1.2 gr/cm ³ |
| Dióxido de silicio | Aditivo que se utilizará en la mezcla asfáltica | Características físicas | Densidad | 2.0 gr/cm ³ |

Fuente: Elaboración propia

Variable dependiente

Tabla 1.2. Operacionalización de las variables dependientes

| Variable | Conceptualización | Dimensión | Indicador | Valor/acción |
|--|---|------------------|----------------------------------|---------------------|
| Mezclas asfálticas modificadas en caliente | Es la combinación de agregados y cemento asfáltico con la adición de aditivos | Marshall | Estabilidad | >1800 lb. |
| | | | Fluencia | 8 a 16 plg. |
| | | | % de Vacíos en la mezcla | 3 a 5 % |
| | | | V.A.M. (Vacíos agregado mineral) | >13 % |
| | | | R.B.V. (Relación betumen vacíos) | 75 a 82 % |

Fuente: Elaboración propia

1.7. Alcance de la investigación

La investigación se centra en el estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente, a las cuales se les añadirá policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio y por medios de ensayos se realiza un análisis, con respecto a las mezclas asfálticas convencionales.

La caracterización de los agregados granulares y del cemento asfáltico 85-100 que se utilizaran en esta investigación, se limitan a ser aplicados con los ensayos de acuerdo a los equipos disponibles en los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Conociendo las características de los materiales a utilizar, se realiza la dosificación con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio a diversos porcentajes en la mezcla asfáltica para someterla a la prensa Marshall para así determinar sus propiedades mecánicas.

Una vez determinadas las propiedades mecánicas de las mezclas, podremos constatar si son buenas o malas realizando un análisis de cada mezcla, para así determinar su utilización o no.

La finalidad de este estudio es brindar información sobre las mezclas asfálticas, con la adición de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.1. Introducción

Los pavimentos tienen importancia destacada en el desarrollo de una ciudad y sus poblaciones cercanas, siendo la pista por la que se desarrolla el transporte con una demanda importante, teniendo que trasladar productos y materiales para servicios.

El pavimento pocas veces es utilizado de manera adecuada por que las capas que lo conforman deben cumplir exigencias mínimas, de esta forma se puede aproximar el cumplimiento de la vida útil además de brindar la comodidad mínima.

La ingeniería enfrenta permanentemente el reto de mantener y desarrollar estructuras de pavimento con recursos económicos limitados. Las especificaciones tradicionales de diseño y construcción establecen la necesidad de grandes cantidades de materiales de alta calidad para garantizar la durabilidad y desempeño de las estructuras, aunque no hay disponibilidad suficiente de tales materiales. Ante este panorama la ingeniería ha recurrido a alternativas de diseño que consideren; una dosis apropiada de riego de adherencia, buena calidad de materiales, una correcta fase constructiva de la carpeta nueva que asegure un mejor comportamiento en la adherencia de las carpetas asfálticas que es lo que en realidad se debería medir.

Todos hemos tenido la oportunidad de observar un pavimento, ya sea en largas caminatas en la vida o simplemente al conducir un automóvil, donde sólo vemos la inmensa capa asfáltica, pero un pavimento no sólo es esa capa externa y observable, es toda una estructura compleja, que necesita un diseño especial.

Se denomina pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa de las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente.

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones, debe reunir las siguientes exigencias:

Resistir a la acción de las cargas impuestas por el tránsito

Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.

Presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinalmente, que permitan comodidad y confort a los usuarios.

Presentar adecuadas condiciones respecto al drenaje.

Ser económico.

2.2. Pavimentos flexibles

2.2.1. Definición

Una carpeta constituida por una mezcla asfáltica proporciona la superficie de rodamiento; que soporta directamente las solicitaciones del tránsito y aporta las características funcionales. Estructuralmente, la carpeta absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales, ya que las cargas de los vehículos se distribuyen hacia las capas inferiores por medio de las características de fricción y cohesión de las partículas de los materiales y la carpeta asfáltica se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores, sin que su estructura se rompa.

Las capas que forman un pavimento flexible son: Carpeta asfáltica, base y sub-base. Las cuales se construyen sobre la capa sub-rasante¹.

Figura 2.1. Capas de un pavimento flexible



Fuente: Teoría de pavimento-Fernando Pinedo

¹ Miranda Rebolledo, R., (2010). Deterioros en Pavimentos Flexibles y Rígidos. (Tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

2.3. Características de pavimentos flexibles

Rico y del Castillo (1984) citan que sobre la capa sub-rasante se construye el pavimento flexible, que está compuesto por sub-base, base y carpeta asfáltica. El pavimento flexible debe proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir a las terracerías los esfuerzos por las cargas del tránsito. Entre las características principales que debe cumplir un pavimento flexible se encuentran las siguientes:

Resistencia estructural

Deformabilidad

Durabilidad

Costo

Requerimiento de conservación

Comodidad

2.3.1. Resistencia estructural

Debe soportar las cargas impuestas por el tránsito que producen esfuerzos normales y cortantes en la estructura. En los pavimentos flexibles se consideran los esfuerzos cortantes como la principal causa de falla estructural. Además de los esfuerzos cortantes, también se tienen los esfuerzos producidos por la aceleración, el frenado de los vehículos y esfuerzos de tensión superiores de la estructura.

2.3.2. Deformabilidad

Una de las propiedades de un pavimento flexible, como su nombre lo indica es la capacidad de deformarse y restituirse a su forma original ante la repetición de las cargas actuantes.

2.3.3. Durabilidad

La durabilidad está ligada a factores económicos y sociales. La durabilidad que se desea dar a un camino, depende de la importancia del mismo. Es más económico realizar mantenimiento, rehabilitaciones y reconstrucciones que un pavimento nuevo.

2.3.4. Costo

Al ser este un tipo de pavimento que para la conformación de su estructura utiliza material pétreo de acceso local, que para su carpeta de rodadura pueden utilizarse mezclas fabricadas in situ; y que los espesores de la capa superficial son reducidos en relación a los de un pavimento rígido, resulta económico siempre y cuando se realicen las obras de conservación necesarias para garantizar y extender la vida útil del pavimento flexible.

2.3.5. Requerimientos de conservación

Los factores climáticos tienen gran influencia en la vida de un pavimento, otro factor es la intensidad del tránsito, debe preverse el crecimiento futuro. Debe tomarse en cuenta el comportamiento futuro de las capas estructurales, la degradación de las mismas por la repetición de las cargas, deformaciones y derrumbes. La falta de conservación sistemática reduce la vida de un pavimento flexible.

2.3.6. Comodidad

Tendrá una superficie final suave uniforme y regular, resistente al deslizamiento, resistente al rozamiento y que no produzca sonidos molestos en el interior del vehículo del usuario ni en el exterior del entorno.

2.4. Componentes de pavimentos flexibles

2.4.1. Carpeta asfáltica

La carpeta asfáltica es una de las capas que componen el paquete estructural, está situada sobre una o más capas estructurales preparadas, está elaborada con material pétreo y un producto asfáltico, el espesor de esta capa puede variar desde menos de 25 mm. Hasta más de 75 mm. Dependiendo de una gran variedad de factores y circunstancias de diseño, construcción y mantenimiento. Su función primordial será proveer al usuario de una superficie confortable y segura para su circulación, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática, además de proteger la base impermeabilizando la superficie, para evitar así posibles infiltraciones del agua de lluvia que podría saturar total o parcialmente las capas inferiores degradando sus propiedades. Además, evita que se desgaste o se desintegre la base a causa del tránsito de los vehículos.

Una de las principales ventajas de los pavimentos asfálticos es la economía asegurada por el uso de materiales disponibles localmente.

Olivera (1994) cita que los materiales pétreos son suelos inertes que se consiguen en ríos, arroyos, o depósitos naturales. Para poder ser empleados en la carpeta asfáltica deben cumplir con ciertas características dadas por la granulometría, dureza, forma de la partícula y adherencia al asfalto.

El contenido óptimo de asfalto para una carpeta, es la cantidad de asfalto que se necesita para formar alrededor de la partícula una membrana con un espesor suficiente para resistir los elementos del intemperismo, para que el asfalto no se oxide. El espesor no debe ser muy grande porque se pierde resistencia y estabilidad.

Se recomienda que las partículas que se utilizan tengan forma esférica, ya que las que son en forma de laja o de aguja romperse muy fácilmente y afectar la granulometría.

Las funciones de la carpeta asfáltica son las siguientes (Olivera, 1994):

- Proporcionar una superficie de rodamiento que permita un tránsito fácil y cómodo para los vehículos.
- Impedir la infiltración de agua de lluvia hacia las capas inferiores.
- Resistir la acción de los vehículos.

2.4.1.1 Cementos asfálticos (AC)

Son los más utilizados en pavimentación. Se pueden sub-clasificar bajo tres sistemas diferentes: viscosidad antes y después de envejecimiento y penetración. Se preparan comercialmente en grados o rangos de consistencia, con base en el ensayo de penetración, por ejemplo: AC 70-90, AC 60-80, AC 80-100. Los números indican penetración en decimas de milímetro. El ensayo de penetración es uno de los ensayos de clasificación más comunes en la caracterización del asfalto.

2.4.1.2. Asfaltos líquidos

Se producen diluyendo cemento asfáltico en algún solvente del petróleo. Se agrupan en 3 clases, dependiendo de la rapidez con que se produce la evaporación del solvente (curado del asfalto).

SC = Asfaltos rebajados de curado lento

MC = Asfaltos rebajados de curado medio

RC = Asfaltos rebajados de curado rápido

Esta denominación se suele acompañar de un número que indica el grado de viscosidad cinemática (en centiestokes). Por ejemplo: RC-250, MC-70

2.4.1.3. Emulsiones asfálticas

Se componen de dos elementos: agua y cemento asfáltico. Se utilizan en tratamientos superficiales, riegos de adherencia, mezclas abiertas, estabilización de suelos y lechadas asfálticas.

Dependiendo de la carga eléctrica de los glóbulos de asfalto, pueden ser catiónicas (C, carga +) o aniónicas (A, carga -). Dependiendo de la velocidad del rompimiento de la emulsión, se clasifican en rompimiento rápido (RR), medio (RM), o lento (RL).

2.4.1.4. Agregados pétreos

Agregado, también conocido como roca, o agregado mineral, es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente². Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria, y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95 %, en peso, y entre el 75 y el 85 %, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. 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 portante.

2.4.1.4.1. Clasificación de los agregados

Las rocas se dividen en tres tipos generales: sedimentarias, ígneas, y metamórficas (Tabla 2.1). Esta clasificación está basada en el tipo de formación de cada roca.

² Conceptos básicos – Prof. Liliana Quintero/ Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda UNEFM.

Rocas sedimentarias.- Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos (partículas finas) en el agua, o a medida que el agua se deposita. El sedimento puede consistir de partículas minerales o fragmentos (como es el caso de las areniscas y la arcilla esquistosa), de residuos de productos animales (algunas calizas), de plantas (carbón), de los productos finales de una acción química o una evaporación (sal, yeso), o de la combinación de cualquiera de estos tipos de materiales.

Rocas ígneas.- Las rocas ígneas constan de material fundido (magma) que se ha enfriado y solidificado. Hay dos tipos de rocas ígneas: extrusivas e intrusivas. Las rocas ígneas extrusivas son formadas a partir del material que se ha vertido afuera, sobre la superficie terrestre, durante una erupción volcánica o alguna actividad geológica similar. La roca resultante tiene una apariencia y estructura vidriosa, debido a que el material se enfría rápidamente al ser expuesto a la atmósfera. La riolita, la andesita, y el basalto son ejemplos de rocas extrusivas.

Rocas metamórficas.- Las rocas metamórficas son, generalmente, rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intensa presión y calor dentro de la tierra, y también por reacciones químicas. Es muy difícil determinar el origen exacto de una roca metamórfica en particular, debido a que los procesos de formación son muy complejos.

Muchos tipos de rocas metamórficas presentan un rasgo característico: los minerales están alineados en capas o planos paralelos. Partir la roca en el sentido de sus planos es mucho más fácil que partirla en sus otras direcciones. Las rocas metamórficas que exhiben este tipo de estructura se denominan foliadas. Ejemplos de rocas foliadas son los gneises, los esquistos (formados de rocas ígneas) y la pizarra (formada de la arcilla esquistosa; una roca sedimentaria). No todas las rocas metamórficas son foliadas. El mármol (formado de calizas) y la cuarcita (formada de las areniscas) son tipos comunes de rocas metamórficas que no presentan foliación.

Tabla 2.1. Clasificación general de rocas

| Clase | Tipo | Familia |
|--------------|---------------------------------|--|
| Sedimentaria | Calcáreas | Caliza Dolomita |
| | Silíceas | Arcilla Esquistosa Arenisca Horsteno Conglomerado Breccia |
| Metamórficas | Foliadas | Gneis Esquisito Anfibolita Pizarra |
| | No Foliadas | Guarcita Marmol Serpentina |
| Igneas | Intrusivas (de grano grueso) | Granito Sienita Diorita Garbo Periodotita Piroxenita Hornablendita |
| | Extrusivas (de grano fino) | Obsidiana Pomez Tufa Riolita Traquita Andesita Basalto Diabasa |

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente del asphalt institute.

2.4.2. Capas de pavimento

Las capas de un pavimento están compuestas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente.

Desde el punto de vista de diseño, los pavimentos flexibles están formados por una serie de capas y la distribución de la carga está determinada por las características propias del

sistema. Los pavimentos rígidos tienen un gran módulo de elasticidad y distribuyen las cargas sobre un área grande, la consideración más importante es la resistencia estructural del concreto hidráulico.

2.4.2.1. Capa de fundación o sub-rasante

De la calidad de esta capa depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea éste flexible o rígido. Como parámetros de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante las cargas del tránsito. Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen (hinchamiento – retracción).

Los cambios de volumen de un suelo de sub-rasante de tipo expansivo puede ocasionar graves daños en las estructuras que se apoyen sobre éste, por esta razón cuando se construya un pavimento sobre este tipo de suelo deberá tomarse la precaución de impedir las variaciones de humedad del suelo para lo cual habrá que pensar en la impermeabilización de la estructura. Otra forma de enfrentar este problema es mediante la estabilización de este tipo de suelo con algún aditivo, en nuestro medio los mejores resultados se han logrado mediante la estabilización de suelo con cal.

2.4.2.2. Capa sub-base

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de la sub-rasante la puede soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la sub-base.

La sub-base debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

Se utiliza además como capa de drenaje y controlador de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares.

El material de sub-base deberá ser seleccionado y tener mayor valor soporte (C.B.R.) que el material de sub-rasante y su espesor será variable por tramos, dependiendo de las condiciones y características de los suelos existentes en la sub-rasante.

Las funciones de la capa sub-base en el pavimento flexible son las siguientes:

Capa de transición.- La sub-base también diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la sub-rasante y por otra parte actúa, con filtro de la base impidiendo que los finos de la sub-rasante la contaminen menoscabando su calidad.

Disminución de la deformación.- Algunos cambios volumétricos de la capa sub-rasante generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios externos de temperatura, pueden absorberse con la capa sub-base, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.

Resistencia: La sub-base debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidas a un nivel adecuado de la sub-rasante.

También otra función de la sub-base, en un pavimento flexible, es puramente económica, buscando así obtener un espesor utilizando el material más barato posible. Podría construirse dicho espesor con materiales de alta calidad como en el caso de la base, pero usualmente se hace aquella más delgada y se sustituye en parte por la sub-base que es de menor calidad, trayendo como resultado un aumento en el espesor total del pavimento, pues es un hecho que cuando menor es la calidad del material utilizado, mayor será el espesor necesario para soportar los esfuerzos transmitidos.

La sub-base es la de servir de transición entre la base y la sub-rasante; ya que el material de la base es granular más o menos grueso y el de la sub-base es más fino que el anterior. La sub-base sirve también para absorber las deformaciones que provienen de la sub-rasante y que pueden ser perjudiciales para el pavimento en general.

Así también lo son los cambios volumétricos asociados a los cambios de humedad. La sub-base sirve también como drenaje para desalojar el agua que se infiltre en el pavimento y para impedir la ascensión capilar hacia la base de agua procedente de la terracería.

Los espesores de sub-base, son muy variables y dependen de cada proyecto específico, pero suele considerarse 12 a 15 cm como la dimensión mínima constructiva.

De las funciones mencionadas anteriormente, la estructural y la económica son las que más se proyectan en la construcción de pavimentos; el resto dependen de las circunstancias y de los materiales con los que se cuente para la sub-base. La resistencia friccionante contribuirá a la resistencia en conjunto del pavimento, garantizando buen comportamiento en cuanto a la deformabilidad se refiere, como resultado de una buena compactación. La capacidad de drenaje, igualmente importante, es necesario debido a la doble función que realiza tanto con el agua que se infiltra de la superficie, como la que asciende por capilaridad³.

2.4.2.3. Capa base

La base es la capa de material que se construye sobre la sub - base. Los materiales con los que se construye deben de ser de mejor calidad que los de la sub-base, la función de la base es:

- La resistencia es la función fundamental de la base granular de un pavimento, consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la sub-base y la sub-rasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.
- Ésta también reduce el espesor de la carpeta más costosa. Muchas veces la base también debe trabajar como la sub-base, respecto a la doble función de drenaje mencionada anteriormente.
- Básicamente el material que constituye a la base, en el pavimento flexible, debe ser friccionante y provisto de vacíos.
- La primera garantiza la resistencia adecuada y la permanencia de dicha resistencia con la variación de las condiciones que se puedan presentar, como podría ser el contenido de agua. Es lógico que no basta sólo con emplear material friccionante para garantizar la resistencia deseada; es necesaria también una compactación adecuada, necesario para adquirir la compacidad y trabazón estructural requerida para una buena base. Los materiales utilizados para la base suelen someterse a

³ Es.slideshare.net/rosabeatrizvillaloboshuaman/diseo-de-pavimento-flexible-y-rigido

procesos exigentes para su aprobación como lo es la trituración, produciendo efectos favorables para la resistencia y deformabilidad de la estructura a construir, ya que se obtienen partículas con formas convenientes para un reacomodo adecuado; además de esto, se deben llenar otras especificaciones por lo que es necesario tamizar dicho material.

- Los espesores de las bases son muy variables de acuerdo con el proyecto de que se trate, pero suele considerarse que a 12 o 15 centímetros, es el espesor mínimo que conviene construir.

2.4.2.4. Capa de rodadura

La capa de rodadura debe proporcionar en el pavimento una superficie de rodamiento estable, capaz de resistir la aplicación directa de las cargas, la fricción de las llantas, los esfuerzos de drenaje, los impactos, éste debe tener la textura necesaria para permitir un rodamiento seguro y cómodo. La naturaleza de esta capa debe ser tal que resista la acción de los agentes del intemperismo.

La exposición directa a las cargas del tránsito y la indeformabilidad necesaria para el buen servicio implican que la carpeta esté formada con material que ofrezca suficiente resistencia bajo condiciones de presión normal exterior o sea que se requiere un material que posea cohesión.

La capa de rodadura también contribuye a aumentar la capacidad soporte del pavimento, absorbiendo cargas, si su espesor es apreciable (mayor de 4 centímetros).

Superficie de rodadura.- La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.

Resistencia.- Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.

Impermeabilidad.- Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento⁴.

⁴ Es.slideshare.net/rosabeatrizvillaloboshuaman/diseo-de-pavimento-flexible-y-rigido

2.5. Mezclas asfálticas en carpetas

2.5.1. Definición de mezclas asfálticas

La mezcla asfáltica se puede definir como la combinación de agregados pétreos con cemento asfáltico, mezclados de tal manera que los agregados pétreos quedan cubiertos por una película uniforme de asfalto.

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

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5 % de polvo mineral (filler) y otro 5 % de ligante asfáltico.

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

2.5.2. Clasificación de mezcla asfáltica

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

2.5.3. 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 éstas tienen en el comportamiento de la mezcla, que se detallan a continuación:

2.5.3.1. 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 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/pe^3), se calcula al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ($1,000 \text{ kg/m}^3$ o 62.416 lb/pe^3). 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.

2.5.3.2. Vacíos de aire

Están presentes entre los agregados revestidos de asfaltos 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 campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8 %.

2.5.3.3. 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, existiría 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 ésto 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.

2.5.3.4. 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, 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.

2.5.3.5. Estabilidad o resistencia a las deformaciones plásticas

La estabilidad o resistencia a las deformaciones plásticas constituye una de las propiedades más estudiadas de las mezclas bituminosas, considerada en prácticamente todos los métodos de diseño y dosificación, especialmente en aquellos países en los que, por sus características climatológicas y del tránsito, la red de carreteras ha presentado, en algún momento, problemas de roderas, los ensayos y criterios para evaluarla distan mucho de ser coincidentes.

Esta propiedad se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento, debidos a las cargas que resultan del tránsito vehicular. Un pavimento es estable cuando conserva su forma; y es inestable cuando desarrolla deformaciones permanentes, corrugaciones y otros signos del desplazamiento de la mezcla.

La estabilidad se suele evaluar mediante ensayos de base fundamentalmente empírica: Marshall, en los que las probetas de mezclas se llevan hasta la rotura mediante una

solicitud típica de cada ensayo, y la carga de rotura es lo que se denomina estabilidad de esa mezcla.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante de asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unos respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico. En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla.

2.6. Componentes de las mezclas asfálticas

2.6.1. Cementos asfálticos

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

El asfalto es un material que se puede encontrar en la naturaleza en yacimientos naturales o puede ser obtenido con subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo. Tiene una consistencia sólida, al calentarlo se ablanda y se vuelve líquido, lo que le permite recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente. El asfalto cambia su comportamiento dependiendo de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Es más duro a bajas temperaturas y más blando a altas; por esto, se debe seleccionar el tipo de asfalto más conveniente, dependiendo del clima del sitio de colocación.

El asfalto ha sido utilizado para la construcción de carreteras desde la antigüedad ya que tiene ciertas características físicas que le permiten su uso como aglutinante en la mezcla asfáltica. El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, que

tiene las propiedades ideales para la construcción de pavimentos cumpliendo de las siguientes funciones:

- Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.
- Proporciona una fuerte unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.

2.6.1.1. Cementos asfálticos modificados

2.6.1.1.1. Definición

Los asfaltos modificados son producto de la incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido. Esto se hace con el fin de modificar sus propiedades físicas y reológicas para disminuir su susceptibilidad a la temperatura, húmeda y oxidación e incrementar la adherencia con el material pétreo. Aumentar la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y esfuerzos de tensión repetidos⁵.

2.6.1.1.2. Antecedentes

En lo que concierne al aspecto histórico de la modificación de ligantes hidrocarbonatos con polímeros, la idea de modificar asfalto con polímeros se remonta a 1960 en Italia, Francia y Alemania, donde se llevaron a cabo los primeros proyectos de prueba. En esta época en Estados Unidos también surgió la inquietud llevándose a cabo los primeros proyectos de construcción en 1960. En Italia se construyeron más de 1000 Km. de carreteras con este tipo de asfalto, poniendo capas de rodamiento con asfaltos modificados con polímeros ya sea base seca o látex.

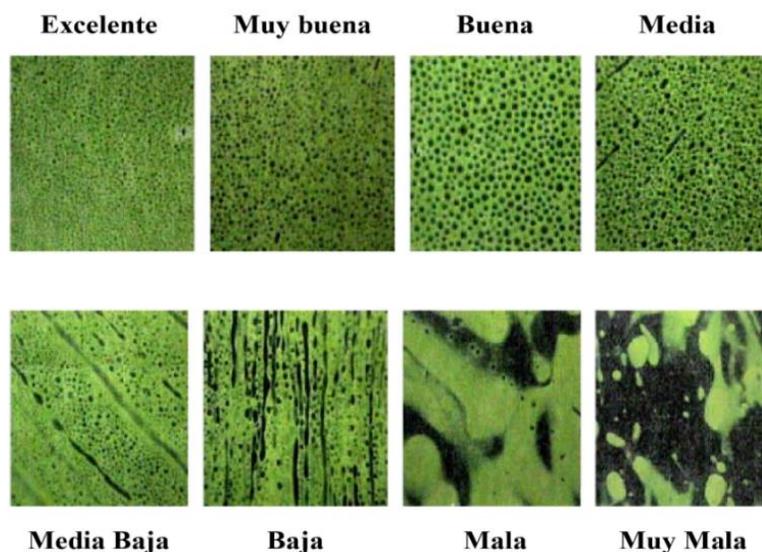
Para llevar a cabo la modificación de asfalto, se debe conocer la compatibilidad de este con el modificador para que coexistan como sistema, es decir debe ser miscible, lo que indica una mezcla monofásica. La inmiscibilidad se traduce en la aparición de una

⁵ H. L. Robinson. Polymers in Asphalt. (United States of America, 2004) p. 15

segunda fase. Un polímero es compatible con el asfalto cuando la heterogeneidad de la mezcla no se puede apreciar por un examen visual.

Los asfaltos más ricos en fracciones aromáticas y resinas serán los más compatibles, ya que estas fracciones son las que permiten que el polímero se disuelva. Los asfaltos menos compatibles son los más ricos en asfaltenos y saturados.

Figura 2.2. Compatibilidad asfalto-polímero



Fuente: Introducción a la Química del Asfalto por: Ing. German Garzón, Costa Rica, 2004

El comportamiento del asfalto depende básicamente de tres factores:

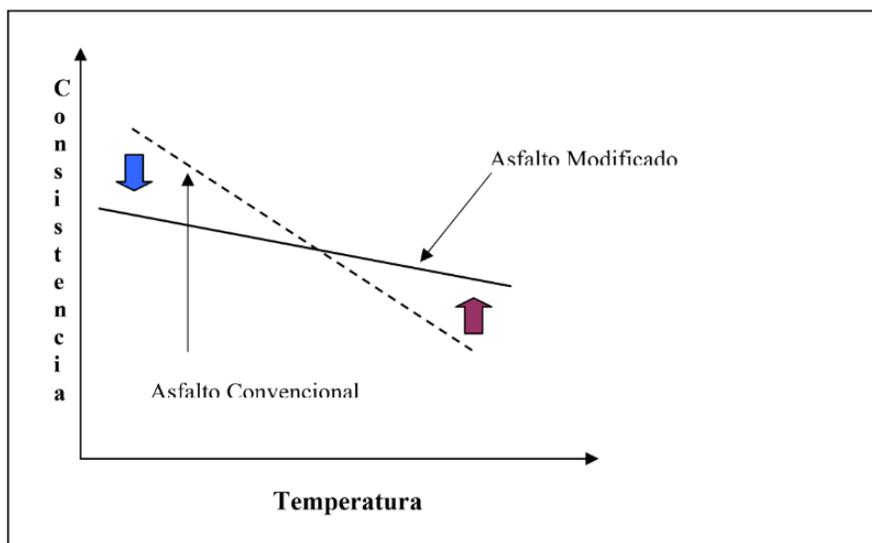
Temperatura

Tiempo de carga

Envejecimiento

A altas temperaturas y bajo cargas sostenidas, el asfalto se comporta como un líquido viscoso, es una mezcla plástica la cual provoca ahuellamiento. A bajas temperaturas y bajo cargas rápidas se vuelve frágil, ocasionando grietas transversales y agrietamiento térmico.

Figura 2.3. Comportamiento asfalto convencional vs asfalto modificado



Fuente: Introducción a la Reología de los Asfaltos Modificados. Conferencia dictada por: Ing. German Garzón Costa Rica, 2004.

El objetivo perseguido con la adición de polímeros al asfalto es el de mejorar su reología, buscando:

- Disminuir la susceptibilidad térmica. Disminuir la fragilidad en climas fríos y aumentar la cohesión en tiempos de calor.
- Disminuir la susceptibilidad a los tiempos de aplicación de carga.
- Aumentar la resistencia a la deformación permanente y a la rotura en un rango más amplio de temperaturas, tensiones y tiempo de carga.
- Mejorar la adherencia a los agregados.

2.6.1.1.3. Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos

Elastómeros.- Elastómero significa simplemente "caucho"[Franta,1989]. Entre los polímeros elastómeros se encuentran el polisopreno o caucho natural, el polibutadieno, el polisobutileno, y los poliuretanos. La particularidad de los elastómeros es que pueden ser estirados muchas veces su propia longitud, para luego recuperar su forma original sin una deformación permanente.

Las moléculas poliméricas que conforman una porción de caucho, cualquier clase de caucho, no tienen ningún orden, se enrollan y se enredan entre ellas, formando un gran ovillo. Al estirar el caucho las moléculas son forzadas a alinearse en la dirección en la que se está produciendo el estiramiento. Cuando lo hacen, se vuelven más ordenadas, llegando las cadenas a alinearse tanto como para cristalizar.

Plastómeros.- Los plastómeros son el segundo polímero más popular. Tipo utilizado en productos de carretera de asfalto del Reino Unido. El plastómero más utilizado es el EVA. Hay un número de los grados disponibles, variando en términos de acetato de vinilo contenido y peso molecular, que usualmente se define en términos de un índice de flujo de fusión. El tipo de EVA utiliza influencias del grado de modificación del betún. Se obtiene, y esto se refleja generalmente en el modificado. valor de penetración del ligante, punto de ablandamiento a un menor extensión, viscosidad dinámica y rigidez del asfalto. Otros tipos de plastómeros, incluido el etileno metilo. acrilato, polipropileno (PP), PS y polietileno (PE), también han sido evaluados para su uso en asfalto, aunque han demostrado ser menos exitosos. Parecen hacer el betún es demasiado rígido y quebradizo, lo que aumenta el riesgo de falla prematura del asfalto. Algunos de estos polímeros son derivados de fuentes de residuos plásticos, aunque refinado. para proporcionar un producto consistente.

EVA es de naturaleza termoplástica, y aparte de ser utilizado en el asfalto también se utiliza en colas de fusión en caliente. Uno de los grados más comunes de EVA utilizados para modificar el betún para uso en asfalto es grado 18/150. Esta clasificación indica un índice de flujo de fusión de 150 y un acetato de vinilo. Contenido del 18 %. Típicamente 5 % de EVA en masa del contenido de betún se utiliza en mezclas asfálticas.

EVA fue uno de los primeros polímeros en ser utilizado con éxito. en aplicaciones de asfalto en el Reino Unido y se aceptó por la Agencia de Carreteras y muchas autoridades locales para su uso en HRA durante la década de 1980. Esencialmente se endurece el aglutinante y por lo tanto hace que el asfalto sea más resistente al tráfico de carga y celo, particularmente a mayores temperaturas de la carretera durante los veranos calurosos

cuando el asfalto las superficies tienen un mayor riesgo de reblandecimiento y formación de surcos bajo el tráfico.

Una de las características atractivas del uso de EVA es que actúa efectivamente como un diluyente a temperaturas de mezcla elevadas, es decir, típicamente por encima de 100°C. El polímero efectivamente se derrite y se disocia en el betún, reduciendo así la viscosidad del betún. A medida que la temperatura baja por debajo 90 ° C, el EVA tiende a asociarse (recristalizar) y significativamente endurece el aglutinante, aumentando la aglutinante viscosidad. Por eso es importante que el asfalto sea completamente compactado antes de este cambio de fase de polímero, ocurre, de lo contrario el asfalto podría endurecerse demasiado rápido resultando en una compactación inadecuada que puede resultar en el fracaso prematuro. Este problema se puede exacerbar al colocar el asfalto en capas finas durante el frío invierno, meses en los que las tasas de enfriamiento tienden a ser más rápidas, limitando la ventana de trabajo.

Una gran cantidad de información ha sido publicada en el uso de EVA para modificar el betún, particularmente por empresas de suministro de polímeros (a.22, a.23, a.24, a.25).

Tabla 2.2. Polímeros utilizados con asfaltos

| Tipo de Modificador | Sigla | Descripción |
|----------------------------|----------------|--|
| Elastómeros | Látex | El látex es un polímero disperso en agua que consiste en una emulsión compleja formada por proporciones variables de goma, resinas, taninos, alcaloides, proteínas, almidones, azúcares y aceites. |
| | SBS | Elastómeros termoplásticos de Estireno-Butadieno-Estireno |
| | SBR | Cauchos sintéticos de 25 % de Estireno y 75 % de Butadieno, con incorporación de ácido acrílico |
| | Hule de llanta | Producto de la molienda de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) |
| Plastómeros | Polietileno | Polímero preparado a partir de etileno |
| | PVC | Policloruro de vinilo, polímero sintético de adición que se obtiene por polimerización del cloruro de vinilo |
| | EVA | Los polímeros o resinas Etilo-Vinil-Acetato |

Fuente: Elaboración propia

2.6.1.1.4. Asfaltos modificados con polímeros tipo elastómeros

Se requiere mezclar tres componentes: asfalto, resina base y un endurecedor, lo que complica la modificación ya que debe existir compatibilidad entre esos.

Los asfaltos modificados tienen una elevada resistencia mecánica, gran resistencia a la tracción, buen poder humectante y adhesión a los agregados. Si el trabajo con este tipo de asfalto es realizado dentro de los parámetros correctos, su tiempo de vida está condicionado por la vida del agregado, no por el asfalto; en otras palabras, el pavimento se deteriora por trituración o abrasión del agregado antes que por la falla del ligante (asfalto). Su resistencia al envejecimiento es excelente.

Son empleados para casos específicos como:

- Zonas de frenado intenso, donde se requiere una gran resistencia al derrapaje.
- Zonas donde se requiere resistir a las maniobras o a los agentes químicos.
- Zonas donde se requiere mantener una buena rugosidad durante largos periodos de tiempo.

Látex, hule natural, SBS, SBR.- Este tipo de polímero es el más utilizado en la modificación del asfalto, el efecto de la adición de éstos, al asfalto, es aumentar su intervalo de plasticidad y disminuir la susceptibilidad térmica. El punto de ablandamiento puede aumentar hasta 20°C, a temperaturas inferiores a 70°C los asfaltos tienen menor penetración; esto es interesante ya que a estas temperaturas se dan deformaciones en las superficies de rodamiento.

Los asfaltos son más duros, pero siguen siendo elásticos, lo que evita la deformación de roderas y el agrietamiento de las mismas. La rigidez de estos asfaltos ayuda a soportar los largos tiempos de carga sin deformaciones.

Entre -10°C y +10°C el elastómero proporciona al asfalto mayor elasticidad sin aumentar la rigidez.

Hule de llanta.- Las propiedades que adquiere el asfalto al añadirle este tipo de hule son similares a las que se obtienen con el polímero SBR o SBS, aunque, se deben utilizar

dosificaciones más elevadas. Las llantas para ser utilizadas como agentes modificadores de asfalto requieren de un proceso físico para reducir sus dimensiones, el cual suele ser complejo.

Estos asfaltos modificados presentan altas viscosidades por lo que se requiere el empleo de algún fluidificante, alrededor del 6 % de queroseno. Son usados principalmente en riegos de sello destinados a absorber las grietas debidas a contracciones y dilataciones; éstos riegos son llamados SAM (membranas de absorción de tensiones).

2.6.1.1.5. Asfaltos modificados con polímeros tipo plastomeros

Debido a la forma en que estos polímeros se incorporan al asfalto aumentan de forma considerable su viscosidad, incluso en bajas dosificaciones.

Si se aumenta la concentración del polímero, se llega a un punto en el cual la mayoría de los aceites están asociados con el polímero y se produce un cambio drástico en las propiedades físicas del asfalto. Éstas se acercan más a las propiedades del polímero que a las del asfalto.

Ésto sucede cuando el contenido del polímero va de 8-10 %, en este punto, el asfalto aumenta su intervalo de plasticidad, aumenta su resistencia a la ruptura, disminuye su sensibilidad térmica sobre todo en el intervalo de temperaturas de aplicación.

Polietileno.- Este polímero no tiene una alta compatibilidad con el asfalto ni le confiere propiedades espectaculares, pero se usa ya que es un componente de bajo costo y soluciona un problema ecológico, al poder disponer de los desechos de este material en las carreteras. Los asfaltos modificados con este tipo de polímero termoplástico son añadidos en bajas proporciones, poseen las siguientes propiedades:

Buena resistencia al calor.

Buena resistencia al envejecimiento.

Baja viscosidad.

En el plano mecánico:

- La resistencia Marshall aumenta de 2 a 2.5 veces a 25°C mientras que a 0°C y -2.5°C es prácticamente igual a la de un asfalto convencional.
- Buena flexibilidad a baja temperatura.
- Cuando es utilizado en concentraciones de 7% aumenta la rigidez del asfalto a temperaturas elevadas.
- Buena resistencia a deformaciones permanentes.

PVC.- Policloruro de vinilo, este polímero tiene baja compatibilidad con el asfalto, no es resistente al calor y se descompone por la acción de la luz solar. Resiste muy bien al agua y/o agentes químicos; es por esto que no es utilizado para la modificación de asfalto.

EVA.- Los polímeros o resinas Etilo-Vinil-Acetato son relativamente nuevos en la modificación de asfaltos, son muy compatibles con éstos.

La relación acetato de vinilo/etileno es muy importante, pudiéndose variar el contenido de acetato de vinilo de algún % hasta 50 % o incluso más. Cuando los contenidos de acetato de vinilo son bajos, las propiedades se asemejan a las de los asfaltos mencionados anteriormente. Un polímero EVA con un contenido del 18 % de acetato de vinilo es el más adecuado para ser usado en la construcción de carreteras. Cuando se aumenta la concentración de acetato de vinilo en el polímero (15 a 30 %), adquiere un excelente poder adherente.

Los asfaltos modificados con EVA poseen las siguientes características:

- Buena estabilidad térmica a un costo razonable.
- Las dosificaciones de polímero oscilan entre el 2 hasta un 10 % dependiendo de las propiedades que se pretende obtener.
- La temperatura de ablandamiento aumenta entre 6 y 12°C.
- Excelente resistencia al resquebrajamiento en flexión es decir a las fatigas provocadas por las flexiones o vibraciones repetidas.
- Aumenta la cohesión de las mezclas a medida que se aumenta el contenido del polímero.

2.6.1.1.6. Especificaciones de asfaltos modificados

Al igual que para los cementos asfálticos sin modificar, esta normativa se encuentra en el libro “Manual de Ensayo de Suelos y Materiales * Asfaltos”, en la sección (Asfaltos Modificados), estas se basan en las normas de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y de la American Society for Testing and Materials (ASTM).

Tabla 2.3. Normas AASHTO y ASTM aplicables a asfaltos modificados

| Ensayo | AASHTO | ASTM |
|---|---------------|-------------|
| Viscosidad cinemática a 135°C | T - 201 | D - 2170 |
| Viscosidad dinámica a 60°C | T - 202 | D - 2170 |
| Penetración | T - 49 | D - 5 |
| Recuperación elástica por torsión | ----- | ----- |
| Prueba de película delgada en horno | T - 179 | D - 1754 |
| Prueba giratoria de película delgada en horno | T - 240 | D - 2872 |
| Viscosidad rotacional tipo haake | ----- | D - 4402 |
| Recuperación elástica por ductilometro | ----- | D - 6084 |
| Resiliencia a 25°C | ----- | D - 3407 |
| Gravedad específica | T - 228 | D - 70 |
| Punto de ablandamiento | T - 53 | D - 3695 |

Fuente: Asfaltos modificados con polímeros por: Martha Dina Avellan Cruz

2.6.1.1.7. Policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

El policarbonato, es un grupo de termoplásticos, fácil de trabajar, moldear y termoformar, y es utilizado ampliamente en la manufactura moderna. El nombre policarbonato se basa en que se trata de polímero que presentan grupos funcionales unidos por grupos de carbonato en una larga cadena molecular.

Se trata de un polímero formado de moléculas de Bisfenol-A, unidades con grupos de carbonato. Su resistencia al impacto, que es del orden de 200 veces mayor a la del vidrio, es la propiedad que permite que se produzca en láminas alveolares, también conocidas como “celulares”, con paredes de espesor reducido y consecuentemente con costo relativamente bajo. En esta presentación el material se utiliza en la construcción de tragaluces y domos, habiendo desplazado el acrílico en gran medida

El policarbonato es un plástico ligero y de excelentes propiedades empleado en muchos productos de uso cotidiano: automóviles, teléfonos celulares, computadoras y otros equipos de oficina, artículos de deporte, electrónica, electrodomésticos, CDs, DVDs, recipientes para conservar alimentos y envases, etc.

También el monóxido de carbono fue usado para sintetizar carbonatos a escala industrial y producir difenil carbonato, que luego se esterifica con un derivado difenólico para obtener carbonatos poliaromáticos.

Teniendo en cuenta la síntesis al grupo carbonato, se puede dividir a los policarbonatos en carbonatos poliaromáticos y carbonatos polialifáticos. Estos últimos son producto de la reacción del dióxido de carbono con epóxidos. Teniendo en cuenta que la estabilidad termodinámica del dióxido de carbono, se requiere usar catalizadores.

Los policarbonatos son un tipo particular de poliésteres, polímeros de cadena larga, formada por grupos funcionales conectados por grupos carbonato (-O-(C=O)-O-). Debido a que los grupos bencénicos están directamente en la cadena principal, la molécula es muy rígida, haciendo que el policarbonato tenga una estructura amorfa, una baja contracción en el moldeo (tanto transversal como paralela al flujo) y sea transparente. La excepcional resistencia al choque de los policarbonatos, unida a su perfecta transparencia, explica su uso en acristalamientos anti- bala de locales, en invernaderos hortofrutícolas donde aguantan las más severas tormentas de granizo, en faros de automóviles o en discos compactos. termoplástico con escasa tendencia a cristalizar con muy poca absorción por agua. Tiene un elevado índice de refracción y una buena transmisión de la luz en la región visible. Su densidad varía entre 1,20 y 1,24 g/cm³. Tiene una buena resistencia y dureza elevadas.

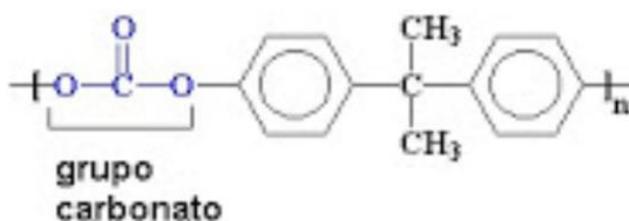
Propiedades Mecánicas Físicas

A pesar de que la estructura principal de la cadena del policarbonato está congelada a temperatura ambiente, gracias a sus grupos fenileno, isopropilideno y carbonato, posee movilidad suficiente para disipar energía de impacto en la temperatura ambiente. Mecánicamente es un plástico que posee gran dureza. Según los ensayos de dureza

Rockwell por la norma UNE-EN ISO 2039-2:200 el policarbonato posee una dureza en la escala M de 75. Además, es muy resistente a la tracción, a la compresión y sobre todo al impacto; e inclusive al romperlo posee una gran resistencia a la fragmentación. A pesar de esa gran resistencia, se raya muy fácilmente y su rayado no tiene fácil reparación. Es 300 veces más resistente que el vidrio y 30 veces más resistente que el acrílico. Con lo que ofrece un margen de seguridad que no lo da ningún otro material diseñado para encristalado.

Estructura química

Figura 2.4. Estructura química del policarbonato



Fuente:

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/policarbonato.html>

Especificaciones técnicas

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

| Análisis químico | |
|----------------------------------|-------------------------|
| Solubilidad en agua | 120-300 ppm (a 21.5 °C) |
| Propiedades físicas | |
| Color | Blanco a la luz |
| Densidad | 1.20 gr/cm ³ |
| Masa molar | 228.29 gr/mol |
| Punto de Fusión | 420 K (147 °C) |
| Punto de ebullición | 493 K (220 °C) |
| Índice refractivo | 1.584-6 |
| Resistencia a los ultra-violetas | Aceptable |
| Propiedades Mecánicas | |
| Coefficiente de fricción | 0.31 |
| Alargamiento a la rotura | 100-150 % |
| Resistencia a la compresión | >80 Mpa |
| Resistencia a la tracción | 55-75 Mpa |

Fuente: Elaboración propia

2.6.1.1.8. Dióxido de silicio

El sílice está compuesto de silicio y oxígeno, es el constituyente común de las rocas ígneas, el cuarzo y la arena. También lo contiene en abundancia las aguas volcánicas. Actúa como desecante, es decir que quita la humedad del lugar en que se encuentra.

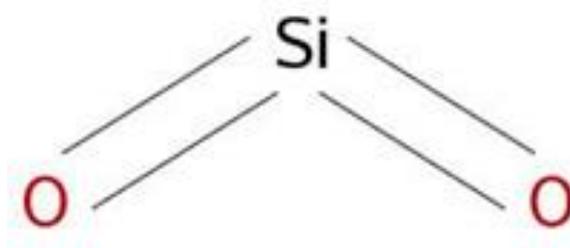
Su comportamiento en las mezclas asfálticas se basa en gran importancia debido a su contenido de silicio, este elemento electropositivo es el más abundante de la corteza terrestre después del oxígeno, tiene un punto de fusión de 1.411°C , un punto de ebullición de 2.355°C , una densidad relativa de 2.33 y su masa atómica es de 28.086. a temperaturas normales el silicio no es atacado por el aire, pero a temperaturas elevadas reacciona con el oxígeno formando una capa de sílice que impide continuar la reacción.

Es una creencia general que el agregado que posee silicio, algunas veces llamado “Hidrofilico” por su sed de agua, es apto para el strip y que los agregados con bajo contenido de silicio, llamados “Hidrofobos” por su rechazo al agua, no. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que existen algunos agregados que resisten completamente la acción del agua bajo todas las condiciones de su empleo. Los agregados de silicio son empleados con éxito en muchas áreas donde, se centra la atención en el diseño de la mezcla, sus propiedades y la practica constructiva.

Fórmula química: SiO_2

Estructura química

Figura 2.5. Estructura química Dióxido de Silicio



Fuente: <https://www.pochteca.com.mx/productosmp/dioxido-de-silicio>.

Especificaciones técnicas

Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del dióxido de silicio

| Análisis químico | | |
|----------------------------|--------------------------------|----------|
| Mineral | Formula | % |
| Sílice | SiO ₂ | 99.84 |
| Aluminio | Al ₂ O ₃ | 17.23 |
| Hierro | Fe ₂ O ₃ | 0.48 |
| Calcio | CaO | 2.81 |
| Magnesio | MgO | 1.82 |
| Sodio | Na | 1.8 |
| Potasio | K | 0.18 |
| Propiedades Físicas | | |
| Color | Blanco plomizo | |
| Peso específico | 2.0 gr/cm ³ | |
| Humedad | 1 % | |
| Granulometría | Malla 200 | |
| Solubilidad | Insoluble al aceite | |
| Olor | Inodoro | |
| Inflamabilidad | No inflamable | |
| Toxicidad | No toxico | |

Fuente: Elaboración propia

2.6.2. Agregados pétreos

Un agregado pétreo es un material mineral duro e inerte, usado en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento flexible. Los agregados se usan tanto en las capas de base granular como para la elaboración de la mezcla asfáltica. (Asociación de productores y pavimentadores de Colombia, 2004).

El agregado constituye entre el 90 % y 95 % en peso y entre el 75 y 85 % en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Ésto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento.

2.6.2.1. Clasificación de los agregados pétreos

Los agregados utilizados en mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo a su origen, éstos pueden ser:

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.

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 tamaño igual menor de 6.35mm. (1/4"). La arena se define como partícula de tamaño menor de 6.35 mm. (1/4") pero mayor que 0.075 mm. (No. 200). Las partículas menores que 0.075. (No. 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional son conocidos como materiales en bruto, y los materiales tomados de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de canteras de ríos.

Los depósitos de gravas varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente, alguna cantidad de arcilla y limo. Las arenas de playa (algunas de las cuales se encuentran tierra adentro hoy día) están compuestas de partículas de tamaño regularmente uniforme, mientras que las arenas de río contienen proporciones grandes de grava, limo y arcilla.

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 deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.

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. El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lechos de roca y de

pedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable. Sin embargo, los cambios en la textura superficial, y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones económicas, el material triturado es usado tal y como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado. Un control adecuado de las operaciones de triturado sin cribar, y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimento. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

El triturado de algunos tipos de roca, como las calizas, produce cantidades substanciales de pequeños fragmentos y partículas. Esta fracción de material es separada de las partículas que tienen diámetros iguales o mayores 6.35 mm (1/4 pulgada), casi siempre, y usada como agregado de una arena triturada, o procesada hasta tamaños máximos de 0.60 mm (N° 30).

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. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado.

El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es 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.

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación. Ellos son producidos al quemar arcilla, arcilla esquistosa, tierra diatomácea procesada, vidrio volcánico, escoria y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y tienen una resistencia muy alta al desgaste. Los agregados sintéticos han sido usados en la pavimentación de cubiertas de puentes cubiertas de techos, así como en capas superficiales de pavimento donde se requiere la máxima resistencia al deslizamiento.

2.6.2.2. Propiedades de los agregados pétreos

En una mezcla asfáltica en caliente densamente gradada, el agregado conforma entre el 90 y 95 % en peso, de la mezcla. Ésto hace que la calidad del agregado utilizado sea un factor crítico en el comportamiento de la carpeta de rodadura.

Las propiedades más comunes para considerar apropiado un agregado para las mezclas asfálticas son los siguientes:

Gradación y tamaño máximo de la partícula.

Tamaño máximo del agregado.

Limpieza.

Dureza.

Forma de la película.

Textura de la superficie.

Capacidad de absorción.

2.6.2.3. Ensayos realizados a los agregados

Granulometría

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Tabla 2.6. Serie de tamices utilizados para realizar la granulometría

| Designación de tamices para agregados gruesos | | Designación de tamices para agregados finos | |
|---|---------------------------------|---|---------------------------------|
| Sistema métrico (mm) | Sistema habitual norteamericano | Sistema métrico (mm) | Sistema habitual norteamericano |
| 63.0 | 2 1/2" | 2.36 | N°8 |
| 50.0 | 2" | 1.18 | N°16 |
| 37.5 | 1 1/2" | 0.60 | N°30 |
| 25.0 | 1" | 0.30 | N°50 |
| 19.0 | 3/4" | 0.15 | N°100 |
| 12.5 | 1/2" | 0.08 | N°200 |
| 9.5 | 3/8" | | |
| 4.8 | N°4 | | |

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 36.

Densidad real, densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos y finos

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos.

Es aplicable a los áridos gruesos y finos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Equivalente de arena

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz N° 4 (4.75 mm).

Desgaste mediante la máquina de los Ángeles

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2.36 mm, de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, mediante la máquina de los ángeles.

Caras fracturadas en los áridos

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso de material que presenta una o más caras fracturadas de las muestras de áridos.

Caras chatas y alargadas en los áridos

Este método establece el procedimiento para determinar el porcentaje de partículas chatas y alargadas en los áridos.

2.6.2.4. Especificaciones que deben cumplir los agregados

2.6.2.4.1. Agregado grueso

Este material debe consistir en grava de buena calidad (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:

Tabla 2.7. Especificaciones que debe cumplir el agregado grueso.

| N° | Parámetro | Norma | Especificación |
|-----------|-------------------------------|--------------|-----------------------|
| 1 | Abrasión de los Ángeles | AASHTO T 96 | 40% máximo |
| 2 | Durabilidad, sulfato de sodio | AASHTO T 104 | 12% máximo |
| 3 | Caras fracturadas | ASTM D 5281 | 75% mínimo |

Fuente: Recuperado de “Comparación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas convencionales calientes con otras con adición de cemento portland y cal hidratada como reemplazo del filler”, Garzón Alemán, W., 2017, pag.24.

2.6.2.4.2. Agregado fino

Este método está formado por arenas naturales, arena de piedra chancada tamizada, 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 según AASHTO M 29 incluyendo la pérdida en sulfato, y que llene además los requisitos siguientes:

Tabla 2.8. Especificaciones que debe cumplir el agregado fino.

| N° | Parámetro | Norma | Especificación |
|----|-------------------------------|--------------|----------------|
| 1 | Índice de durabilidad (fino) | AASHTO T 210 | 35% mínimo |
| 2 | Equivalente de arena | AASHTO T 176 | 45% mínimo |
| 3 | Durabilidad, sulfato de sodio | AASHTO T 104 | 15% máximo |

Fuente: Recuperado de “Comparación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas convencionales calientes con otras con adición de cemento portland y cal hidratada como reemplazo del filler”, Garzón Alemán, W., 2017, pag.25.

La graduación del agregado fino será conforme a la siguiente graduación.

Tabla 2.9. Graduación del agregado fino de acuerdo a AASHTO M 29.

| Graduación del agregado fino | | | | | | |
|------------------------------|-------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Tamaño de tamiz | | Cantidad más fina que cada tamiz de laboratorio (Aberturas cuadradas), Masa, % | | | | |
| | (mm) | Graduación N° 1 | Graduación N° 2 | Graduación N° 3 | Graduación N° 4 | Graduación N° 5 |
| 3/8" | 9.5 | 100 | - | - | 100 | 100 |
| N°4 | 4.75 | 95 a 100 | 100 | 100 | 80 a 100 | 80 a 100 |
| N°8 | 2.36 | 70 a 100 | 75 a 100 | 95 a 100 | 65 a 100 | 65 a 100 |
| N°16 | 1.18 | 40 a 80 | 50 a 74 | 85 a 100 | 40 a 80 | 40 a 80 |
| N°30 | 0.6 | 20 a 65 | 28 a 52 | 65 a 90 | 20 a 65 | 20 a 65 |
| N°50 | 0.3 | 7 a 40 | 8 a 30 | 30 a 60 | 7 a 40 | 7 a 46 |
| N°100 | 0.15 | 2 a 20 | 0 a 12 | 5 a 25 | 2 a 20 | 2 a 30 |
| N°200 | 0.075 | 0 a 10 | 0 a 5 | 0 a 5 | 0 a 10 | - |

Fuente: Tabla 1 norma AASHTO M 29

2.6.3. Filler (llenante mineral)

El filler consiste en material finamente dividido donde sus partículas pasan a través del tamiz 0.075 mm (N° 200), generalmente son provenientes de rocas, cal hidratada, cemento hidráulico, cenizas volantes u otro material adecuado.

El filler o llenante mineral es el material que es incorporado a las mezclas asfálticas con el fin de modificar sus propiedades mecánicas y complementar la fracción granulométrica, para generar una mezcla bien gradada y un mejor comportamiento de ésta.

2.6.3.1. Efecto del filler como componente de las mezclas asfálticas

- El principal efecto que tiene el filler sobre los pavimentos es el aumento de durabilidad debido a que se reduce el contenido de vacíos y se disminuye la penetración del agua a las capas inferiores.
- El incremento excesivo de filler en la mezcla asfáltica también genera problemas en su comportamiento, consigue que el pavimento se endurezca demasiado y en consecuencia se vuelva frágil ocasionando fisuras en la capa de rodadura.
- El general el efecto de la adición del filler es endurecer el asfalto, en términos prácticos significa que existiría una reducción en su deformación o fluencia producida por la acción de una carga, también existirá un incremento en su punto de ablandamiento y un incremento en su rigidez.

2.6.3.2. Influencia del filler en las propiedades de las mezclas asfálticas

Las principales propiedades de las mezclas asfálticas que determinan su calidad se resumen en tres que son: resistencia ante la deformación, flexibilidad y durabilidad.

Mejorar el cerrado de la mezcla sin el empleo exagerado de asfalto.- debido a que el filler actúa como relleno de vacíos, lo cual permite disminuir espacios libres existentes entre agregados mayores. Esta actividad además depende de los vacíos de la mezcla, ya que cuando el agregado está bien graduado y la forma de sus partículas permiten una ajustada distribución, entonces la necesidad de agregar filler es menor, incluso puede llegar a ser inconveniente por disminuir exageradamente se obtendrán mezclas pobres de ligante de menor durabilidad.

Incrementar la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica.- debido a que el filler aumenta de manera importante la viscosidad del asfalto, mejor dicho, la combinación de filler-asfalto es un sistema de alta viscosidad el cual participa de manera importante en la resistencia ante la deformación.

Incrementar la durabilidad de la mezcla.- debido a que el filler actúa como relleno de vacíos, lo cual permite disminuir la porosidad dificultando la entrada de agentes

agresivos como el agua, aire; además de que es el principal aglomerante dentro de la mezcla asfáltica y mantiene unidos a los agregados.

2.6.3.3. Ensayos de caracterización al filler

Granulometría del filler

El método tiene por objeto el análisis, por medio de tamices, del filler empleado en materiales componentes de mezclas asfálticas para pavimentos bituminosos.

Índice de plasticidad

Este método establece el procedimiento para determinar el índice de plasticidad del material fino (filler).

2.6.3.4. Especificaciones del filler

La granulometría debe cumplir con lo establecido en la siguiente tabla.

Tabla 2.10. Granulometría que debe cumplir el filler de acuerdo con la norma ASTM

| Tamaño de tamiz | Porcentaje pasante (%) |
|-----------------|------------------------|
| N°16 (1.18 mm) | 100 |
| N°30 (600 µm) | 97-100 |
| N°50 (300 µm) | 95-100 |
| N°200 (75 µm) | 70-100 |

Fuente: ASTM D 242 (Stander specification for mineral filler for bituminous paving mixtures)

Tabla 2.11. Especificaciones que debe cumplir el filler

| N° | Parámetro | Norma | Especificación |
|----|-----------------------|----------------------------|----------------|
| 1 | Índice de plasticidad | ASTM D 4318 AASHTO T 90 | 4 % máximo |

Fuente: ASTM D 242 (Stander specification for mineral filler for bituminous paving mixtures)

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON POLICARBONATO DE BISFENOL-A (RESIDUO DE CD) Y DIÓXIDO DE SILICIO

3.1. Identificación de la zona de muestreo

Básicamente el material a utilizar debe cumplir ciertas especificaciones que mencionamos anteriormente. Para el presente proyecto utilizamos materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas vigentes. Además de tener una disponibilidad

Ubicación

Los agregados pétreos que se va utilizar en la presente investigación se encuentran en la comunidad de San José de Charajas, municipio de Uriondo, Provincia de Avilés, departamento de Tarija, Bolivia a $21^{\circ}46'54.66''$ S y $64^{\circ}46'14.50''$ O, a una elevación de 1861 msnm.

Figura 3.1. Ubicación geográfica de la chancadora San José de Charajas (SEDECA)



Fuente: Google Earth

Descripción del tipo de material

Los agregados como ser grava (3/4”), gravilla (3/8”) y arena son extraídos del río Camacho en su totalidad son chancados para la provisión de material para la Institución del Servicio Departamental de Caminos de la ciudad de Tarija (SEDECA), los mismos son utilizados en diferentes proyectos de construcción debido a las buenas propiedades físicas y mecánicas que presenta.

Toma de muestra de agregados pétreos

Se tomó muestra de material de agregado triturado grava (3/4”), gravilla (3/8”) y arena del stock de la planta asfáltica de SEDECA, la toma de muestra fue realizada por el método de cuarteo.

Caracterización de agregados pétreos

Los ensayos de agregados pétreos, cemento asfáltico se realizaron en el laboratorio de materiales de construcción de la Universidad “Juan Misael Saracho” en el área de hormigones y pavimentos en los laboratorios de asfaltos respectivamente.

Agregados pétreos (gruesos y finos)

Un procedimiento preliminar para el diseño de mezclas asfálticas óptimo es la caracterización de los agregados pétreos en laboratorio, los ensayos para áridos gruesos y finos están normados por la ASTM y/o por su equivalente en las normas AASHTO y los resultados de los mismos deben cumplir con las especificaciones generales.

3.2. Caracterización del agregado pétreo

3.2.1. Ensayo de granulometría (AASHTO T-27) (ASTM C-136)

Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregado grueso y fino de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente. Este método también se puede aplicar usando mallas de laboratorio de abertura redonda, y no se empleará para agregados recuperados de mezclas asfálticas.

Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregados en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica, los pesos de cada tamaño se expresan como porcentaje retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de los valores de material (granulometría).

Las mallas de prueba que se usan comúnmente para los proyectos de carreteras son aquellas con abertura de $2\frac{1}{2}$ ", 2", $1\frac{1}{2}$ ", 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ " de pulgada cuadrada para las fracciones grandes y con N° 4, N° 8 N° 16, N° 30, N° 50, N° 100, N° 200 mallas por pulgada para las fracciones más pequeñas.

A la porción de material agregado que queda retenida en la malla N° 10 (ésto es, con partículas mayores de 2,00 mm) se le conoce como agregado grueso. Al material que pasa por la malla N° 10 pero queda retenido en la malla N° 200 (partículas mayores que 0.075) se le conoce como agregado fino. El material que pasa por la malla N° 200 se llama fino y corresponde a impurezas, limos y arcillas.

Se realizaron 3 ensayos de granulometría para los diferentes agregados utilizados ($\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ ", agregado fino) teniendo como resultado un promedio de los resultados obtenidos de los diferentes agregados.

Figura 3.2. Realizando el ensayo de granulometría de los agregados



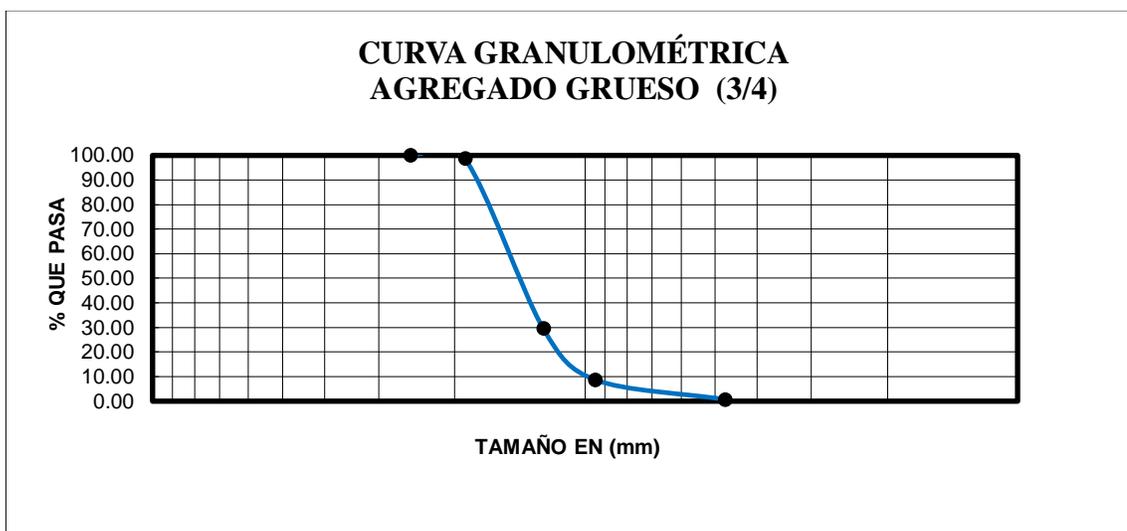
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1. Granulometría promedio agregado grueso (3/4")

| Peso Total (gr.) | | | | | 5000 |
|------------------|-------------|--------------------|--------------------|------------|----------------------|
| Tamices | Tamaño (mm) | Peso retenido (gr) | Retenido acumulado | % Retenido | % Que pasa del total |
| 1" | 25.4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 3/4" | 19.0 | 60.00 | 60.00 | 1.20 | 98.80 |
| 1/2" | 12.5 | 3460.00 | 3520.00 | 70.40 | 29.60 |
| 3/8" | 9.50 | 1040.00 | 4560.00 | 91.20 | 8.80 |
| Nº4 | 4.75 | 405.00 | 4965.00 | 99.30 | 0.70 |
| Nº8 | 2.36 | 0.00 | 4965.00 | 99.30 | 0.70 |
| Nº16 | 1.18 | 0.00 | 4965.00 | 99.30 | 0.70 |
| Nº30 | 0.60 | 0.00 | 4965.00 | 99.30 | 0.70 |
| Nº50 | 0.30 | 0.00 | 4965.00 | 99.30 | 0.70 |
| Nº100 | 0.15 | 0.00 | 4965.00 | 99.30 | 0.70 |
| Nº200 | 0.075 | 0.00 | 4965.00 | 99.30 | 0.70 |
| BASE | - | 35.00 | 5000.00 | 100.00 | 0.00 |

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1. Curva granulométrica agregado grueso (3/4)



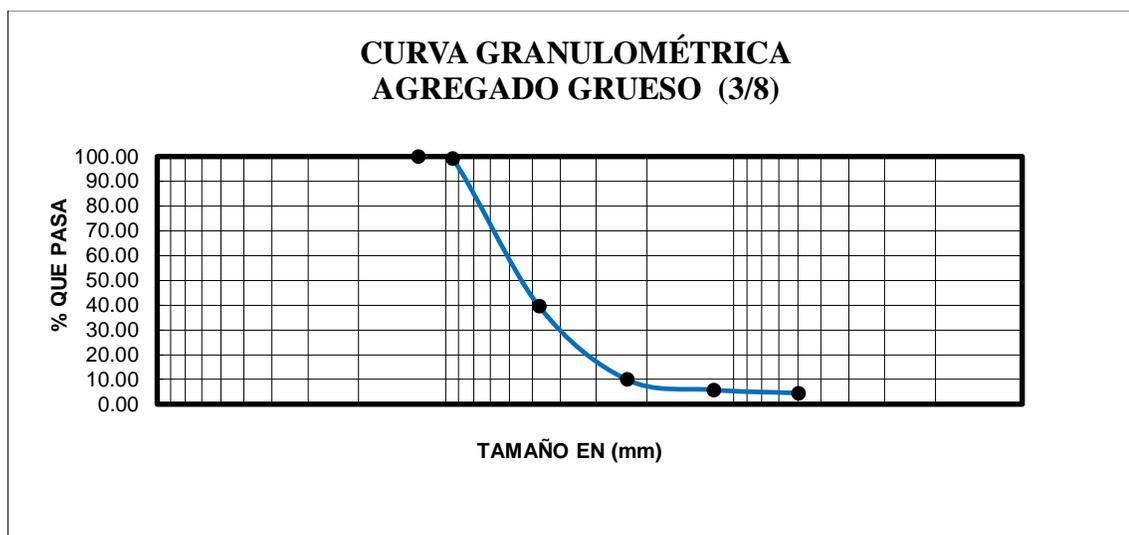
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2. Granulometría promedio agregado grueso (3/8")

| Peso Total (gr.) | | | | | 2000 |
|------------------|-------------|--------------------|--------------------|------------|----------------------|
| Tamices | Tamaño (mm) | Peso retenido (gr) | Retenido acumulado | % Retenido | % Que pasa del total |
| 1" | 25.4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 3/4" | 19.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 1/2" | 12.5 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 3/8" | 9.50 | 14.20 | 14.20 | 0.71 | 99.29 |
| Nº4 | 4.75 | 1192.50 | 1206.70 | 60.34 | 39.67 |
| Nº8 | 2.36 | 592.50 | 1799.20 | 89.96 | 10.04 |
| Nº16 | 1.18 | 85.00 | 1884.20 | 94.21 | 5.79 |
| Nº30 | 0.60 | 25.90 | 1910.10 | 95.51 | 4.49 |
| Nº50 | 0.30 | 11.90 | 1922.00 | 96.10 | 3.90 |
| Nº100 | 0.15 | 15.90 | 1937.90 | 96.90 | 3.10 |
| Nº200 | 0.075 | 0.00 | 1937.90 | 96.90 | 3.10 |
| BASE | - | 62.10 | 2000.00 | 100.00 | 0.00 |

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2. Curva granulométrica agregado grueso (3/8)



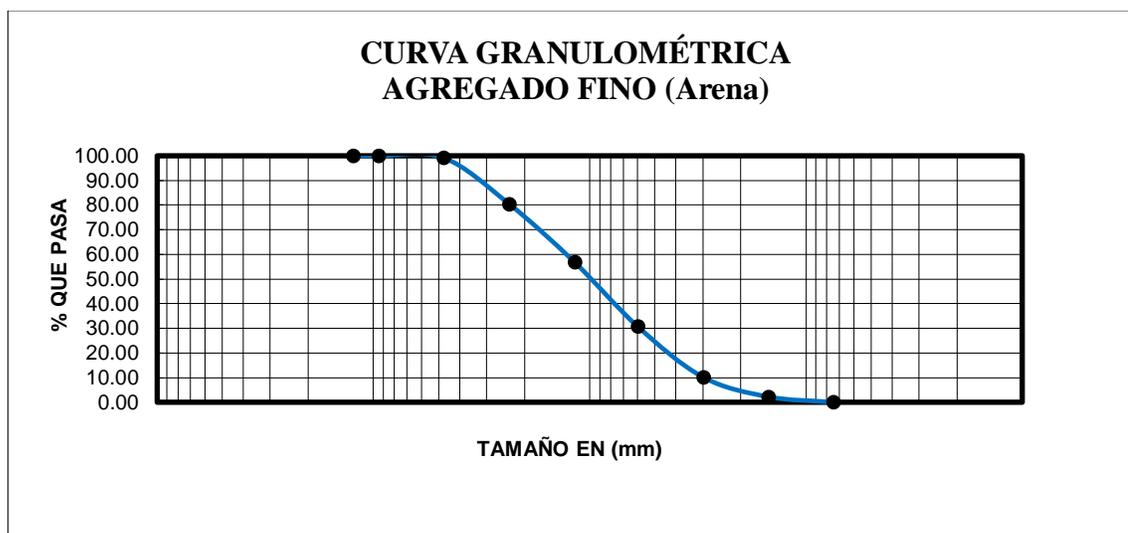
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3. Granulometría promedio agregado fino (arena)

| Tamices | Tamaño (mm) | Peso Total (gr.) | | | 2000 |
|---------|-------------|--------------------|--------------------|------------|----------------------|
| | | Peso retenido (gr) | Retenido acumulado | % Retenido | % Que pasa del total |
| 1/2 | 12.5 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 3/8 | 9.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| Nº4 | 4.75 | 15.00 | 15.00 | 0.75 | 99.25 |
| Nº8 | 2.36 | 375.00 | 390.00 | 19.50 | 80.50 |
| Nº16 | 1.18 | 470.00 | 860.00 | 43.00 | 57.00 |
| Nº30 | 0.60 | 525.00 | 1385.00 | 69.25 | 30.75 |
| Nº50 | 0.30 | 410.00 | 1795.00 | 89.75 | 10.25 |
| Nº100 | 0.15 | 160.00 | 1955.00 | 97.75 | 2.25 |
| Nº200 | 0.075 | 45.00 | 2000.00 | 100.00 | 0.00 |
| BASE | - | 0.00 | 2000.00 | 100.00 | 0.00 |

Fuente: Elaboración propia

Grafico 3.3. Curva granulométrica agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados grueso (AASHTO T-85) (ASTM C-127)

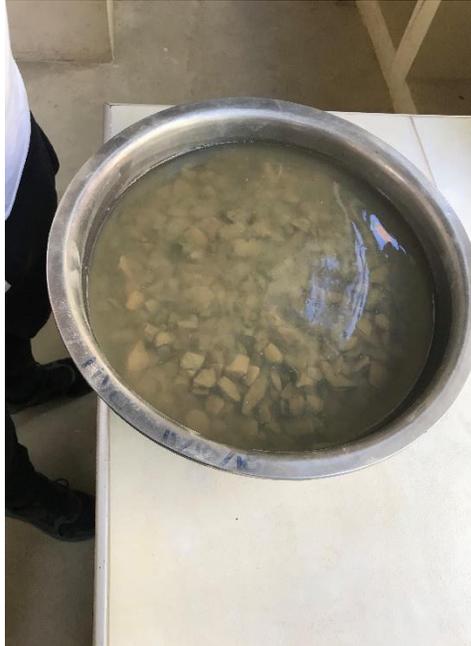
Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

Para este ensayo se realizó la medición del peso específico para la grava 3/4" y para la gravilla 3/8".

La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100 - 110°C.

Después se sumerge en agua durante 24 horas y se secan las partículas sobre un paño, a continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturación con superficie seca (s.s.s.), posteriormente, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergido en el agua a la temperatura de 25°C de temperatura ambiente.

Figura 3.3. Agregado saturado 24 horas, antes del peso superficialmente seco



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4. Pesando la muestra superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5. Realizando el ensayo de peso específico de los agregados gruesos



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4. Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso (3/4")

| Muestra n° | Peso muestra secada "a" (gr) | Peso muestra saturada con sup. seca "b" (gr) | Peso muestra saturada dentro del agua "c" (gr) |
|------------|------------------------------|--|--|
| 1 | 4946.00 | 5000.10 | 3077.00 |
| 2 | 4944.90 | 5000.40 | 3125.00 |
| 3 | 4939.75 | 5000.10 | 3115.00 |

fuentes: Elaboración propia

Cálculos:

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{4946}{5000.10 - 3077}$$

$$\text{Peso específico a granel} = 2.57 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico saturado con superficie seca} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Peso específico saturado con superficie seca} = \frac{5000.10}{5000.10 - 3077}$$

$$\text{Peso específico saturado con superficie seca} = 2.60 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{4946}{4946 - 3077}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2.65 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{(5000.10 - 4946)}{4946} * 100$$

$$\% \text{ de Absorción} = 1.09 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 3.5. Resultados del ensayo de peso específico para el agregado grueso (3/4")

| Muestra n° | Peso específico a granel (gr/cm ³) | Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³) | Peso específico aparente (gr/cm ³) | % De absorción |
|-----------------|--|--|--|----------------|
| 1 | 2.57 | 2.60 | 2.65 | 1.09 |
| 2 | 2.64 | 2.67 | 2.72 | 1.12 |
| 3 | 2.62 | 2.65 | 2.71 | 1.22 |
| Promedio | 2.61 | 2.64 | 2.69 | 1.15 |

Fuente: Elaboración propia

El mismo procedimiento de cálculo se realizó para el agregado grueso (3/8")

Tabla 3.6. Resultados del ensayo de peso específico para el agregado grueso (3/8")

| Muestra n° | Peso muestra secada "a" (gr) | Peso muestra saturada con sup. seca "b" (gr) | Peso muestra saturada dentro del agua "c" (gr) | Peso específico a granel (gr/cm ³) | Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³) | Peso específico aparente (gr/cm ³) | % De absorción |
|-----------------|--|--|--|---|---|---|----------------------|
| 1 | 4941.30 | 5000.20 | 3121.00 | 2.63 | 2.66 | 2.71 | 1.19 |
| 2 | 4929.80 | 5000.00 | 3108.00 | 2.61 | 2.64 | 2.71 | 1.42 |
| 3 | 4937.57 | 5000.00 | 3114.00 | 2.62 | 2.65 | 2.71 | 1.26 |
| Promedio | | | | 2.62 | 2.65 | 2.71 | 1.29 |

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Ensayo de peso específico y absorción de agua del agregado fino (AASHTO T-84) (ASTM C-128)

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

Figura 3.6. Determinando el peso superficialmente seco del agregado fino (Arena)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7. Ensayo de peso específico para agregado fino (Arena)

| Muestra n° | Peso muestra (gr) | Peso de matr az (gr) | Muestra + matr az + agua (gr) | Peso del agua agregado al matr az "w" (ml)   (gr) | Peso muestra secada "a" (gr) | Volumen del matr az "v" (ml) | P. e. a granel (gr/cm ³) | P. e. saturado con sup. Seca (gr/cm ³) | P. e. aparente (gr/cm ³) | % De absorción |
|-----------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|----------------|
| 1 | 500 | 192.4 | 975.5 | 283.10 | 485.40 | 500.00 | 2.24 | 2.31 | 2.40 | 2.92 |
| 2 | 500 | 220 | 1030.7 | 310.70 | 486.70 | 500.00 | 2.57 | 2.64 | 2.77 | 2.66 |
| 3 | 500 | 175.9 | 993.8 | 317.90 | 484.90 | 500.00 | 2.66 | 2.75 | 2.90 | 3.02 |
| Promedio | | | | | | | 2.49 | 2.56 | 2.69 | 2.87 |

Fuente: elaboración propia

3.2.4. Ensayo de equivalente de Arena (AASHTO T-176) (ASTM D-2419)

El ensayo de equivalente de arena y agregados finos asigna un valor empírico a la cantidad relativa, figura y características del material fino que est  presente en una muestra de ensayo granular que pasa el tamiz N  4 (4.75mm). El equivalente de arena es una relación de la altura de arena con arena respecto a la altura de la arcilla, expresada en porcentaje. Primeramente, se debe tener muestra del material y tamizarlo por el tamiz N  4, para poder tener la muestra que se utiliza para este ensayo, colocarlo en un recipiente. Luego se debe colocar la muestra que se utilizará de arena en el cilindro, se deberá verter la muestra en el cilindro con la ayuda de un embudo y hacer momento del cilindro para que puedan perder todas las burbujas que tenga, dejar en reposo durante 10 minutos.

Colocar el tubo irrigador en la parte superior del cilindro y lavar el material de las paredes del cilindro, dejar el cilindro y el contenido en reposo por 20 minutos. Comenzar a medir el tiempo inmediatamente después de retirar el tubo irrigador. Al final los 20 minutos del periodo de sedimentación, leer y anotar los niveles alcanzados.

Figura 3.7. Equipo utilizado para realizar el ensayo de equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8. Muestras sedimentadas para realizar la medición



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8. Equivalente de arena del agregado fino (Arena)

| N° de muestra | H1 | H2 | Equivalente de arena (%) |
|-----------------|-------|-------|--------------------------|
| | (cm) | (cm) | |
| 1 | 10.20 | 14.30 | 71.33 |
| 2 | 10.30 | 14.10 | 73.05 |
| 3 | 10.10 | 13.60 | 74.26 |
| Promedio | | | 72.88 |

Fuente: elaboración propia

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{H_1}{H_2} * 100$$

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{10.20}{14.30} * 100$$

Tabla 3.9. Resultado del ensayo de equivalente de arena

| Equivalente de arena promedio (%) | Norma |
|-----------------------------------|-------|
| 72.88 | > 50% |

Fuente: elaboración propia

3.2.5. Ensayo de desgaste de la máquina de los Ángeles (AASHTO T-96) (ASTM C-131)

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

Debido a las condiciones de esfuerzo-deformación, la carga de la rueda es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la sub-rasante. Por esta razón los agregados que están en, o de la superficie, como son los materiales de base y de carpeta asfálticas, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores, sub base, de la estructura del pavimento, la razón de debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de cargas del tránsito.

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los Ángeles, ASTM C-131 o AASTHO T-96, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión.

Figura 3.9. Material para realizar el ensayo de desgaste de la máquina de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10. Desgaste por medio de la maquina de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10. ASTM C-131 de requerimiento según el tamaño de material que se tenga

| Gradación | | A | B | C | D |
|--------------------|----------|--|----------------|----------------|----------------|
| Diámetro | | Cantidad de material a emplear (gr) | | | |
| PASA | RETENIDO | | | | |
| 1 1/2" | 1" | 1250±25 | | | |
| 1" | 3/4" | 1250±25 | | | |
| 3/4" | 1/2" | 1250±10 | 2500±10 | | |
| 1/2" | 3/8" | 1250±10 | 2500±10 | | |
| 3/8" | 1/4" | | | 2500±10 | |
| 1/4" | N°4 | | | 2500±10 | |
| N°4 | N°8 | | | | 5000±10 |
| Peso total | | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 |
| Numero de esferas | | 12 | 11 | 8 | 6 |
| N° de revoluciones | | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Tiempo de rotación | | 15 | 15 | 15 | 15 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.11. Datos de laboratorio para el ensayo de desgaste de los Ángeles

| Datos de laboratorio | | |
|----------------------|----------------|---------------|
| Gradación b | | |
| Pasa tamiz | Retenido tamiz | Peso retenido |
| 3/4" | 1/2" | 2500 |
| 1/2" | 3/8" | 2500 |

Fuente: elaboración propia

Cálculos:

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}} * 100$$

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{5000 - 3968.7}{5000} * 100$$

$$\% \text{ Desgaste} = 20.63 \%$$

Tabla 3.12. Resultado del ensayo de desgaste de los Ángeles (Grava)

| Gradación | Peso inicial (gr) | Peso final (gr) | % de desgaste | Especificación ASTM |
|------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|
| B | 5000 | 3968.7 | 20.63 | 35% MAX |

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.13. Datos para el ensayo de desgaste de los Ángeles (Gravilla)

| Datos de laboratorio | | |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------|
| Gradación C | | |
| Pasa tamiz | Retenido tamiz | Peso retenido |
| 3/8" | 1/4" | 2500 |
| 1/4" | Nº4 | 2500 |

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}} * 100$$

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{5000 - 3911.8}{5000} * 100$$

$$\% \text{ Desgaste} = 21.76 \%$$

Tabla 3.14. Resultado del ensayo de desgaste de los Ángeles (Gravilla)

| Gradación | Peso inicial (gr) | Peso final (gr) | % De desgaste | Especificación ASTM |
|------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|
| C | 5000 | 3911.8 | 21.76 | 35% MAX |

Fuente: Elaboración propia

3.2.6. Ensayo determinación de partículas fracturadas (ASTM D-5821)

Este método de ensayo cubre la determinación del porcentaje de una muestra de agregado grueso (por masa o por conteo) que consiste de partículas fracturadas que cumplan requisitos especificados.

Figura 3.11. Preparación de la muestra para realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15. Datos ensayo de caras fracturadas

| Descripción | | Unidad | Lectura |
|---------------|--|--------|---------|
| Grava 3/4" | Peso total de la muestra | gr | 1500 |
| | Peso de caras fracturadas retenidas | gr | 1474.7 |

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Peso caras no fracturadas = Peso total de la muestra – Peso de caras fracturadas

Peso caras no fracturadas = 1474.7 – 1500

Peso caras no fracturadas = 25.3 gr.

$$\text{Porcentaje de caras fracturadas} = \frac{\text{Peso de caras fracturadas}}{\text{Peso total de la muestra}} * 100\%$$

$$\text{Porcentaje de caras fracturadas} = \frac{1474.7}{1500} * 100\%$$

$$\text{Porcentaje de caras fracturadas} = 98.31 \%$$

3.2.7. Ensayo determinación de partículas planas y alargadas (ASTM D 4791-10)

Este método cubre la determinación de los porcentajes de partículas planas y alargadas del agregado grueso.

Este método de prueba proporciona un medio para verificar el cumplimiento con las especificaciones relativas a la forma del agregado grueso.

Tabla 3.16. Resultados del ensayo de caras laminadas (Grava ¾)

| Material | Peso retenido (gr) | Peso retenido partículas laminares (gr) | % Retenido partículas laminares |
|--|---------------------------|--|--|
| 3/4" | 1000 | 42.5 | 4.25 |
| Peso Total | 1000 | | |
| (%) Total de partículas laminares (máximo 15%) | | | 4.25 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17. Resultados del ensayo de caras laminadas (Gravilla 3/8)

| Material | Peso retenido (gr) | Peso retenido partículas laminares (gr) | % Retenido partículas laminares |
|--|---------------------------|--|--|
| 3/8" | 1000 | 64.8 | 6.48 |
| Peso Total | 1000 | | |
| (%) Total de partículas laminares (máximo 15%) | | | 6.48 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18. Resultados del ensayo de partículas chatas (Grava ¾)

| Material | Peso retenido (gr) | Peso retenido partículas chatas (gr) | % Retenido partículas chatas |
|---|-------------------------------|---|---|
| ¾" | 1000 | 57.2 | 5.72 |
| Peso Total | 1000 | | |
| (%) Total de partículas chatas alargadas (Máximo 15%) | | | 5.72 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19. Resultados del ensayo de partículas chatas (Gravilla 3/8)

| Material | Peso retenido (gr) | Peso retenido partículas chatas (gr) | % Retenido partículas chatas |
|---|-------------------------------|---|---|
| 3/8" | 1000 | 23.6 | 2.36 |
| Peso total | 1000 | | |
| (%) Total de partículas chatas alargadas (Máximo 15%) | | | 2.36 |

Fuente: Elaboración propia

3.3. Caracterización del cemento asfáltico

Para realizar el diseño óptimo se realizó la evaluación y la caracterización del cemento asfáltico STRATURA 85-100

El cemento asfáltico es empleado para la producción de mezclas asfálticas en caliente, ya que por sus propiedades adhesivas facilita la unión de los áridos. Tres métodos basados en la penetración, viscosidad o comportamiento se usan para la clasificación de los cementos asfálticos.

La toma de muestras del cemento asfáltico, se realizó en la planta asfáltica de San José de Charaja (SEDECA).

Los ensayos que fueron realizados sobre el cemento asfáltico, se detallan a continuación:

Penetración

Punto de Inflamación con copa abierta Cleveland (Punto de chispa y llama)

Peso específico del cemento asfáltico

Punto de Ablandamiento

Ductilidad

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

La penetración se define como la distancia, expresada en decimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 gramos, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas. Es evidente que cuando más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración. Se coloca una muestra a calentar que se colocarán en un recipiente hasta que este fluido se lo coloca en 2 moldes. Se lo deja enfriar por una hora a temperatura ambiente y se lo coloca en baño María por una hora a 25°C.

Una vez transcurrido los tiempos de inmersión, se aproxima la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sin que penetre. Se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo específico.

Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.

Figura 3.12. Baño María de la muestra para realizar el ensayo de penetración



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20. Datos del ensayo de penetración del cemento asfáltico 85-100

| Ensayo | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio | Especificaciones | |
|---|-------------|----------|----------|----------|----------|------------------|--------|
| | | | | | | Mínimo | Máximo |
| Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49 | Lectura N°1 | mm. | 89 | 87 | 87 | | |
| | Lectura N°2 | mm. | 91 | 92 | 93 | | |
| | Lectura N°3 | mm. | 90 | 89 | 90 | | |
| | Promedio | mm. | 90 | 89 | 90 | 90 | 85 |

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Calculando la media de los ensayos realizados.

Resultado: realizando la media se tiene como valor de penetración de 90 mm a 25°C, 5 segundos.

3.3.2. Ensayo de punto de inflamación (AASHTO T 79-96) (ASTM D 1310-01)

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separa materiales volátiles de la muestra y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos.

Llenar la copa con el cemento asfáltico y se aplica calor inicialmente de tal manera que se incremente la temperatura. Pasar la llama de ensayo a través del centro de la copa. Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie.

Figura 3.13. Ensayo de punto Inflamación



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14. Realizando el ensayo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21. Datos del ensayo de punto de inflamación del cemento asfáltico 85-100

| Ensayo | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio | Especificaciones | |
|----------------------------------|--------|----------|----------|----------|------------|------------------|--------|
| | | | | | | Mínimo | Máximo |
| Punto de Inflamación AASHTO T-48 | °C | 274 | 270 | 272 | 272 | >232 | - |

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Calculando la media de los ensayos realizados.

Resultado: realizando la media se tiene como valor de punto de inflamación de 272°C

3.3.3. Ensayo de peso específico del asfalto (AASHTO T 229-97) (ASTM D-71)

El peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al paso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25°C. el peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual

volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas específicas. Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada.

Figura 3.15. Picnómetros para el ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.22. Datos del ensayo de peso específico del cemento asfáltico 85-100

| Ensayo | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio | Especificaciones | |
|----------------------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------|
| | | | | | | mínimo | máximo |
| Peso Picnómetro | gr. | 35.1 | 33.9 | 32.9 | | | |
| Peso Picnómetro + Agua (25°C) | gr. | 86.2 | 86.9 | 86.1 | | | |
| Peso Picnómetro + Muestra | gr. | 59.6 | 58.8 | 58.4 | | | |
| Peso Picnómetro + Agua + Muestra | gr. | 86.8 | 87.3 | 86.6 | | | |
| Peso específico | gr./cm ³ | 1.022 | 1.014 | 1.017 | 1.018 | 1 | 1.05 |

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Calculando la media de los ensayos realizados.

Resultado: realizando la media se tiene como valor de peso específico del cemento asfáltico de 1.018 gr/cm³

3.3.4. Ensayo punto de ablandamiento (AASTHO T 53-96) (ASTM D-36)

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentra en el rango de 30 a 200°C, por medio del aparato de anillo y bola.

Es general, con materiales de este tipo, el ablandamiento no ocurre a una temperatura definida; a medida que la temperatura aumenta, el material cambia gradual e imperceptiblemente, de un estado quebradizo o excesivamente espeso y de poca fluidez, a líquidos y blandos y menos viscosos. Por esta razón, la determinación del punto de ablandamiento se debe efectuar mediante un método arbitrario, pero bien definido, de manera de comparar resultados. Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una velocidad determinada y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal, esta temperatura se llama punto de ablandamiento del asfalto.

Figura 3.16. Equipo para realizar el ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.17. Ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23. Datos del ensayo punto de ablandamiento del cemento asfáltico 85-100

| Ensayo | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio | Especificaciones | |
|-------------------------------|--------|----------|----------|----------|----------|------------------|--------|
| | | | | | | Mínimo | Máximo |
| Punto de ablandamiento | °C | 41.0 | 42.0 | 45.0 | 43 | 42 | 53 |

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Calculando la media de los ensayos realizados.

Resultado: realizando la media se tiene como valor de punto de ablandamiento de 43°C

3.3.5. Ensayo para determinar la ductilidad (AASHTO T 51-00) (ASTM D-113)

la ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una

muestra y de la forma descrita en 1 se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y a una velocidad de $5 \text{ cm/min} \pm 5 \%$. Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad.

Figura 3.18. Moldes para realizar el ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.19. Muestra más los moldes a 25°C para realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20. Ensayo de ductilidad del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.24. Datos del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico 85-100

| Ensayo | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio | Especificaciones | |
|-------------------------------|--------|----------|----------|----------|------------|------------------|--------|
| | | | | | | Mínimo | Máximo |
| Ductilidad a 25°C AASHTO T-51 | cm. | 105 | 106 | 108 | 106 | >100 | - |

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Calculando la media de los ensayos realizados.

Resultado: realizando la media se tiene como valor de ductilidad de 106 cm

3.3.6. Resumen de resultados del cemento asfáltico

Se presenta los resultados de la recolección de información, los mismos que son comparados con las especificaciones técnicas propuesta por la norma ASTM

Tabla 3.25. Resumen de resultados de la caracterización del cemento asfáltico 85-100

| Ensayo | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio | Especificaciones | |
|--|----------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|------------------|--------|
| | | | | | | Mínimo | Máximo |
| Peso Picnómetro | grs. | 35.1 | 33.9 | 32.9 | | | |
| Peso Picnómetro + Agua (25°C) | grs. | 86.2 | 86.9 | 86.1 | | | |
| Peso Picnómetro + Muestra | grs. | 59.6 | 58.8 | 58.4 | | | |
| Peso Picnómetro + Agua + Muestra | grs. | 86.8 | 87.3 | 86.6 | | | |
| Peso Específico | grs./cm ³ | 1.022 | 1.014 | 1.017 | 1.018 | 1 | 1.05 |
| Punto de Inflamación AASHTO T-48 | °C | 274 | 270 | 272 | >272 | >232 | - |
| Ductilidad a 25°C AASHTO T-51 | cm. | 105 | 106 | 108 | 106 | >100 | - |
| Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49 | Lectura N°1 | 89 | 87 | 87 | | | |
| | Lectura N°2 | 91 | 92 | 93 | | | |
| | Lectura N°3 | 90 | 89 | 90 | | | |
| | Promedio | mm. | 90 | 89 | 90 | 90 | 85 |
| Punto de ablandamiento | °C | 41.0 | 42.0 | 45.0 | 43 | 42 | 53 |

Fuente: Elaboración propia

3.4. Dosificación para la mezcla asfáltica

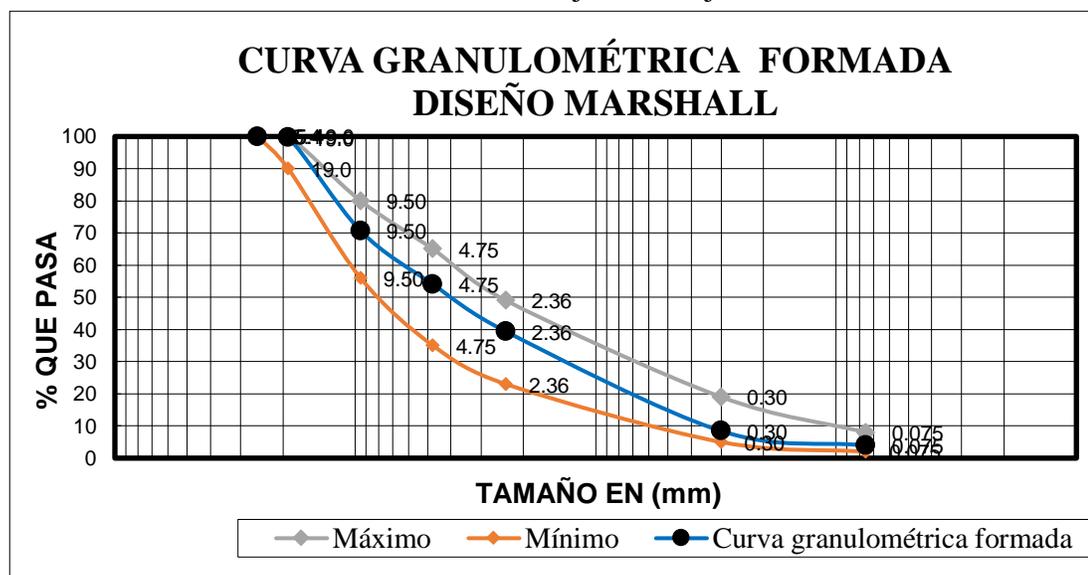
Se realiza las dosificaciones de los porcentajes de cada agregado de manera que se pueda cumplir con las especificaciones, los agregados son de la planta de San Jose de Charaja (SEDECA), ubicada en el municipio de Uriondo, lo que se determinó la faja de la granulometría de la mezcla asfáltica convencional; se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 32 % de agregado grueso de (3/4”), 23 % de agregado grueso de (3/8”), 42 % de agregado fino (Arena) y 3 % de filler para la granulometría formada.

Tabla 3.26. Dosificación para la mezcla asfáltica

| Tamices | Tamaño (mm) | Grava | Gravilla | Arena | Filler | Total | | | | Especificaciones | | |
|---------|----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-----------|-----------|--------|----------------------|------------------|--------|--|
| | | (%) | (%) | (%) | (%) | Peso ret. | Ret. Acum | % Ret | % Que pasa del total | Mínimo | Máximo | |
| | | 32.00 | 23.00 | 42.00 | 3.00 | 100.00 | | | | | | |
| 1" | 25.4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100 | 100 | |
| 3/4" | 19.0 | 19.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 19.20 | 19.20 | 0.38 | 99.62 | 90 | 100 | |
| 1/2" | 12.5 | 1107.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1107.20 | 1126.40 | 22.53 | 77.47 | - | - | |
| 3/8" | 9.50 | 332.80 | 8.17 | 0.00 | 0.00 | 340.97 | 1467.37 | 29.35 | 70.65 | 56 | 80 | |
| Nº4 | 4.75 | 129.60 | 685.69 | 15.75 | 0.00 | 831.04 | 2298.40 | 45.97 | 54.03 | 35 | 65 | |
| Nº8 | 2.36 | 0.00 | 340.69 | 393.75 | 0.00 | 734.44 | 3032.84 | 60.66 | 39.34 | 23 | 49 | |
| Nº16 | 1.18 | 0.00 | 48.88 | 493.50 | 0.00 | 542.38 | 3575.22 | 71.50 | 28.50 | - | - | |
| Nº30 | 0.60 | 0.00 | 14.89 | 551.25 | 0.00 | 566.14 | 4141.36 | 82.83 | 17.17 | - | - | |
| Nº50 | 0.30 | 0.00 | 6.84 | 430.50 | 0.00 | 437.34 | 4578.70 | 91.57 | 8.43 | 5 | 19 | |
| Nº100 | 0.15 | 0.00 | 9.14 | 168.00 | 0.00 | 177.14 | 4755.84 | 95.12 | 4.88 | - | - | |
| Nº200 | 0.075 | 0.00 | 0.00 | 47.25 | 0.00 | 47.25 | 4803.09 | 96.06 | 3.94 | 2 | 8 | |
| BASE | - | 11.20 | 35.71 | 0.00 | 150.00 | 196.91 | 5000.00 | 100.00 | 0.00 | - | - | |

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.4. Faja de trabajo



Fuente: Elaboración propia

3.5. Análisis del porcentaje óptimo de cemento asfáltico a usar

Para la determinación del contenido óptimo del cemento asfáltico se procede a realizar el diseño de 18 briquetas mediante el método Marshall, con porcentajes con porcentajes diferentes de cemento asfáltico para conocer el porcentaje óptimo a utilizar.

Determinación de la cantidad aproximada de asfalto.

$$\%A = 0.035 * a + 0.045 * b + K * c + F$$

Donde:

$\%A$ = % de asfalto en la mezcla

a = % Retenido tamiz N° 8

b = % Pasante tamiz N° 8

c = % de agregado que pasa la malla N° 200

$K = 0.15$, si él % que retiene el tamiz 3/4" esta entre 11 % y 15 %, 0.18, si el % que retiene está entre 6 % y 10 %, 0.20, si él % que retiene es el 5 % o menos.

F = de 0 a 2 % que varía según la absorción del material (se puede asumir 0.7)

Proceso de cálculo:

$$\%A = 0.035 * 60.66 + 0.045 * 39.34 + 0.2 * 3.94 + 0.7$$

$$\%A = 5.38$$

Los porcentajes para los que se trabajarán en las siguientes briquetas son los siguientes: 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, es decir realizaremos 3 briquetas de cada punto, y le agregáremos dicho porcentaje en peso de la muestra total, que comúnmente las pastillas se proporcionan 1200 gr. de material pétreo.

3.5.1. Dosificación con los diferentes contenidos de asfalto en la mezcla

Si deseamos calcular el peso de agregado de la dosificación que debemos proporcionar en la pastilla, que tenga 4.0 % de cemento asfáltico necesitamos tener los siguientes datos:

Tabla 3.27. Datos para realizar la dosificación con los diferentes porcentajes de cemento asfáltico

| | |
|------------------------------------|-------------|
| Peso total de briqueta (gr) | 1200 |
| Ponderación de grava (%) | 32 |
| Ponderación de gravilla (%) | 23 |
| Ponderación de arena (%) | 42 |
| Ponderación de filler (%) | 3 |
| Total agregado (%) | 100 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.28. Dosificación Marshall con diferentes porcentajes de cemento asfáltico

| Dosificación Marshall | | | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Porcentaje de cemento asfáltico (%) | 4.0% | 4.5% | 5.0% | 5.5% | 6.0% | 6.5% | 7.0% |
| Porcentaje de agregado (%) | 96.0% | 95.5% | 95.0% | 94.5% | 94.0% | 93.5% | 93.0% |
| Peso de cemento asfáltico (gr) | 48.00 | 54.00 | 60.00 | 66.00 | 72.00 | 78.00 | 84.00 |
| Peso de grava (gr) | 368.64 | 366.72 | 364.80 | 362.88 | 360.96 | 359.04 | 357.12 |
| Peso de gravilla (gr) | 264.96 | 263.58 | 262.20 | 260.82 | 259.44 | 258.06 | 256.68 |
| Peso de arena (gr) | 483.84 | 481.32 | 478.80 | 476.28 | 473.76 | 471.24 | 468.72 |
| Peso de filler (suelo) (gr) | 34.56 | 34.38 | 34.20 | 34.02 | 33.84 | 33.66 | 33.48 |
| Peso total de la briqueta (gr) | 1200.0 |

Fuente: Elaboración propia

3.6. Determinación de las cantidades de agregados, cemento asfáltico y polímeros para la mezcla en investigación.

En el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando son sometidas a niveles elevados de tránsito y de gradientes de temperatura.

La idea de adicionar polímeros en el presente proyecto, es el de comprobar si las mezclas asfálticas, van a mejorar sus propiedades mecánicas, con la inclusión de polímeros en su composición.

Los porcentajes definidos de los polímeros que se van a adicionar a la mezcla, fueron definidos de acuerdo a distintas investigaciones que se realizaron a los mismos, por lo que en el presente proyecto vamos a hacer variar el porcentaje del polímero de 4 a 8 % en los siguientes puntos 4 %, 5 %, 6 %, 7 %, 8 %, las cuales irán incluidas al cemento asfáltico, realizando una mezcla con dióxido de silicio y otra mezcla con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD).

3.6.1. Preparación de las muestras de mezcla

Equipo y materiales utilizado:

Martillo de compactación

Moldes para la preparación de probetas

Extractor de probetas

Bandejas metálicas

Cuchara para la mezcla

Cuchara para extraer los agregados

Papel filtro

Brocha

Placa de calentamiento

Termómetro

Espátula

Balanza con sensibilidad de 0.1 gr.

Guantes

Barbijo

Trapos

Medidor de la estabilidad

Mezcla de agregados

3.6.2. Procedimiento del ensayo

La preparación de las muestras se realizó en el “Laboratorio de Asfaltos” de la **Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”**, donde se realizaron 7 puntos de contenidos de cemento asfáltico para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico en la mezcla.

Antes de preparar la mezcla. El conjunto del molde y la base de compactación se limpian y calientan a una temperatura entre 100 y 150°C. Por un lado, se pesan en bandeja separadas las diferentes fracciones de áridos calculando para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada en la placa de calentamiento para calentar su contenido a una temperatura de 130 a 140°C. Por otro lado, se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 140°C.

Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamiento local.

Figura 3.21. Pesando la cantidad de los agregados para la mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22. Calentamiento del agregado y cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla, se coloca la bandeja sobre la balanza y se vierte sobre los agregados el cemento asfáltico caliente, hasta completar el peso total de agregados más cemento asfáltico calculando para un porcentaje de la mezcla total.

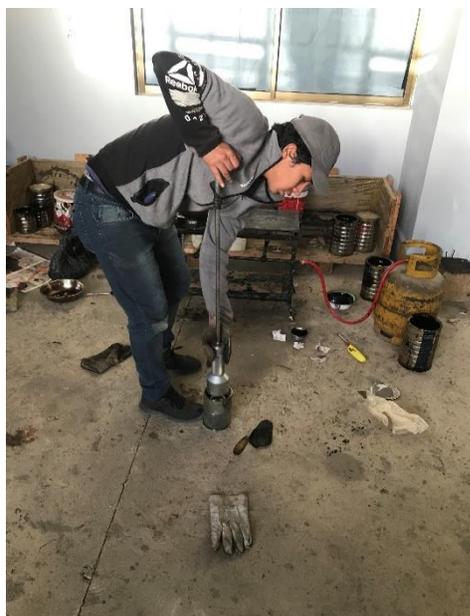
Figura 3.23. Agregado más cemento asfáltico para realizar la mezcla



Fuente: Elaboración propia

Se mezcla el cemento asfáltico con los agregados, hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 130°C ni en ningún caso someterse a recalentamiento.

Figura 3.24. Compactación de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 4" de diámetro y 3" de altura. La compactación se hace usando un anillo especial compuesto de: un disco circular de 3 7/8" de diámetro que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco, el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18". Para el diseño de una mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta en la compactación, proyectada para vías de tráfico pesado y se fabricaron 21 briquetas. El molde, conteniendo la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente durante una noche y luego se extrajo la briqueta mediante un extractor hidráulico.

Figura 3.25. Extractor hidráulico



Fuente: Elaboración propia

3.6.2.1. Procedimiento para la adición del policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio a la mezcla asfáltica en caliente.

Para la elaboración de las briquetas con los polímeros dióxido de silicio y policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) fueron introducidos al cemento asfáltico en distintos porcentajes en peso con referencia al peso del porcentaje de cemento asfáltico.

3.6.2.2. Preparación de los polímeros para su adición a la mezcla asfáltica

Los trozos de CD usados fueron triturados en la empresa Capital Industrial ubicada en la carretera a Bermejo Km 8 zona El Portillo, la cual consta de las maquinarias necesarias (molinos de plásticos) para la trituración diminuta de cualquier tipo de plásticos.

Figura 3.26. Empresa Capital Industrial (Formas Plásticas)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.27. Molinos de plásticos para trituración



Fuente: Elaboración propia

El tamaño de las partículas del policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) en el molino de plástico que se encuentra en dicha empresa nos dio un tamaño máximo de partículas de 1.5 mm. Para luego ser añadidas a la mezcla asfáltica.

Figura 3.28. Residuos de CD triturados



Fuente: Elaboración propia

Mientras que el dióxido de silicio fue facilitado por la empresa DIEMAR, con una granulometría que pasa el tamiz N° 200 (0.075mm) y fue adicionado directamente al cemento asfáltico.

Figura 3.29. Dióxido de silicio en polvo



Fuente: Elaboración propia

3.6.2.3. Proceso para la adición de los polímeros a las mezclas asfálticas.

El policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y el dióxido de silicio pueden ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados como proceso por vía húmeda, proceso por vía seca. En el proceso húmedo, los polímeros actúan modificando el cemento asfáltico, mientras que, en el proceso seco, los polímeros son mezclados con los agregados granulares.

En esta investigación se utilizará el proceso por vía húmeda para su adición de los dos polímeros en la mezcla asfáltica para luego ser estudiada en sus propiedades mecánicas. Una vez elaboradas las briquetas con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio añadidos a la mezcla asfáltica en caliente se procedió a su identificación individual para su posterior estudio.

Figura 3.30. Asignando una identificación a las muestras



Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Ensayo Marshall

Una vez extraído las briquetas de los moldes se proceden a realizar el ensayo de flujo y estabilidad en la prensa.

Primero se debe medir con un vernier las alturas en cuatro puntos de la briqueleta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección.

Antes de realizar el ensayo las muestras deben ser sumergidas en baño María de agua a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas, la temperatura de las mismas se debe mantener entre 21°C y 38°C . si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior deslice facilmente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que es indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto (2" /minuto) hasta que se produzca la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60°C se anota como valor estabilidad Marshall.

Mientras se realiza el ensayo de estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (flujo) en posición sobre la varilla de guía y se lo quita cuando se obtiene la carga máxima; se lee y anota esta lectura como valor de flujo de la briqueta, expresado en centésimas de pulgada.

Figura 3.31. Muestra sometida a baño María



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.32. Ensayo Marshall, estabilidad y fluencia



Fuente: Elaboración propia

3.7. Proceso de cálculo de propiedades mecánicas en mezclas asfálticas convencional y modificadas con dióxido de silicio y policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

Para un mejor entendimiento se desarrollará el ensayo de una briqueta convencional y modificadas paso a paso, al concluir se adjuntará la tabla de resumen.

3.7.1. Briquetas

Para la identificación de las briquetas se les asignó un número, dependiendo el porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla.

Tabla 3.29. Identificación de briquetas

| | | |
|--|--------------|---|
| Porcentaje de cemento asfáltico | 4.0 % | 1 |
| | | 2 |
| | | 3 |

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Altura de las briquetas

Se miden las alturas de las briquetas después de haber procedido la compactación con el martillo de las cuales para el porcentaje de asfalto de 4.0 % sus alturas correspondientes son las siguientes.

Tabla 3.30. Altura media de cada briqueta

| Identificación | Altura (cm) |
|-----------------------|--------------------|
| 1 | 6.12 |
| 2 | 6.05 |
| 3 | 6.13 |

Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Base de mezcla y agregado

Para la base de mezcla se toma el porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas en este cálculo el porcentaje de asfalto es de 4.0 %.

Mientras que para la base de agregado se realiza el siguiente procedimiento de cálculo.

$$\text{Base del agregado} = \frac{\text{Base del agregado} * 100}{100 - \text{Base de la mezcla}}$$

$$\text{Base del agregado} = \frac{4.0 * 100}{100 - 4.0}$$

$$\text{Base del agregado} = 4.17$$

3.7.4. Peso seco de briqueta

El peso de la briqueta en el aire consiste en medir su peso después de sacarlo del molde.

Tabla 3.31. Peso seco de las briquetas

| Identificación | Peso seco de la briqueta (gr) |
|-----------------------|--|
| 1 | 1167.8 |
| 2 | 1162.4 |
| 3 | 1158.3 |

Fuente: Elaboración propia

3.7.5. Peso de briqueta en el aire saturado y superficialmente seco (s.s.s.)

El peso de la briqueta saturado superficialmente seco consiste en medir su peso una vez secada la briqueta después de estar sumergida en agua por un lapso de 30 minutos a 25 °C.

Tabla 3.32. Peso de briqueta superficialmente seca

| Identificación | Peso s.s.s. de la briqueta (gr) |
|-----------------------|--|
| 1 | 1171.2 |
| 2 | 1165.8 |
| 3 | 1164.2 |

Fuente: Elaboración propia

3.7.6. Peso de briqueta sumergida en agua

El peso de la briqueta sumergida en agua consiste en medir su peso una vez sumergida en agua a 25°C.

Tabla 3.33. Peso de briqueta sumergida en agua

| Identificación | Peso sumergida en agua de la briqueta (gr) |
|----------------|--|
| 1 | 681 |
| 2 | 677 |
| 3 | 671 |

Fuente: Elaboración propia

3.7.7. Volumen de la briqueta

Para este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

$$\text{Vol. briqueta} = \text{Peso s. s. s.} - \text{Peso sumergido}$$

$$\text{Vol. briqueta} = 1171.2 - 681$$

$$\text{Vol. briqueta} = 490.2 \text{ cm}^3$$

3.7.8. Densidad de la briqueta

Para este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

Densidad real

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso briqueta en aire}}{\text{Volumen de briqueta}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1167.8}{490.2}$$

$$\text{Densidad real} = 2.38 \text{ gr/cm}^3$$

Densidad máxima teórica de la briqueta

$$\text{Densidad maxima teórica} = \frac{100}{\left(\frac{\% \text{asfalto}}{\text{Peso espe. asfalto}}\right) + \left(\frac{100 - \% \text{asfalto}}{\text{Peso espe. agregado grueso}}\right)}$$

$$\text{Densidad maxima teórica} = \frac{100}{\left(\frac{4.0}{1.018}\right) + \left(\frac{100 - 4.0}{2.69}\right)}$$

$$\text{Densidad maxima teórica} = 2.53 \text{ gr/cm}^3$$

3.7.9. Porcentaje de vacíos

Para este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv)

$$Vv = \left(\frac{D_{\text{maxT}} - \text{Dens. promedio}}{D_{\text{maxT}}}\right) * 100$$

$$Vv = \left(\frac{2.53 - 2.37}{2.53}\right) * 100$$

$$Vv = 6.24 \%$$

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (V.A.M)

$$VAM = \left(\frac{\% \text{ de asfl.} * \text{Dens. promedio}}{\text{Peso específico del asfalto}}\right) + Vv$$

$$VAM = \left(\frac{4.0 * 2.37}{1.018}\right) + 6.24$$

$$VAM = 15.55 \%$$

Porcentajes de vacíos llenos de asfalto (R.B.V.)

$$RBV = \left(\frac{VAM - Vv}{VAM}\right) * 100$$

$$RBV = \left(\frac{15.55 - 6.24}{15.55} \right) * 100$$

$$RBV = 59.86 \%$$

3.7.10. Estabilidad y fluencia

La estabilidad y fluencia son propiedades que se obtienen a partir de la prensa Marshall.

Tabla 3.34. Estabilidad y fluencia

| Identificación | Lectura ideal | |
|----------------|---------------|----------|
| | Estabilidad | Fluencia |
| 1 | 950 | 14 |
| 2 | 970 | 13 |
| 3 | 950 | 12 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.35. Estabilidad real

| Identificación | Lectura (lb) | |
|----------------|--------------|---------|
| | Estabilidad | Real |
| 1 | 950 | 2539.94 |
| 2 | 970 | 2593.79 |
| 3 | 950 | 2539.94 |

Fuente: Elaboración propia

Se procede a realizar la corrección por la altura de la briqueta con la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilidad corregida} = \text{Estabilidad} * \text{Factor de corrección de Altura}$$

Donde:

Factor de corrección de Altura = Es el factor de corrección de acuerdo a la altura de la briqueta según el método Marshall cuando la altura es diferente de 63.43 cm.

Tabla 3.36. Altura promedio y factor de corrección por altura

| Identificación | Promedio de altura (cm) | Factor de corrección por altura | Promedio del factor de corrección |
|-----------------------|--------------------------------|--|--|
| 1 | 6.12 | 1.065 | 1.071 |
| 2 | 6.05 | 1.087 | |
| 3 | 6.13 | 1.062 | |

Fuente: Manual de la ABC vol. 4 tabla A0608_1Factor de Corrección por altura para estabilidad Marshall (Normativa AASHTO)

Tabla 3.37. Estabilidad corregida

| Identificación | Estabilidad real (lb) | Factor de corrección | Estabilidad corregida | Estabilidad promedio (lb) |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 2539.94 | 1.065 | 2705.04 | 2740.64 |
| 2 | 2593.79 | 1.087 | 2819.45 | |
| 3 | 2539.94 | 1.062 | 2697.42 | |

Fuente: Elaboración propia

Para la lectura de la fluencia medida en la prensa Marshall:

Tabla 3.38. Fluencia en la prensa Marshall

| Identificación | Lectura dial fluencia (plg) | Promedio |
|-----------------------|------------------------------------|-----------------|
| 1 | 14.00 | 13.00 |
| 2 | 13.00 | |
| 3 | 12.00 | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.39. Resultados de la estabilidad y fluencia

| Identificación | Estabilidad | | Especificación (lb) | Fluencia | | Especificación (plg) |
|----------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|----------------|----------------------|
| | Real corregida (lb) | Promedio (lb) | | Lectura (plg) | Promedio (plg) | |
| 1 | 2705.04 | 2740.64 | >1800 | 14.00 | 13.00 | 8 a 16 |
| 2 | 2819.45 | | | 13.00 | | |
| 3 | 2697.42 | | | 12.00 | | |

Fuente: Elaboración propia

3.7.11. Resultados diseño contenido de asfalto óptimo para la mezcla

A continuación, se muestra las planillas de resultados.

Tabla 3.40. Resultados del diseño de contenido óptimo de asfalto

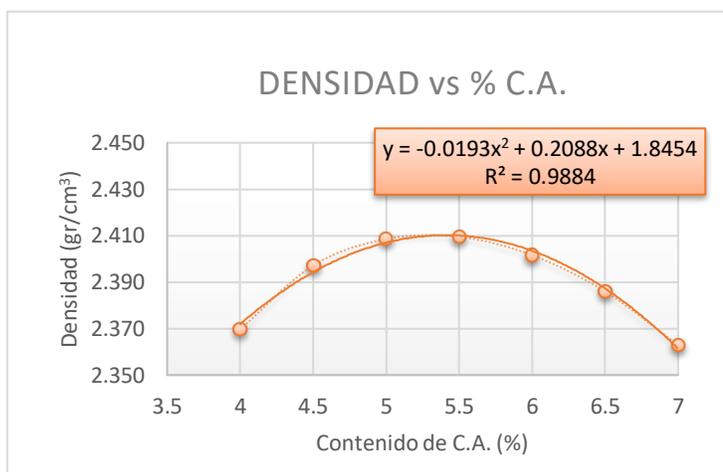
| N° de probeta | Altura de probeta | % de Asfalto | Densidad Briqueta | % de Vacíos | | | Estabilidad Marshall | Fluencia |
|---------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------|
| | | base Mezcla | Densidad promedio | % de vacíos mezcla total | V.A.M. (vacíos agregado mineral) | R.B. V. (relacion betumen) | Estabilidad promedio | Fluencia promedio |
| | | % | gr/cm ³ | % | % | % | libras | 0,01 pulg |
| 1 | 6.12 | 4.00 | 2.37 | 6.24 | 15.55 | 59.86 | 2740.635 | 13.000 |
| 2 | 6.05 | | | | | | | |
| 3 | 6.13 | | | | | | | |
| 4 | 6.15 | 4.50 | 2.40 | 4.42 | 15.02 | 70.56 | 3257.945 | 14.000 |
| 5 | 6.10 | | | | | | | |
| 6 | 6.05 | | | | | | | |
| 7 | 6.18 | 5.00 | 2.41 | 3.23 | 15.06 | 78.55 | 3423.941 | 15.000 |
| 8 | 6.16 | | | | | | | |
| 9 | 6.13 | | | | | | | |
| 10 | 6.14 | 5.50 | 2.41 | 2.46 | 15.48 | 84.12 | 3287.552 | 16.333 |
| 11 | 6.05 | | | | | | | |
| 12 | 6.22 | | | | | | | |
| 13 | 6.10 | 6.00 | 2.40 | 2.04 | 16.20 | 87.38 | 2923.708 | 18.333 |
| 14 | 6.13 | | | | | | | |
| 15 | 6.17 | | | | | | | |
| 16 | 6.15 | 6.50 | 2.39 | 1.95 | 17.19 | 88.64 | 2478.782 | 20.333 |
| 17 | 6.14 | | | | | | | |
| 18 | 6.13 | | | | | | | |
| 19 | 6.15 | 7.00 | 2.36 | 2.18 | 18.42 | 88.19 | 1834.48 | 22.667 |
| 20 | 6.13 | | | | | | | |
| 21 | 6.11 | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia

Obtenido todos los valores se procedió a dibujar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones.

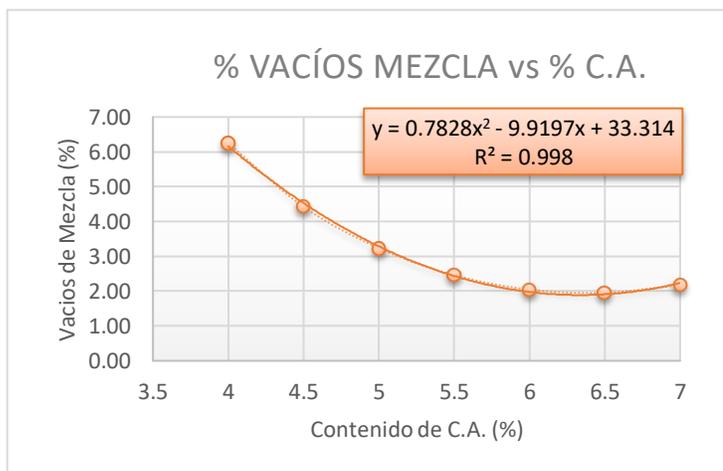
- Densidad de la briqueta vs porcentaje de cemento asfáltico
- Porcentaje de vacíos de la mezcla vs porcentaje de cemento asfáltico
- Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs porcentaje de cemento asfáltico
- Porcentajes de vacíos llenos de asfalto (R.B.V.) vs porcentaje de cemento asfáltico
- Estabilidad vs porcentaje de cemento asfáltico
- Fluencia vs porcentaje de cemento asfáltico

Gráfico 3.5. Densidad vs % de cemento asfáltico



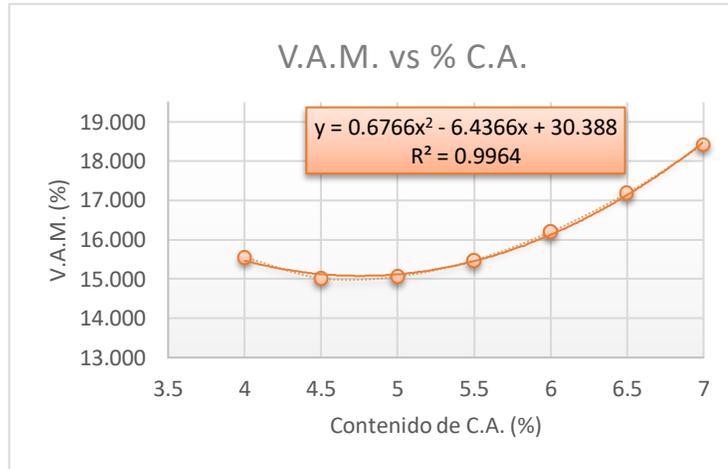
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.6. % de vacíos de la mezcla vs % de cemento asfáltico



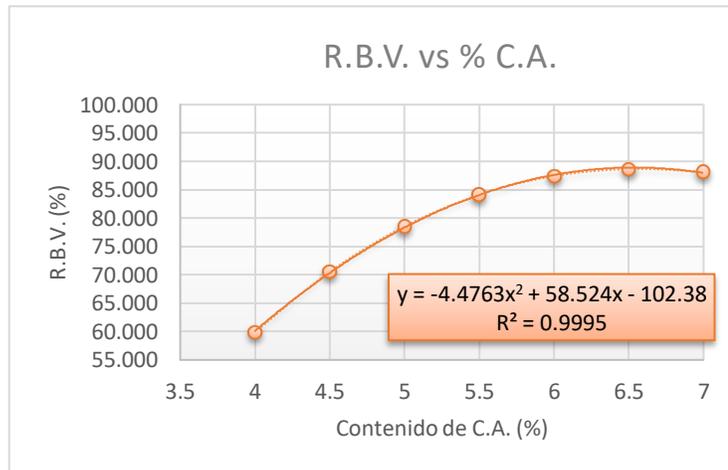
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.7. Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs % de cemento asfáltico



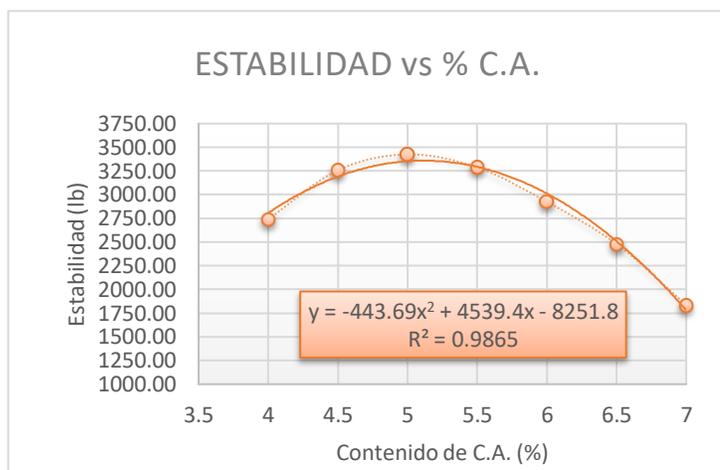
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.8. % de vacíos llenos de asfalto (R.B.V) vs % de cemento asfáltico



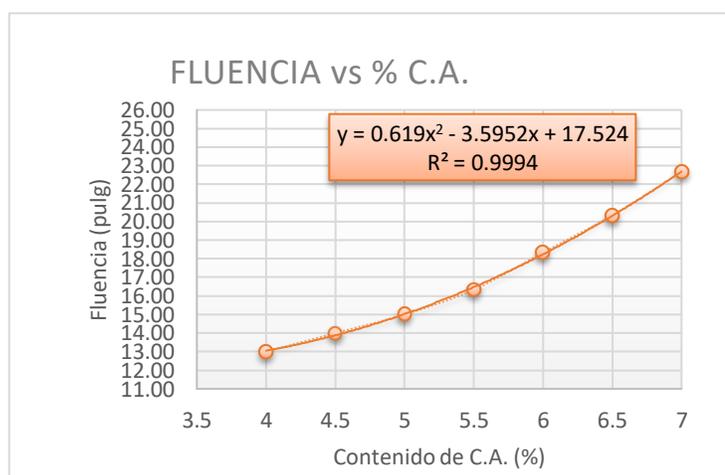
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.9. Estabilidad vs % de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.10. Fluencia vs % de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 3.41. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica

| Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico | Ensayo | Valor de diseño | % C.A. |
|--|---------------------------------------|------------------|-------------|
| | Estabilidad Marshall (lb) | 3358.861 | 5.12 |
| | Densidad máxima (gr/cm ³) | 2.41 | 5.41 |
| | Vacíos de la mezcla (%) | 4.00 | 4.69 |
| | % óptimo de C.A.: | Promedio= | 5.07 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.42. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica

| Valores obtenidos diseño Marshall | | | | |
|--|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------|
| Características | % De asfalto | Valores con % óptimo | Especificaciones técnicas | |
| Densidad | 5.07 | 2.41 | ----- | ----- |
| % Vacíos | 5.07 | 3.15 | 3.00 | 5.00 |
| R.B.V. | 5.07 | 79.27 | 75.00 | 82.00 |
| V.A.M. | 5.07 | 15.15 | 13.00 | ----- |
| Estabilidad (lb) | 5.07 | 3357.95 | >1800 lb. (75 golpes) | |
| Fluencia | 5.07 | 15.21 | 8.00 | 16.00 |
| % óptimo de cemento asfáltico | | | 5.07 | |

Fuente: Elaboración propia

Los valores para el agregado de la planta de San José de Charajas (SEDECA); da cumplimiento con las especificaciones técnicas para diseño Marshall.

3.8. Dosificación con los diferentes porcentajes de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio

Se realizó la dosificación correspondiente para la mezcla asfáltica en caliente con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio.

Tabla 3.43. Dosificación para cada porcentaje de polímero en la mezcla asfáltica en caliente

| | | | | | |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Peso cemento asfáltico (gr) | 58.41 | 57.80 | 56.75 | 56.58 | 55.97 |
| Porcentaje de polímero (%) | 4.0% | 5.0% | 6.0% | 7.0% | 8.0% |
| Porcentaje de agregado (%) | 94.93% | 94.93% | 94.93% | 94.93% | 94.93% |
| Polímero (gr) | 2.43 | 3.04 | 3.65 | 4.26 | 4.87 |
| Peso de grava (gr) | 364.53 | 364.53 | 364.53 | 364.53 | 364.53 |
| Peso de gravilla (gr) | 262.01 | 262.01 | 262.01 | 262.01 | 262.01 |
| Peso de arena (gr) | 478.45 | 478.45 | 478.45 | 478.45 | 478.45 |
| Peso de filler (suelo) (gr) | 34.17 | 34.17 | 34.17 | 34.17 | 34.17 |
| Peso total de la briqueta (gr) | 1200.00 | 1200.00 | 1200.00 | 1200.00 | 1200.00 |

Fuente: Elaboración propia

Altura de las briquetas

Tabla 3.44. Datos y resultados de alturas promedio de las briquetas con dióxido de silicio

| % Polímero | Identificación | h1 (cm) | h2 (cm) | h3 (cm) | h4 (cm) | Promedio (cm) |
|-------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| 4 % | 1 | 6.35 | 6.4 | 6.45 | 6.3 | 6.38 |
| | 2 | 6.35 | 6.4 | 6.5 | 6.35 | 6.40 |
| | 3 | 6.41 | 6.43 | 6.45 | 6.4 | 6.42 |
| | 4 | 6.4 | 6.42 | 6.4 | 6.39 | 6.40 |
| | 5 | 6.45 | 6.4 | 6.4 | 6.45 | 6.43 |
| 5 % | 6 | 6.5 | 6.45 | 6.6 | 6.55 | 6.53 |
| | 7 | 6.45 | 6.4 | 6.5 | 6.55 | 6.48 |
| | 8 | 6.45 | 6.51 | 6.48 | 6.45 | 6.47 |
| | 9 | 6.45 | 6.4 | 6.45 | 6.45 | 6.45 |
| | 10 | 6.3 | 6.4 | 6.55 | 6.5 | 6.44 |
| 6 % | 11 | 6.35 | 6.3 | 6.4 | 6.45 | 6.38 |
| | 12 | 6.45 | 6.39 | 6.5 | 6.35 | 6.42 |
| | 13 | 6.35 | 6.45 | 6.4 | 6.5 | 6.43 |
| | 14 | 6.35 | 6.4 | 6.5 | 6.4 | 6.41 |
| | 15 | 6.45 | 6.5 | 6.4 | 6.35 | 6.43 |
| 7 % | 16 | 6.5 | 6.45 | 6.35 | 6.4 | 6.43 |
| | 17 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.40 |
| | 18 | 6.4 | 6.3 | 6.5 | 6.4 | 6.40 |
| | 19 | 6.4 | 6.3 | 6.45 | 6.5 | 6.41 |
| | 20 | 6.35 | 6.45 | 6.4 | 6.45 | 6.41 |
| 8 % | 21 | 6.55 | 6.4 | 6.4 | 6.5 | 6.46 |
| | 22 | 6.45 | 6.4 | 6.45 | 6.45 | 6.44 |
| | 23 | 6.4 | 6.45 | 6.42 | 6.45 | 6.43 |
| | 24 | 6.45 | 6.4 | 6.5 | 6.45 | 6.45 |
| | 25 | 6.3 | 6.25 | 6.4 | 6.5 | 6.36 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.45. Datos y resultados de alturas promedio de las briquetas con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

| % Polímero | Identificación | h1 (cm) | h2 (cm) | h3 (cm) | h4 (cm) | Promedio (cm) |
|-------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| 4 % | 1 | 6.2 | 6.3 | 6.45 | 6.2 | 6.29 |
| | 2 | 6.3 | 6.35 | 6.3 | 6.35 | 6.32 |
| | 3 | 6.4 | 6.3 | 6.4 | 6.3 | 6.35 |
| | 4 | 6.35 | 6.3 | 6.3 | 6.4 | 6.34 |
| | 5 | 6.3 | 6.35 | 6.55 | 6.25 | 6.36 |
| 5 % | 6 | 6.1 | 6.25 | 6.55 | 6.25 | 6.29 |
| | 7 | 6.3 | 6.25 | 6.4 | 6.3 | 6.31 |
| | 8 | 6.35 | 6.4 | 6.25 | 6.26 | 6.32 |
| | 9 | 6.4 | 6.4 | 6.25 | 6.3 | 6.34 |
| | 10 | 6.4 | 6.3 | 6.4 | 6.35 | 6.36 |
| 6 % | 11 | 6.35 | 6.3 | 6.35 | 6.3 | 6.33 |
| | 12 | 6.3 | 6.25 | 6.35 | 6.25 | 6.29 |
| | 13 | 6.3 | 6.25 | 6.35 | 6.35 | 6.31 |
| | 14 | 6.25 | 6.25 | 6.2 | 6.3 | 6.25 |
| | 15 | 6.25 | 6.35 | 6.2 | 6.1 | 6.23 |
| 7 % | 16 | 6.2 | 6.3 | 6.35 | 6.25 | 6.28 |
| | 17 | 6.35 | 6.3 | 6.4 | 6.35 | 6.35 |
| | 18 | 6.3 | 6.4 | 6.35 | 6.35 | 6.35 |
| | 19 | 6.4 | 6.3 | 6.4 | 6.4 | 6.38 |
| | 20 | 6.35 | 6.35 | 6.55 | 6.4 | 6.41 |
| 8 % | 21 | 6.25 | 6.3 | 6.4 | 6.3 | 6.31 |
| | 22 | 6.35 | 6.4 | 6.3 | 6.4 | 6.36 |
| | 23 | 6.35 | 6.3 | 6.35 | 6.35 | 6.34 |
| | 24 | 6.4 | 6.35 | 6.3 | 6.35 | 6.35 |
| | 25 | 6.5 | 6.35 | 6.25 | 6.55 | 6.41 |

Fuente: Elaboración propia

Densidad de la briqueta

Tabla 3.46. Datos y resultados de la densidad real y promedio de las briquetas con dióxido de silicio

| % Polímero | Identificación | Densidad briqueta | |
|------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| | | Real (gr/cm ³) | Promedio (gr/cm ³) |
| 4 % | 1 | 2.36 | 2.35 |
| | 2 | 2.36 | |
| | 3 | 2.36 | |
| | 4 | 2.35 | |
| | 5 | 2.34 | |
| 5 % | 6 | 2.35 | 2.38 |
| | 7 | 2.39 | |
| | 8 | 2.38 | |
| | 9 | 2.38 | |
| | 10 | 2.39 | |
| 6 % | 11 | 2.39 | 2.39 |
| | 12 | 2.38 | |
| | 13 | 2.38 | |
| | 14 | 2.39 | |
| | 15 | 2.38 | |
| 7 % | 16 | 2.37 | 2.36 |
| | 17 | 2.35 | |
| | 18 | 2.36 | |
| | 19 | 2.36 | |
| | 20 | 2.36 | |
| 8 % | 21 | 2.33 | 2.32 |
| | 22 | 2.32 | |
| | 23 | 2.32 | |
| | 24 | 2.33 | |
| | 25 | 2.32 | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.47. Datos y resultados de la densidad real y promedio de las briquetas con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

| % Polímero | Identificación | Densidad briqueeta | |
|------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| | | Real (gr/cm ³) | Promedio (gr/cm ³) |
| 4 % | 1 | 2.35 | 2.35 |
| | 2 | 2.36 | |
| | 3 | 2.36 | |
| | 4 | 2.35 | |
| | 5 | 2.35 | |
| 5 % | 6 | 2.38 | 2.37 |
| | 7 | 2.37 | |
| | 8 | 2.37 | |
| | 9 | 2.38 | |
| | 10 | 2.37 | |
| 6 % | 11 | 2.38 | 2.38 |
| | 12 | 2.39 | |
| | 13 | 2.39 | |
| | 14 | 2.38 | |
| | 15 | 2.38 | |
| 7 % | 16 | 2.37 | 2.37 |
| | 17 | 2.38 | |
| | 18 | 2.38 | |
| | 19 | 2.36 | |
| | 20 | 2.36 | |
| 8 % | 21 | 2.34 | 2.35 |
| | 22 | 2.36 | |
| | 23 | 2.35 | |
| | 24 | 2.34 | |
| | 25 | 2.34 | |

Fuente: Elaboración propia

3.8.1. Evaluación de la estabilidad

Se realizó 5 grupos de briquetas por cada porcentaje de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio, haciendo 5 briquetas para cada porcentaje de polímero, se las enumeró de la siguiente manera: 1, 2, 3,4 y 5 (4 %); 6, 7, 8, 9 y 10 (5 %); 11, 12, 13, 14 y 15 (6 %); 16, 17, 18, 19 y 20 (7 %); 21, 22, 23, 24 y 25 (8 %) todas las briquetas mencionadas anteriormente según su porcentaje de polímero añadidos a la mezcla asfáltica, haciendo un total de 50 briquetas para toda la investigación. Para las briquetas con los polímeros añadidos ya se trabajó con el porcentaje óptimo de 5.07 % de cemento asfáltico, para tener el resultado de estabilidad de dicho punto, en las tablas siguientes se muestran los resultados de estabilidad obtenidos mediante el equipo Marshall, para las briquetas con polímeros.

La lectura del dial que ofrece el aparato de Marshall del laboratorio de asfaltos de la **Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”** nos da las lecturas de los resultados de la estabilidad en unidades de milímetros (mm), por lo cual se las transformo a unidades de libras fuerza (lb).

Para hacer correr las lecturas de estabilidad y fluencia en el aparato Marshall, antes se dejó reposar las briquetas por 30 minutos en un baño María a una temperatura de 60°C.

Tabla 3.48. Datos y resultados de la estabilidad de las briquetas con dióxido de silicio

| Estabilidad Marshall | | | | | | | |
|----------------------|------------|-----------------------|------------|--|----------------------------|---------------------------|----------------|
| Identificación | % Polímero | Lectura del dial (mm) | Carga (lb) | Factor de corrección de altura de briqueta | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio (lb) | Especificación |
| 0 | 0 % | | | | 3357.95 | 3357.95 | >1800 lb. |
| 1 | 4 % | 855 | 2284.123 | 0.993 | 2266.992 | 2157.072 | >1800 lb. |
| 2 | | 750 | 2001.379 | 0.988 | 1976.362 | | |
| 3 | | 815 | 2176.411 | 0.983 | 2138.324 | | |
| 4 | | 825 | 2203.339 | 0.988 | 2175.797 | | |
| 5 | | 851 | 2273.352 | 0.980 | 2227.884 | | |
| 6 | 5 % | 1030 | 2755.363 | 0.956 | 2634.954 | 2551.407 | >1800 lb. |
| 7 | | 950 | 2539.939 | 0.968 | 2457.391 | | |
| 8 | | 952 | 2545.324 | 0.970 | 2468.965 | | |
| 9 | | 1010 | 2701.507 | 0.975 | 2633.969 | | |
| 10 | | 980 | 2620.723 | 0.978 | 2561.757 | | |
| 11 | 6 % | 1056 | 2825.376 | 0.993 | 2804.185 | 2785.505 | >1800 lb. |
| 12 | | 1145 | 3065.035 | 0.983 | 3011.397 | | |
| 13 | | 1086 | 2906.160 | 0.980 | 2848.036 | | |
| 14 | | 1033 | 2763.441 | 0.985 | 2721.990 | | |
| 15 | | 970 | 2593.795 | 0.980 | 2541.919 | | |
| 16 | 7 % | 1027 | 2747.284 | 0.980 | 2692.339 | 2638.665 | >1800 lb. |
| 17 | | 1020 | 2728.435 | 0.988 | 2694.329 | | |
| 18 | | 1005 | 2688.043 | 0.988 | 2654.442 | | |
| 19 | | 996 | 2663.808 | 0.985 | 2623.850 | | |
| 20 | | 960 | 2566.867 | 0.985 | 2528.364 | | |
| 21 | 8 % | 894 | 2389.142 | 0.973 | 2323.441 | 2216.909 | >1800 lb. |
| 22 | | 830 | 2216.803 | 0.978 | 2166.925 | | |
| 23 | | 855 | 2284.123 | 0.980 | 2238.440 | | |
| 24 | | 843 | 2251.81 | 0.975 | 2195.514 | | |
| 25 | | 811 | 2165.639 | 0.998 | 2160.225 | | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.49. Datos y resultados de la estabilidad de las briquetas con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

| Estabilidad Marshall | | | | | | | |
|----------------------|------------|-----------------------|------------|--|----------------------------|----------------------------|----------------|
| Identificación | % Polímero | Lectura del dial (mm) | Carga (lb) | Factor de corrección de altura de briqueta | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio (lb.) | Especificación |
| 0 | 0 % | | | | 3357.95 | 3357.95 | >1800 lb. |
| 1 | 4 % | 916 | 2448.384 | 1.016 | 2487.558 | 2553.686 | >1800 lb. |
| 2 | | 950 | 2539.939 | 1.008 | 2560.258 | | |
| 3 | | 945 | 2526.475 | 1.000 | 2526.475 | | |
| 4 | | 962 | 2572.252 | 1.003 | 2579.969 | | |
| 5 | | 980 | 2620.787 | 0.998 | 2614.171 | | |
| 6 | 5 % | 1135 | 3038.167 | 1.016 | 3086.716 | 3157.561 | >1800 lb. |
| 7 | | 1110 | 2970.787 | 1.011 | 3003.465 | | |
| 8 | | 1160 | 3105.427 | 1.008 | 3130.270 | | |
| 9 | | 1186 | 3175.440 | 1.003 | 3184.966 | | |
| 10 | | 1266 | 3390.864 | 0.998 | 3382.386 | | |
| 11 | 6 % | 1413 | 3786.705 | 1.005 | 3805.639 | 3531.883 | >1800 lb. |
| 12 | | 1297 | 3474.340 | 1.016 | 3529.929 | | |
| 13 | | 1312 | 3514.732 | 1.011 | 3553.394 | | |
| 14 | | 1276 | 3417.792 | 1.027 | 3510.072 | | |
| 15 | | 1180 | 3159.283 | 1.032 | 3260.379 | | |
| 16 | 7 % | 1230 | 3293.923 | 1.019 | 3356.507 | 3049.952 | >1800 lb. |
| 17 | | 1170 | 3132.355 | 1.000 | 3132.355 | | |
| 18 | | 1187 | 3178.132 | 1.000 | 3178.132 | | |
| 19 | | 1100 | 2943.859 | 0.993 | 2921.780 | | |
| 20 | | 1010 | 2701.507 | 0.985 | 2660.984 | | |
| 21 | 8 % | 830 | 2216.803 | 1.011 | 2241.188 | 2284.735 | >1800 lb. |
| 22 | | 845 | 2257.195 | 0.998 | 2251.552 | | |
| 23 | | 850 | 2270.659 | 1.003 | 2277.471 | | |
| 24 | | 858 | 2292.201 | 1.000 | 2292.201 | | |
| 25 | | 897 | 2397.220 | 0.985 | 2361.262 | | |

Fuente: Elaboración propia

3.8.2. Evaluación de la fluencia

Al igual que la estabilidad se hizo 5 grupos de briquetas por cada porcentaje de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio, haciendo 5 briquetas para cada porcentaje de polímero, se las enumeró de la siguiente manera: 1, 2, 3,4 y 5 (4 %); 6, 7, 8, 9 y 10 (5 %); 11, 12, 13, 14 y 15 (6 %); 16, 17, 18, 19 y 20 (7 %); 21, 22, 23, 24 y 25 (8 %) todas las briquetas mencionadas anteriormente según su porcentaje de polímero añadidos a la mezcla asfáltica. Para las briquetas con los polímeros añadidos ya se trabajó con el porcentaje óptimo de 5.07 % de cemento asfáltico, para tener el resultado de fluencia de dicho punto, en las tablas siguientes se muestran los resultados de fluencia obtenidos mediante el equipo Marshall, para las briquetas con polímeros.

Tabla 3.50. Datos y resultados de la fluencia de las briquetas con dióxido de silicio

| Identificación | % Polímero | Lectura del dial del flujo (plg) | Fluencia promedio (plg) | Especificación |
|-----------------------|-------------------|---|--------------------------------|-----------------------|
| 0 | 0 % | 15.21 | 15.21 | 8 a 16 |
| 1 | 4 % | 10 | 11.30 | 8 a 16 |
| 2 | | 12 | | |
| 3 | | 11 | | |
| 4 | | 11.5 | | |
| 5 | | 12 | | |
| 6 | 5 % | 11 | 12.00 | 8 a 16 |
| 7 | | 13 | | |
| 8 | | 11 | | |
| 9 | | 13 | | |
| 10 | 6 % | 12 | 12.60 | 8 a 16 |
| 11 | | 12 | | |
| 12 | | 13 | | |
| 13 | | 13 | | |
| 14 | | 12 | | |
| 15 | 7 % | 13 | 13.60 | 8 a 16 |
| 16 | | 14 | | |
| 17 | | 13 | | |
| 18 | | 15 | | |
| 19 | 8 % | 12 | 14.60 | 8 a 16 |
| 20 | | 14 | | |
| 21 | | 15 | | |
| 22 | | 15 | | |
| 23 | | 15 | | |
| 24 | 8 % | 14 | 14.60 | 8 a 16 |
| 25 | | 14 | | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.51. Datos y resultados de la fluencia de las briquetas con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

| Identificación | % Polímero | Lectura del dial del flujo (plg) | Fluencia promedio (plg) | Especificación |
|----------------|------------|----------------------------------|-------------------------|----------------|
| 0 | 0 % | 15.21 | 15.21 | 8 a 16 |
| 1 | 4 % | 10 | 11.40 | 8 a 16 |
| 2 | | 11 | | |
| 3 | | 12 | | |
| 4 | | 11 | | |
| 5 | | 13 | | |
| 6 | | 5 % | | |
| 7 | 11 | | | |
| 8 | 11 | | | |
| 9 | 13 | | | |
| 10 | 13 | | | |
| 11 | 6 % | 12 | 13.00 | 8 a 16 |
| 12 | | 13 | | |
| 13 | | 13 | | |
| 14 | | 13 | | |
| 15 | | 14 | | |
| 16 | 7 % | 14 | 14.40 | 8 a 16 |
| 17 | | 14 | | |
| 18 | | 15 | | |
| 19 | | 14 | | |
| 20 | | 15 | | |
| 21 | 8 % | 15 | 15.40 | 8 a 16 |
| 22 | | 16 | | |
| 23 | | 16 | | |
| 24 | | 15 | | |
| 25 | | 15 | | |

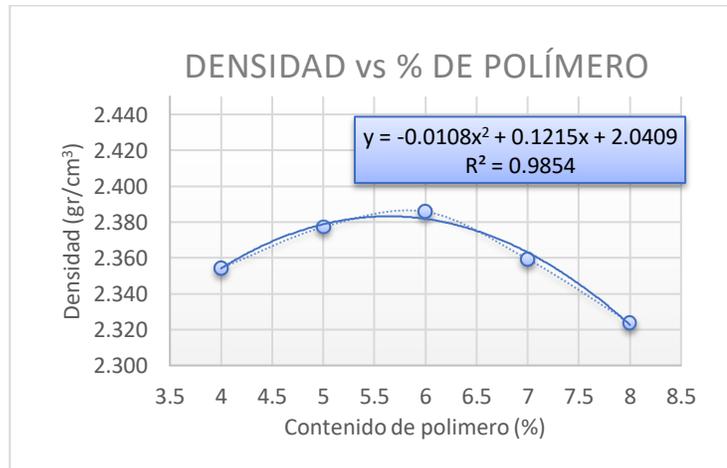
Fuente: Elaboración propia

3.9. Resumen de resultados Marshall para la mezcla asfáltica en caliente con dióxido de silicio y policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

Obtenido todos los valores se procedió a dibujar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones.

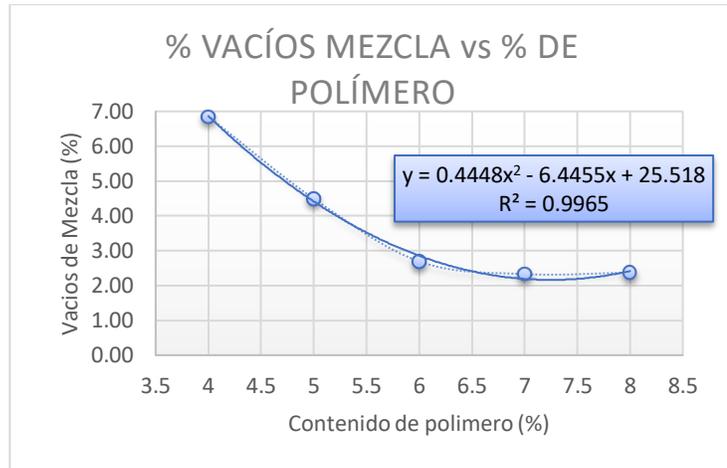
- Densidad de la briqueta vs porcentaje de polímero en la mezcla asfáltica
- Porcentaje de vacíos de la mezcla vs porcentaje de polímero en la mezcla asfáltica
- Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs porcentaje de polímero en la mezcla asfáltica
- Porcentajes de vacíos llenos de asfalto (R.B.V.) vs porcentaje de polímero en la mezcla asfáltica
- Estabilidad vs porcentaje de polímero en la mezcla asfáltica
- Fluencia vs porcentaje de polímero en la mezcla asfáltica

Gráfico 3.11. Densidad de la briqueta vs % de dióxido de silicio en la mezcla



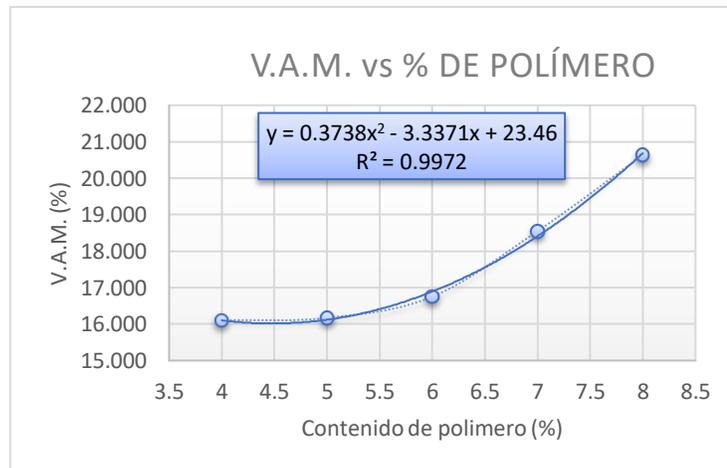
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.12. % De vacíos en la mezcla vs % de dióxido de silicio en la mezcla



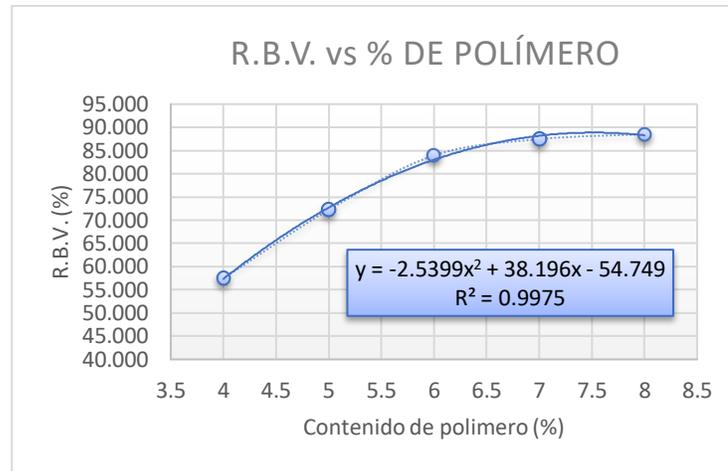
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.13. % Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs % de dióxido de silicio en la mezcla



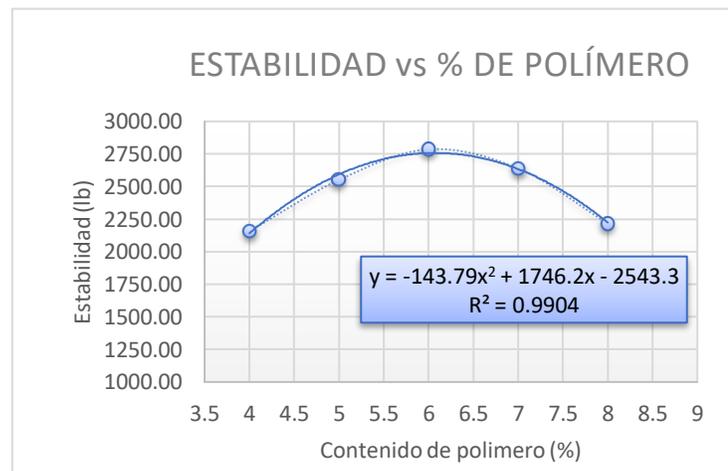
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.14. % De vacíos llenos de asfalto (R.B.V) vs % de dióxido de silicio en la mezcla



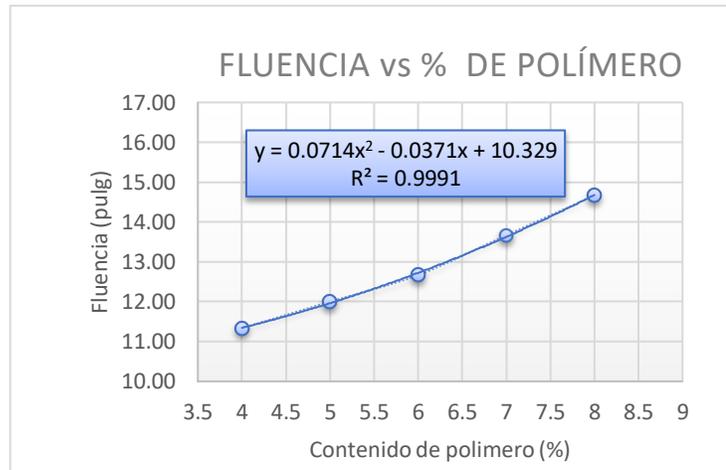
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.15. Estabilidad vs % de dióxido de silicio en la mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.16. Fluencia vs % de dióxido de silicio en la mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 3.52. Resultados del diseño Marshall con dióxido de silicio

| Determinación del porcentaje óptimo de polímero en la mezcla | Ensayo | Valor de diseño | % Polímero |
|--|---------------------------------------|------------------|-------------|
| | Estabilidad Marshall (lb) | 2758.32 | 6.07 |
| | Densidad máxima (gr/cm ³) | 2.38 | 5.63 |
| | Vacíos de la mezcla (%) | 4.00 | 5.22 |
| | % óptimo de polímero: | Promedio= | 5.64 |

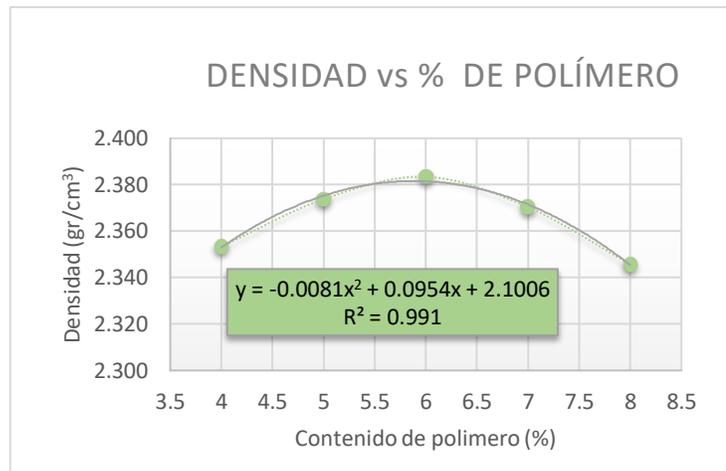
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.53. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica con dióxido de silicio

| Valores obtenidos diseño Marshall | | | | |
|-----------------------------------|---------------|----------------------|---------------------------------|--------------|
| Características | % De polímero | Valores con % optimo | Especificaciones técnicas | |
| Densidad | 5.64 | 2.38 | ----- | ----- |
| % Vacíos | 5.64 | 3.29 | 3.00 | 5.00 |
| R.B.V. | 5.64 | 79.88 | 75.00 | 82.00 |
| V.A.M. | 5.64 | 16.53 | 13.00 | ----- |
| Estabilidad (lb) | 5.64 | 2731.37 | >1800 lb. (75 golpes) | |
| Fluencia | 5.64 | 12.39 | 8.00 | 16.00 |
| % óptimo de polímero | | | 5.65 | |

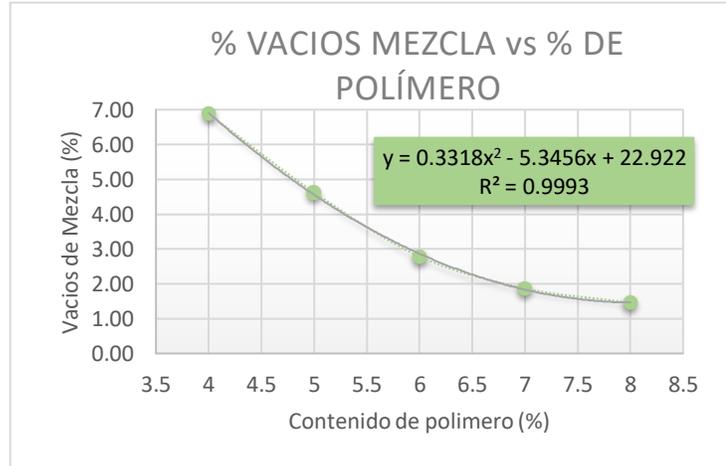
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.17. Densidad de la briqueta vs % de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) en la mezcla



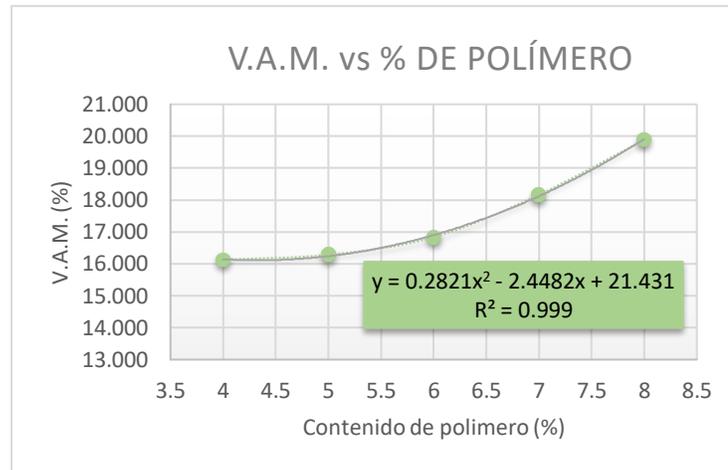
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.18. % De vacíos en la mezcla vs % de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) en la mezcla



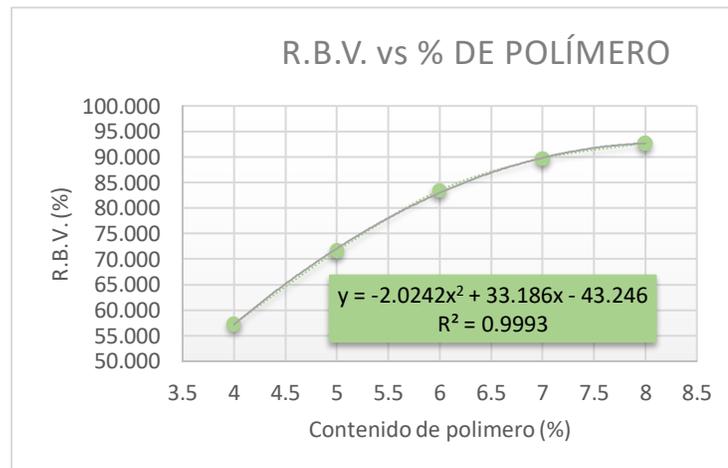
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.19. Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs % de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) en la mezcla



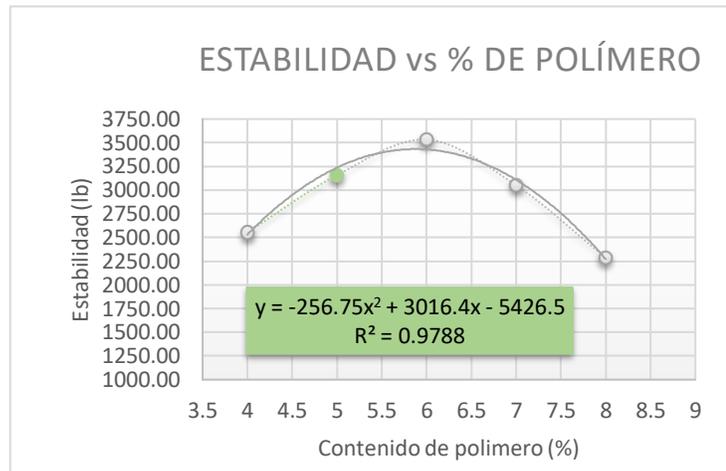
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.20. % De vacíos llenos de asfalto (R.B.V) vs % de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) en la mezcla



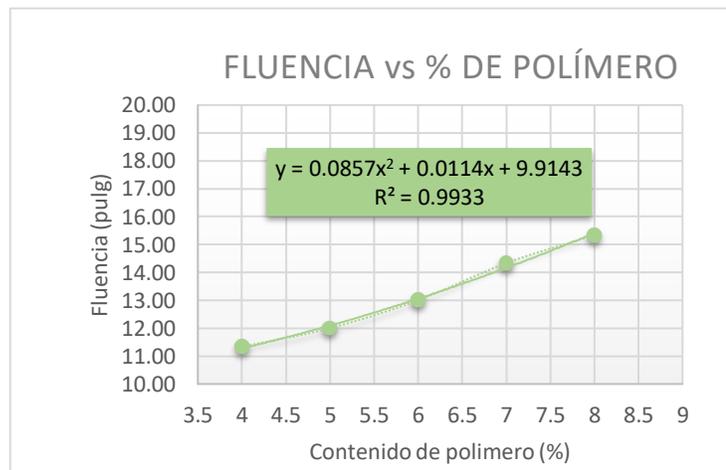
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.21. Estabilidad vs % de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) en la mezcla



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.22. Fluencia vs % de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) en la mezcla



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las gráficas se obtiene:

Tabla 3.54. Resultados del diseño Marshall con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

| Determinación del porcentaje óptimo de polímero en la mezcla | Ensayo | Valor de diseño | % Polímero |
|---|---------------------------------------|------------------------|-------------------|
| | Estabilidad Marshall (lb) | 3432.96 | 5.87 |
| | Densidad máxima (gr/cm ³) | 2.38 | 5.89 |
| | Vacíos de la mezcla (%) | 4.00 | 5.29 |
| | % óptimo de polímero: | Promedio= | 5.68 |

Fuente: Elaboración propia

3.55. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

| Valores obtenidos diseño Marshall | | | | |
|--|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------|
| Características | % De polímero | Valores con % óptimo | Especificaciones técnicas | |
| Densidad | 5.68 | 2.38 | ----- | ----- |
| % Vacíos | 5.68 | 3.33 | 3.00 | 5.00 |
| R.B.V. | 5.68 | 79.94 | 75.00 | 82.00 |
| V.A.M. | 5.68 | 16.63 | 13.00 | ----- |
| Estabilidad (lb) | 5.68 | 3423.28 | >1800 lb. (75 golpes) | |
| Fluencia | 5.68 | 12.74 | 8.00 | 16.00 |
| % óptimo de polímero: | | | 5.67 | |

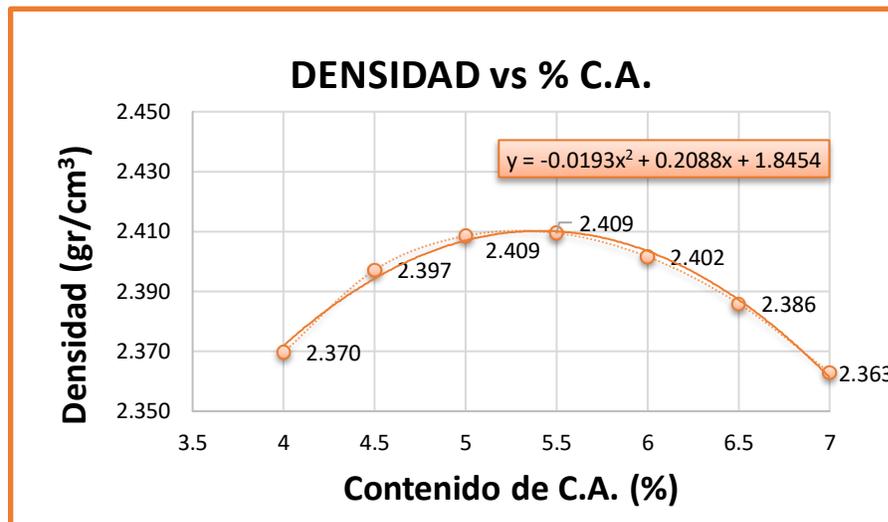
Fuente: Elaboración propia

3.10. Análisis de resultados

Los resultados del comportamiento de las propiedades mecánicas se presentan en las siguientes gráficas, una vez determinado los valores de (densidad, estabilidad y fluencia) correspondientes para cada contenido de cemento asfáltico, y para cada contenido de polímeros, para posteriormente poder realizar un análisis de los resultados de la mezcla asfáltica en caliente y las mezclas asfálticas en caliente con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio.

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los porcentajes de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica en caliente y los porcentajes de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio para las mezclas asfálticas con polímeros con los resultados de densidades de las briquetas.

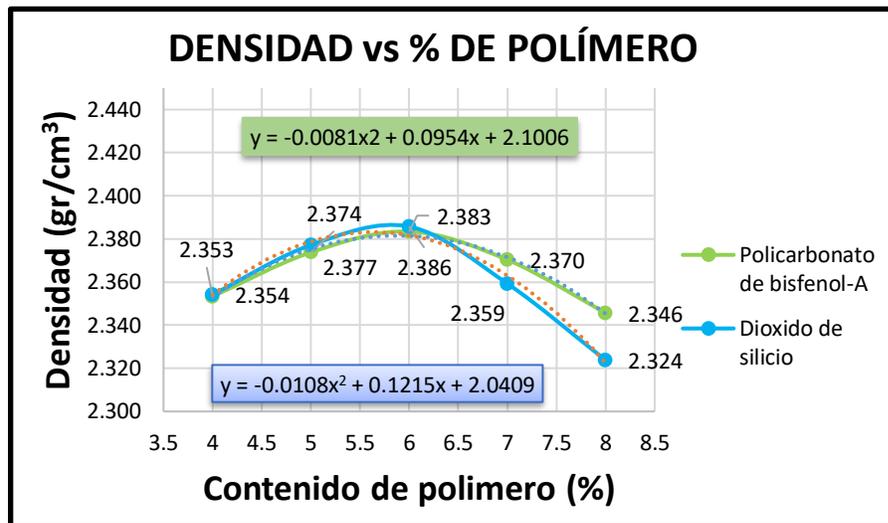
Gráfico 3.23. Análisis curva densidad vs % de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.20 se muestra la relación del contenido de cemento asfáltico en porcentaje con la densidad expresada en (gr/cm^3), para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa una única sección donde la densidad sube a medida que el % de cemento asfáltico aumenta, se puede notar que la densidad entre un porcentaje de 5 % y 5.5 % se mantiene y llega a su máxima densidad hasta llegar a su valor óptimo de porcentaje de cemento asfáltico, donde al aumentar el porcentaje de cemento asfáltico vuelve a decrecer suavemente la densidad. Se ha hecho la investigación para valores de contenidos de cemento asfáltico entre 4.00 % y 7.00 %, donde se tiene una variación del peso volumétrico de 2.370 a 2.363, con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación es: $y = -0.0193x^2 + 0.2088x + 1.8454$.

Gráfico 3.24. Análisis curva densidad vs % de polímeros



Fuente: Elaboración propia

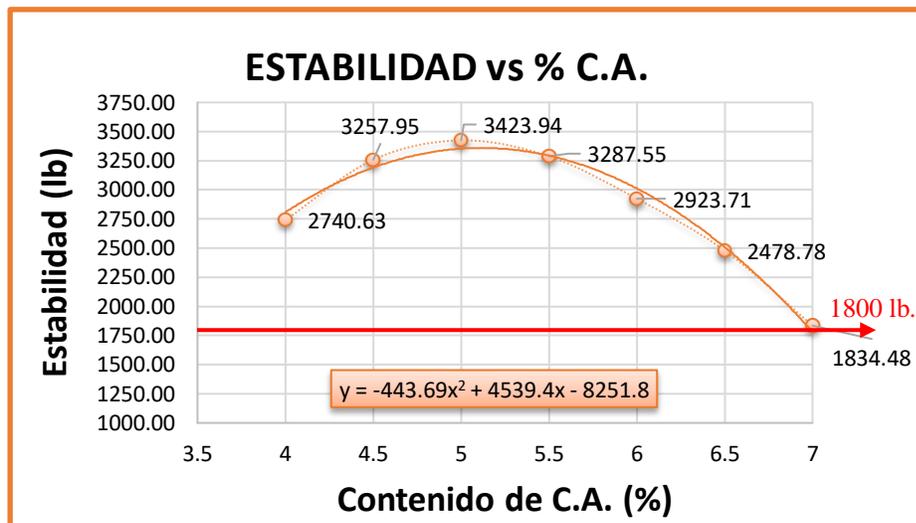
En la gráfica 3.21 podemos observar el comportamiento de la relación de contenido de polímeros en porcentaje con la densidad expresado en (gr/cm^3), para comprobar y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que la densidad aumenta proporcionalmente al porcentaje de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio hasta llegar a su máxima densidad, donde vuelve a decrecer al aumentar el porcentaje de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio. Se ha hecho la investigación para el contenido óptimo de cemento asfáltico (5.07 %), donde hay una variación de los polímeros desde 4 % a 8 %, y una variación de la densidad desde 2.353 a 2.346 (gr/cm^3) para la mezcla con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD), con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación se ajusta más a la curva y es la siguiente $y = -0.0081x^2 + 0.0954x + 2.1006$ y una variación de 2.354 a 2.324 (gr/cm^3) para la mezcla con dióxido de silicio, con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación se ajusta más a la curva y es la siguiente: $y = -0.0108x^2 + 0.1215x + 2.0409$

3.10.1. Para el análisis de la estabilidad

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los porcentajes de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica en caliente y los porcentajes de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio para la mezcla asfáltica con polímeros con

los resultados de la estabilidad de cada contenido de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica en caliente y de cada contenido de polímeros para la mezcla asfáltica con polímeros.

Gráfico 3.25. Análisis curva estabilidad vs % de cemento asfáltico

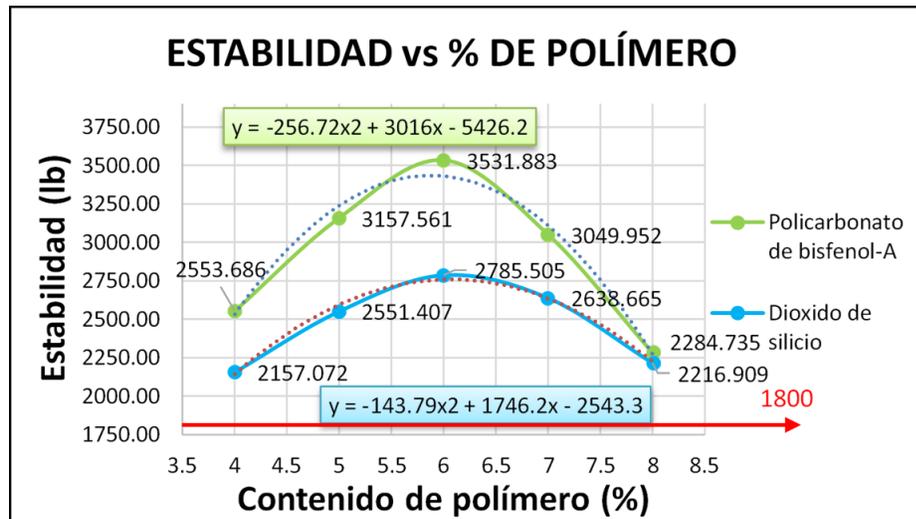


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.22 se muestra la relación del contenido de cemento asfáltico expresado en porcentaje con la estabilidad expresada en libras, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que la estabilidad sube a medida que el porcentaje de cemento asfáltico aumenta, hasta cierto punto donde la estabilidad comienza a decrecer a medida que se aumenta el cemento asfáltico, comprobando así que el contenido óptimo de cemento asfáltico para esta propiedad mecánica se encuentra alrededor de los puntos 4 % al 5.5 % de cemento asfáltico, lo cual se acerca al valor obtenido teóricamente del contenido óptimo del cemento asfáltico que nos daba un porcentaje óptimo de 5.38 %; sin embargo, el valor nos sirvió para estimar el óptimo calculado (5.07 %). Se ha hecho la investigación para los valores de contenido de cemento asfáltico entre 4 % al 7 %, cuyas estabilidades nos marcan desde 2740.63 libras hasta 1834.48 libras, siendo el mayor valor el 3357.95 libras que se obtiene del contenido de cemento asfáltico de 5.07 % que vendría a ser el contenido óptimo de cemento asfáltico investigado para esta propiedad mecánica de acuerdo a la

ecuación de la gráfica, con una línea de tendencia polinómica que fue la que más se adaptó a la curva y cuya ecuación es la siguiente: $y = -443.69x^2 + 4539.4x - 8251.8$

Gráfico 3.26. Análisis curva estabilidad vs % de polímeros



Fuente: Elaboración propia

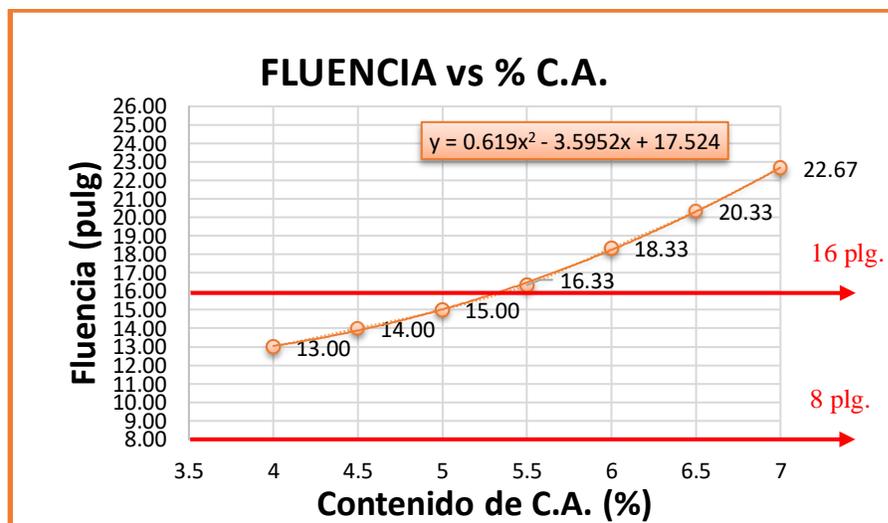
En la gráfica 3.23 podemos observar el comportamiento de la relación de contenido de polímeros presentado en porcentaje con la Estabilidad expresada en libras, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica de estabilidad va aumentando a medida que se aumenta el porcentaje de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio hasta llegar a su máxima estabilidad, hasta un punto donde empieza a decrecer, es decir que hay un óptimo de contenido de policarbonato de bisfenol-A(residuo de CD) y dióxido de silicio en las mezclas para una estabilidad óptima que se ha logrado obtener en la presente investigación. Se ha hecho la investigación para el óptimo de cemento asfáltico de 5.07 %, el cual se determinó con el cálculo. Para los valores de los diferentes contenidos de polímeros desde 4 % a 8 %, cuyas estabilidades para la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A(residuo de CD) marcan desde 2553.686 libras hasta 2284.735 libras y para la mezcla asfáltica con dióxido de silicio desde 2157.072 libras hasta 2216.909 libras, obteniendo un valor óptimo de estabilidad para el policarbonato de bisfenol-A(residuo de CD) de **3422.26 libras** para su contenido óptimo de polímero de **5.68 %**, de acuerdo a la ecuación investigada con una

línea de tendencia polinómica, que fue la que más se acomoda a la curva investigada y cuya ecuación es la siguiente: $y = -256.75x^2 + 3016.4x - 5426.5$ y para el valor óptimo de la estabilidad del dióxido de silicio de **2731.37 libras** para un contenido óptimo de polímero de **5.64 %**, de acuerdo a la ecuación investigada con una línea de tendencia polinómica y cuya ecuación es la siguiente: $y = -143.79x^2 + 1746.2x - 2543.3$, dejando así en claro que la estabilidad en la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) presenta una mejora de 1.92 % siendo un valor no considerable en relación a la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional, pero para la mezcla con dióxido de silicio en relación a la mezcla asfáltica convencional podemos ver que la estabilidad baja en un 18.62 % demostrando con ello que no existen mejoras en la mezcla asfáltica con dióxido de silicio.

3.10.2. Sobre la fluencia

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los porcentajes de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica en caliente y los porcentajes de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio para la mezcla asfáltica con polímeros con los resultados de fluencia de cada contenido de cemento asfáltico y polímeros en su caso.

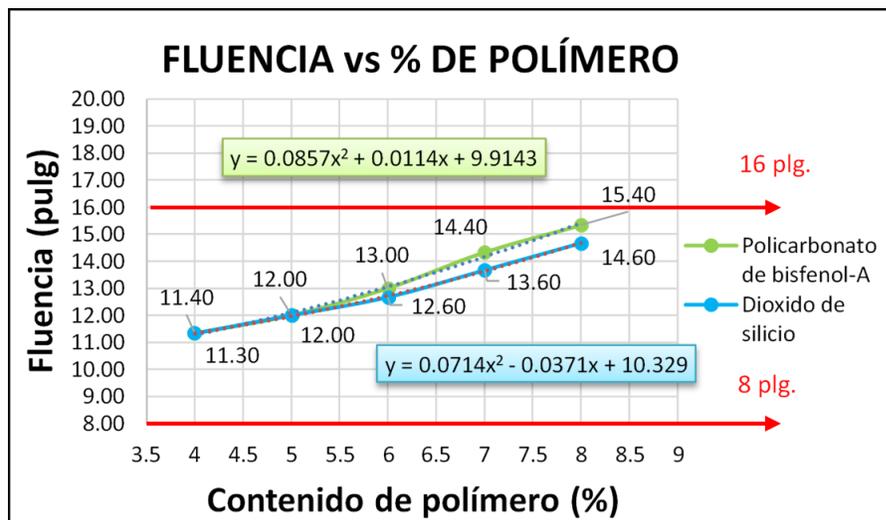
Gráfico 3.27. Análisis curva fluencia vs % de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.24 podemos observar la relación del contenido de cemento asfáltico expresado en porcentaje con la fluencia expresado 0.01 pulgadas, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica el flujo es proporcional al porcentaje de cemento asfáltico, es decir que a mayor porcentaje de cemento asfáltico mayor será el flujo. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de cemento asfáltico entre 4 % y 7 %, donde tienen una variación de la fluencia de 13.00 a 22.67 centésimas de pulgadas, siendo el mayor valor de 22.67 centésimas de pulgada que se obtiene al contenido de cemento asfáltico al 7 % con una línea de tendencia polinómica de segundo grado cuya ecuación es la siguiente: $y = 0.619x^2 - 3.5952x + 17.524$

Gráfico 3.28. Análisis curva fluencia vs % de polímeros



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 3.25 se muestra el comportamiento de la relación del contenido de polímeros expresado en porcentaje con la fluencia expresada en 0.01 pulgadas, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica el flujo es proporcional al porcentaje de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio en la mezcla, es decir que a mayor porcentaje de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio en la mezcla mayor será el flujo. Se ha hecho la investigación para el porcentaje óptimo de cemento asfáltico de **5.07 %** valor

que fue calculado, para los valores de los diferentes contenidos de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio entre 4 % a 8 %, donde se tiene una variación de la fluencia para la mezcla con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) de 11.40 a 15.40 centésimas de pulgada y para la mezcla asfáltica con dióxido de silicio de 11.30 a 14.60 centésimas de pulgada, siendo el mayor valor que se tiene para la mezcla con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) de 15.40 centésimas de pulgada que se obtiene al contenido de polímero de 8 % con una línea de tendencia polinómica de segundo grado cuya ecuación es la siguiente: $y = 0.0857x^2 + 0.0114x + 9.9143$, el mayor valor que se obtiene para la mezcla asfáltica con dióxido de silicio de 14.60 centésimas de pulgada que se obtiene al contenido de polímero de 8 % con una línea de tendencia polinómica de segundo grado cuya ecuación es la siguiente: $y = 0.0714x^2 - 0.0371x + 10.329$, demostrando con ello que los resultados obtenidos disminuyen su deformación en un 32.38 % para la mezcla con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y en un 35.29 % para la mezcla con dióxido de silicio, siendo valores poco considerables en relación al valor de la deformación de la mezcla asfáltica convencional.

3.11. Comparación de los resultados

Tabla 3.56. Densidad en la mezcla asfáltica convencional

| Porcentaje de cemento asfáltico (%) | Densidad (gr/cm ³) |
|--|-----------------------------------|
| 4.0 | 2.37 |
| 4.5 | 2.40 |
| 5.0 | 2.41 |
| 5.5 | 2.41 |
| 6.0 | 2.40 |
| 6.5 | 2.39 |
| 7.0 | 2.36 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.57. Densidad en la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

| Porcentaje de polímero (%) | Densidad (gr/cm ³) |
|----------------------------|--------------------------------|
| 4.0 | 2.35 |
| 5.0 | 2.37 |
| 6.0 | 2.38 |
| 7.0 | 2.37 |
| 8.0 | 2.35 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.58. Densidad en la mezcla asfáltica con dióxido de silicio

| Porcentaje de polímero (%) | Densidad (gr/cm ³) |
|----------------------------|--------------------------------|
| 4.0 | 2.35 |
| 5.0 | 2.38 |
| 6.0 | 2.39 |
| 7.0 | 2.36 |
| 8.0 | 2.32 |

Fuente: Elaboración propia

Como podemos apreciar en las tablas mostradas anteriormente: en la tabla 3.57 para la densidad de la mezcla asfáltica convencional que está de acuerdo a 7 puntos de contenido de cemento asfáltico, cuyo valor máximo se encuentra en el porcentaje de cemento asfáltico de 5.0 % y 5.5 % y este valor de densidad es de **2.41 (gr/cm³)**, pues este valor es mayor que la densidad de la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de

CD) siendo un valor de **2.38 (gr/cm³)** para un porcentaje 6 % de su contenido de polímero, y para la mezcla asfáltica con dióxido de silicio siendo un valor de **2.39 (gr/cm³)** para un porcentaje de 6 % de su contenido de polímero; entonces, quiere decir que al adicionar a la mezcla asfáltica en caliente el policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio disminuye la densidad de la mezcla, por lo cual la mezcla asfáltica convencional tiene mayor densidad que las mezclas asfálticas con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio (**2.41>2.38**)(**2.41>2.39**).

3.11.1. Comparación de resultados de estabilidad

Tabla 3.59. Estabilidad en la mezcla asfáltica convencional

| Porcentaje de cemento asfáltico (%) | Estabilidad (libras) |
|--|-----------------------------|
| 4.0 | 2740.64 |
| 4.5 | 3257.95 |
| 5.0 | 3423.94 |
| 5.5 | 3287.55 |
| 6.0 | 2923.71 |
| 6.5 | 2478.78 |
| 7.0 | 1834.48 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.60. Estabilidad en la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

| Porcentaje de polímero (%) | Estabilidad (libras) |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| 4.0 | 2553.686 |
| 5.0 | 3157.561 |
| 6.0 | 3531.883 |
| 7.0 | 3049.952 |
| 8.0 | 2284.735 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.61. Estabilidad en la mezcla asfáltica con dióxido de silicio

| Porcentaje de polímero (%) | Estabilidad (libras) |
|----------------------------|----------------------|
| 4.0 | 2157.072 |
| 5.0 | 2551.407 |
| 6.0 | 2785.505 |
| 7.0 | 2638.665 |
| 8.0 | 2216.909 |

Fuente: Elaboración propia

Mediante las tablas anteriores se puede denotar fácilmente que el valor de la estabilidad en la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) al contenido de polímero al 6 % es mayor que el valor de la mezcla asfáltica convencional al 5 % de contenido de cemento asfáltico y la mezcla asfáltica con dióxido de silicio al 6 % de contenido de polímero se encuentra por debajo de las dos mezclas nombradas anteriormente. Se pudo comprobar en el caso de la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) al 6 % de polímero tiene mayor estabilidad que la mezcla asfáltica convencional, por tanto, en las mezclas asfálticas con dióxido de silicio al 6 % de polímero tienen menor estabilidad que las mezclas asfálticas convencionales, con las gráficas 3.22 y 3.23 mostradas anteriormente. Estas graficas dan resultados de estabilidad, cada una con sus respectivas ecuaciones de las cuales encontramos un valor óptimo de estabilidad para cada una, para la mezcla asfáltica convencional el valor de su estabilidad que se obtienen al contenido óptimo de 5.07 % de cemento asfáltico es de **3357.95 libras**, para la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) el valor de su estabilidad que se obtiene al contenido óptimo del polímero de 5.68 % es de **3422.26 libras**, y para la mezcla asfáltica con dióxido de silicio el valor de su estabilidad que se obtiene al contenido óptimo del polímero es de 5.64 % es de **2731.37 libras**, por lo cual para esta propiedad mecánica el valor mayor de la estabilidad es el de la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) con un porcentaje al 5.68 % de polímero (**3422.26 > 3357.95**) observando que mejora en 1.92 % siendo un valor no considerable en

relación al valor de la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional, es decir que esta propiedad en las mezclas asfálticas con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) para un contenido de 5.68 % de polímero presentan valores por encima del valor mínimo de estabilidad para tráfico pesado que es de 1800 libras, pero no considerables en comparación a la mezcla asfáltica convencional. Y así también para la mezcla asfáltica con dióxido de silicio que se encuentra su valor de estabilidad (**2731.37 libras**) por debajo de la mezcla asfáltica convencional, demostrando con ello que la mezcla con dióxido de silicio decae su estabilidad en comparación a la mezcla asfáltica convencional, pero se encuentra por encima del valor mínimo de estabilidad para tráfico pesado que es de 1800 libras.

3.11.2. Comparación de los resultados de la fluencia

Tabla 3.62. Fluencia en la mezcla asfáltica convencional

| Porcentaje de cemento asfáltico (%) | Fluencia (0.01 pulgadas) |
|--|---------------------------------|
| 4.0 | 13.00 |
| 4.5 | 14.00 |
| 5.0 | 15.00 |
| 5.5 | 16.33 |
| 6.0 | 18.33 |
| 6.5 | 20.33 |
| 7.0 | 22.67 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.63. Fluencia en la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD)

| Porcentaje de polímero (%) | Fluencia (0.01 pulgadas) |
|----------------------------|--------------------------|
| 4.0 | 11.40 |
| 5.0 | 12.00 |
| 6.0 | 13.00 |
| 7.0 | 14.40 |
| 8.0 | 15.40 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.64. Fluencia en la mezcla asfáltica con dióxido de silicio

| Porcentaje de polímero (%) | Fluencia (0.01 pulgadas) |
|----------------------------|--------------------------|
| 4.0 | 11.30 |
| 5.0 | 12.00 |
| 6.0 | 12.60 |
| 7.0 | 13.60 |
| 8.0 | 14.60 |

Fuente: Elaboración propia

De las tablas anteriores se puede observar que para la mezcla asfáltica convencional la fluencia es directamente proporcional al porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla; es decir, mientras más contenido de cemento asfáltico haya en la mezcla más alto será el valor de la fluencia, por lo que para las mezclas asfálticas convencionales el valor de la fluencia más alto es de **22.67** centésimas de pulgada a un contenido de cemento asfáltico de 7 %, mientras que para las mezclas asfálticas con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio, de igual manera la fluencia es directamente proporcional al contenido de polímero en la mezcla, obteniendo el valor más alto para la mezcla con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) de **15.40** centésimas de pulgada a un contenido de polímero de 8 %, y para la mezcla asfáltica con dióxido de silicio su valor más alto de fluencia es de **14.60** centésimas de pulgada a un contenido de polímero de 8

%, en general podemos apreciar que la fluencia aumenta si hay más cemento asfáltico en la mezcla y podemos comprobar que aumenta diminutamente más si se añade polímeros a la mezcla. Entonces se prueba claramente en esta investigación que existe más fluencia la mezcla asfáltica convencional que la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio según lo investigado en el presente proyecto **(22.67>15.40) (22.67>14.60)**, en este caso los valores obtenidos de las fluencias en las mezclas asfálticas con los polímeros son menores ya que disminuye su deformación, siendo valores no considerables en comparación a la mezcla asfáltica convencional, en todo caso las fluencias en ambas mezclas asfálticas estudiadas se encuentran dentro de los límites de diseño para tráfico pesado cuyos rangos son desde 8 a 16 centésimas de pulgada.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Los resultados máximos obtenidos en la densidad de la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) es de **2.38 (gr/cm³)** para un 6 % de polímero y para la mezcla con dióxido de silicio de **2.39 (gr/cm³)** para un 6 %, podemos observar que se obtienen valores menores que los obtenidos en la mezcla asfáltica convencional siendo su valor máximo de **2.41 (gr/cm³)**.
- Se analizó la estabilidad de cada mezcla asfáltica donde el porcentaje óptimo de la mezcla con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) es 5.68 % con una estabilidad de **3422.26 libras**, superior a la mezcla asfáltica convencional con una estabilidad de **3357.95 libras** al contenido de cemento asfáltico óptimo de 5.07 %, demostrando con ello que la mezcla asfáltica con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) mejora su propiedad de estabilidad en un 1.92 % siendo un valor poco considerable para su utilización en la mezcla asfáltica.
- Se analizó la estabilidad de cada mezcla asfáltica donde el porcentaje óptimo de la mezcla con dióxido de silicio es 5.64 % con una estabilidad de **2732.73 libras**, obteniendo un valor inferior a la mezcla asfáltica convencional con una estabilidad de **3357.95 libras** al contenido de cemento asfáltico óptimo de 5.07 %, demostrando con ello que la estabilidad se reduce en un 18.62 % en relación a la mezcla asfáltica convencional, siendo un aditivo que empeora la propiedad de la estabilidad en la mezcla asfáltica.
- Se analizó la fluencia de cada una de las mezclas asfálticas, con lo que se obtuvo para la mezcla asfáltica convencional una fluencia máxima de **22.67** centésimas de pulgadas, superior a la de la mezcla con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) que tiene un valor de **15.33** centésimas de pulgada; y para la mezcla con dióxido de silicio un valor de **14.67** centésimas de pulgada, demostrando con ello que los resultados obtenidos disminuyen su deformación en 32.38 % para la mezcla con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y un 35.29 % para la

mezcla con dióxido de silicio, siendo valores no muy considerables en relación a la mezcla asfáltica convencional.

- La utilización de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio en la mezcla asfáltica en caliente, dio resultados poco considerables pero que están dentro los límites normados para tráfico pesado, tanto en la estabilidad como en la fluencia, para tráfico pesado lo mínimo normado para la propiedad mecánica de estabilidad es de 1800 libras, por lo cual los valores obtenidos de estabilidad para la mezcla con policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) es de **3422.26 libras** y para la mezcla con dióxido de silicio es de **2732.73 libras**, para la fluencia el rango para tráfico pesado esta entre 8 a 16 centésimas de pulgada y los valores obtenidos están dentro de este rango obteniendo para la mezcla con policarbonato de bisfenol-A(residuo de CD) un valor de **15.33** centésimas de pulgada y para la mezcla con dióxido de silicio un valor de **14.67** centésimas de pulgada.

4.2. Recomendaciones

- Hacer un buen uso del tiempo para la realización de la caracterización de los agregados y del cemento asfáltico para optimizar el uso de equipo y materiales en los laboratorios, debido al crecimiento poblacional universitario.
- Tomar muy en cuenta la variación y controlar muy de cerca la temperatura al momento de estar realizando la mezcla asfáltica en caliente, ya que al calentar demasiado tiempo el cemento asfáltico se pueden perder las propiedades del mismo.
- Ser precisos al utilizar los equipos para la medición ya que se necesita precisión de los mismo para la obtención de buenos resultados para la investigación.
- Según los resultados obtenidos en la mezcla con dióxido de silicio, no se recomienda su uso, ya que no presentó buenas propiedades en la estabilidad ni cambios significativos en la propiedad de la fluencia en la mezcla asfáltica.
- Este trabajo se realizó sobre los asfaltos modificados con la adición de policarbonato de bisfenol-A (residuo de CD) y dióxido de silicio, se espera tenga continuidad profundizando sobre los diferentes polímeros y mezclas asfálticas que

se puedan lograr, así como también un estudio sobre los beneficios obtenidos a largo y mediano plazo de los asfaltos modificados.