

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Usando fibras metálicas para el desarrollo de una nueva mezcla asfáltica se pretende demostrar la auto-reparación de las grietas y deterioro causadas por las condiciones ambientales combinadas con las cargas de tráfico.

Estas fibras pueden ser usadas para el desarrollo de nuevos pavimentos flexibles con fines de auto-reparación de grietas.

Por lo tanto, la adición de fibras metálicas, pueden influir en el comportamiento físico y mecánico de una nueva mezcla asfáltica.

Con la caracterización de los agregados y del cemento asfáltico se procede a realizar la dosificación tomando en cuenta el contenido óptimo del cemento asfáltico, para realizar la comparación técnica de la nueva mezcla asfáltica con las propiedades de auto-reparación.

Se evaluarán treinta y seis muestras en seis grupos de seis muestras, los seis grupos a estudiar tendrán la misma dosificación empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico, y cada grupo con distintos porcentajes de fibras metálicas. De este modo se determinará las propiedades físicas de auto-reparación mediante los ensayos de laboratorio.

La investigación tiene un impacto en la vida útil de los pavimentos, si el proceso de auto-reparación de pavimento agrietado estará mejor controlada, podrán construirse nuevos pavimentos de menor espesor y con mayor vida útil.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Los pavimentos asfálticos para cumplir su vida útil de servicio son periódicamente reparados, utilizando recursos económicos.

Se realizara una comparación técnica de una mezcla asfáltica y se evaluara la auto-reparación de la mezcla, usando fibras metálicas para el desarrollo de la misma.

La auto-reparación se refiere a la capacidad de cerrarse las fisuras abiertas como efecto de las fibras metálicas ante la contracción de la malla de acero originada en el interior de la mezcla, entonces sin que nada participe no permita que se fisure más; y que las microgrietas no se vean y las grietas más grandes no sigan aumentando.

Además la adición de las fibras metálicas le dará mejores propiedades físicas y mecánicas a la mezcla, las fibras metálicas son conocidas por aumentar las características de resistencia, fatiga y ductilidad.

Entre la fibras metálicas se forma un entremallado en el interior de la mezcla, impide el desprendimiento de las partículas entre si dentro de la mezcla.

La investigación tiene un impacto en la vida útil de los pavimentos, en disminuir los costos de mantenimiento, si el proceso de reparación de pavimento disminuye con la alternativa de esta mezcla con propiedades de auto-reparación, podrán construirse en nuevos pavimentos de menor espesor y mayor vida útil.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Situación problemática

El problema principal de pavimentos asfálticos es la gran cantidad de recursos financieros que se invierte en las reparaciones para alcanzar la vida útil y de servicio en condiciones adecuadas en las carreteras.

Las mezclas asfálticas convencionales utilizadas en la construcción tienen propiedades y características que en la actualidad no son suficientes para satisfacer las necesidades

debido al incremento de flujo vehicular, por esta razón buscamos soluciones que ayuden a mejorar las características de los asfaltos y su comportamiento.

El pavimento flexible de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la climatología, por ello surgen nuevas técnicas para crear mezclas asfálticas más resistentes, de mejores características, ya que las mezclas convencionales limitan las mismas.

Las fallas de fisuración que presenta un pavimento flexible debido a las cargas de tráfico, rigidización de mezclas asfálticas, variación brusca de temperatura, causando contracción y dilatación del pavimento asfáltico. Motivo por el cual se busque alternativas de nuevas mezclas asfálticas que disminuyan o contraigan los efectos descritos.

1.3.2. Problema

¿A través de la incorporación de fibras metálicas en las mezclas asfálticas se podrá lograr una acción de auto-reparación que permita evaluar la comparación técnica de una nueva mezcla asfáltica comparada con una mezcla convencional?

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Comparar técnicamente la auto-reparación en la mezcla asfáltica, bajo condiciones de porcentajes de fibras metálicas adecuadas para conseguir la disminución de la fisuración para mejorar la resistencia y estabilidad de la mezcla asfáltica cuya consecuencia es su mayor durabilidad.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar los ensayos de la caracterización de los agregados y del cemento asfáltico.
- Determinar la dosificación de la mezcla asfáltica con la incorporación de fibras metálicas cuya acción sea auto-reparable.
- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla auto-reparable.
- Comparar la estabilidad, resistencia y dimensiones de fisuras de la mezcla modificada con las mezclas con fibras metálicas.
- Realizar un análisis del comportamiento de las fibras metálicas en la mezcla para la auto-reparación.
- Realizar el análisis de precios unitarios de la mezcla asfáltica convencional y las mezclas modificadas con fibras metálicas.

1.5. HIPÓTESIS

Si tenemos una mezcla convencional en el pavimento y le proporcionamos una condición de auto-reparante agregando fibras metálicas, entonces sus propiedades son diferentes y permiten disminución de la fisuración logrando mayor calidad, resistencia y durabilidad del pavimento.

1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1. Variables independientes

Mezcla asfáltica con fibras metálicas

1.6.2. Variables dependientes

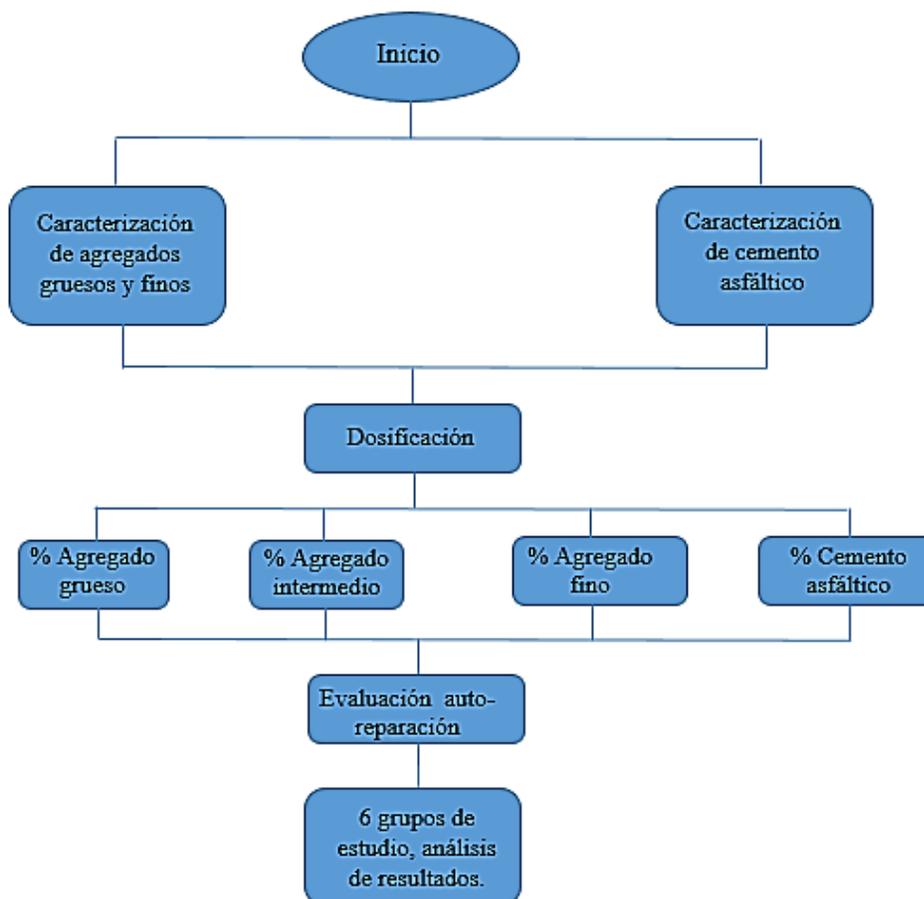
Dosificación de la mezcla asfáltica.

Propiedades de la mezcla asfáltica auto-reparable

1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1. Componentes

Figura 1.1. Flujograma



Fuente: Elaboración propia

Se realizará la caracterización de los tres tipos de agregados a utilizar, agregado grueso, intermedio y fino. Los ensayos a realizar serán los siguientes: Granulometría, peso específico, desgaste y equivalente de arena.

Caracterización del cemento asfáltico, con los siguientes ensayos: Penetración, ductilidad, peso específico, punto de ablandamiento y punto de inflamación.

Dosificar la mezcla asfáltica del cual, se realizará un cálculo para obtener los porcentajes de cada elemento de la mezcla asfáltica, la cantidad de cemento asfáltico se obtendrá por el ensayo de contenido óptimo (Marshall).

Para la evaluación de la auto-reparación se analizará 6 grupos de muestras a diferentes tipos de porcentaje con fibras de acero a: 0%, 1%, 2%, 4%, 8% y 15% de peso.

Resultados para los diferentes tipos de muestras, con los agregados y el cemento asfáltico.

Se estudiarán 36 muestras de mezcla asfáltica debidamente preparada y compactada, con las pruebas necesarias de laboratorio con el fin de determinar si cumple con los objetivos del trabajo.

1.7.2. Métodos y técnicas empleadas.

1.7.2.1. Método

Método inductivo

El método inductivo, es aquel método científico que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares, se trata del método científico más usual, en el que pueden distinguirse cuatro pasos esenciales: la observación de los hechos para su registro, la clasificación y estudio de los hechos y permite llegar a una generalización y la contrastación.

Aplicado el método inductivo se dice que se tendrá treinta y seis muestras de mezcla, seis grupos de seis muestras cada una, el primer grupo será una mezcla convencional ya que no va a contener fibras metálicas los grupos dos, tres, cuatro, cinco y seis tendrá fibra metálica a 1%, 2%, 4%, 8%, y 15% de peso conteniendo los últimos grupos la incorporación de material auto-reparante.

Como propiedades de auto-reparación se estudiará la estabilidad y resistencia de la mezclas con contenido de fibras metálicas comparando estas propiedades con la de una mezcla convencional, auto-reparación se define como la capacidad de cerrarse las fisuras

abiertas como efecto de las fibras metálicas ante la contracción de las mallas de acero originadas en el interior de la mezcla.

Se medirá la auto-reparación por la cantidad de las fisuras (longitud, ancho y profundidad) a cada porcentaje de fibras metálicas a usar. Realizando el ensayo de compresión inconfiada de las briquetas.

Las briquetas serán sometidas a una carga P en la prensa hidráulica para obligar a un estado de fisuramiento, a estas briquetas se realizan los ensayos de estabilidad y fluencia tanto a las mezclas modificadas como a las convencionales.

1.7.2.2. Técnicas

Técnica de investigación experimental

La investigación experimental está integrada por un conjunto de actividades metódicas y técnicas que se realizan para recabar la información y datos necesarios sobre el tema a investigar y el problema a resolver. La investigación experimental se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular, su diferencia con los otros tipos de investigación es que el objetivo de estudio y su tratamiento dependen completamente del investigador, de las decisiones que tome para manejar el experimento. El experimento es una situación provocada por el investigador para introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él para controlar el aumento o la disminución de las variables y el efecto en las conductas observadas.

En el experimento, el investigador maneja de manera deliberada la variable experimental y luego observa lo que ocurre en condiciones controladas. La experimentación es la repetición voluntaria de los fenómenos para verificar su hipótesis.

La técnica a utilizar será de forma experimental a través de ensayos de laboratorio, como base se tomara los ensayos descritos en el manual de ensayos de suelos y materiales-asfaltos del “Manual de carreteras V4a de ABC”, para realizar la dosificación de la mezcla a la cual se le dará condición de auto-reparante agregando fibras metálicas de acero a 0%,

1%, 2%, 4%, 8% y 15% de peso. Se usará proporciones diferentes para la comparación técnica de esta mezcla asfáltica, por el costo que representaría ya en una carretera porciones altas de este material de propiedad auto-reparante que formara una malla que permitirá la disminución de su fisuración ante las cargas.

1.8. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Se utilizará el siguiente procedimiento para el análisis, interpretación y validación de los resultados:

1.8.1. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva es la técnica matemática que obtiene, organiza, presenta y describe un conjunto de datos con el propósito de facilitar el uso generalmente con el apoyo de tablas, medidas numéricas o gráficas. Además, calcula parámetros estadísticos como las medidas de centralización y de dispersión que describen el conjunto estudiado.

Se usará este procedimiento para describir las características y comportamientos de cada uno y de forma general de los grupos de estudio mediante **medidas de resumen, tablas y gráficos**. Para lo cual se divide en los siguientes grupos:

Tabla 1.1. Muestras con porcentaje de fibras metálicas para las propiedades de auto-reparación

Grupo	Porcentaje (%)	Tamaño
1	0	6
2	1	6
3	2	6
4	4	6
5	8	6
6	15	6
Total		36

Fuente: Elaboración propia

Se analizará 36 muestras de mezclas asfálticas de las cuales el primer grupo pertenece a una mezcla convencional y los siguientes grupos de análisis serán mezclas con fibras metálicas para evaluar su comportamiento ante la mezcla convencional.

Fórmulas para la estadística descriptiva

Medidas de centralización

Media aritmética.- Es la medida de posición de mayor uso, es el valor central o valor de equilibrio que representa a todos los valores de la variable. Se calcula con la siguiente formula:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

\bar{x} = Media aritmética de una muestra

x_i = Valores del conjunto de muestra

n = Tamaño de la muestra

- Mediana.- Es un conjunto de datos ordenados de menor a mayor, la mediana corresponde al dato central. Aquel que deja 50% de la información bajo el y el otro 50% es mayor o igual. Es un valor que divide a las observaciones en dos grupos con el mismo número de individuos.
Si el número de datos es par se elige la media de los dos datos centrales, y si es impar la mediana será el valor del dato central.

$$Me = \begin{cases} \frac{x_{(n/2)} + x_{(n/2+1)}}{2}, & \text{si } n \text{ es par} \\ x_{(n+1/2)}, & \text{si } n \text{ es impar} \end{cases}$$

Donde:

$x_{(n/2)}, x_{(n/2+1)}$ = Valores de los dos datos centrales

$x_{(n+1/2)}$ = Valor del dato central

Me = Mediana

Medidas de dispersión

- Desviación estándar.- Se realiza el cálculo de la desviación estándar para conocer con detalle un conjunto de datos, no solo basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos también conocer la desviación que presentan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describir e interpretar para la toma de decisiones.

Se determina de la siguiente forma:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

S = Desviación estándar

\bar{x} = Media aritmética de una muestra

x_i = Valores del conjunto de muestra

n = Tamaño de la muestra

- Varianza.- Es una medida de dispersión relativa, permite efectuar comparaciones entre diversos conjuntos de datos. La varianza se expresa en porcentaje al multiplicarse por 100. Se considera que si la varianza es menor a 50% significa que de baja dispersión, es decir la media aritmética es una buena representación de un conjunto de datos, si es mayor a 50% significa alta dispersión, la media en tal caso no es una buena representación. Su fórmula es la siguiente:

$$\text{Varianza} = \frac{S}{\bar{x}} * 100 (\%)$$

Donde:

S = Desviación estándar

\bar{x} = Media aritmética de la muestra

1.9. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Se desarrollará cada ensayo para la caracterización de los agregados y del cemento asfáltico; Se determinará la propiedad de auto-reparación para la mezcla asfáltica a realizar para llegar al objetivo del trabajo, bajo la norma de la ABC del “Manual de ensayos de suelos y materiales-asfaltos V4a”

Las briquetas serán elaboradas con cemento asfáltico de penetración 85-100, para agregados gruesos de 3/4”, 3/8” y agregado fino que cumplan las especificaciones de la norma de la A.B.C., para el cemento asfáltico los ensayos de densidad, ductilidad, penetración, punto de inflamación y punto de ablandamiento. Para los agregados que cumplan las especificaciones de peso específico, desgaste de los ángeles y equivalente de arena

La granulometría formada por los agregados será la que se ajuste y adecue más a los agregados que se tiene, ya sea a la norma ASTM o a la norma del instituto de asfaltos.

Con la obtención de datos de los diferentes ensayos de laboratorio a realizar, se tabulará los datos y resultados realizando los cálculos correspondientes para aplicar la estadística descriptiva. Se debe desarrollar la técnica de investigación para realizar el análisis de la auto-reparación involucrando las fibras metálicas en la dosificación. Después realizar el análisis de los resultados del trabajo.

De las mezclas asfálticas se evaluará como propiedad la auto-reparación, se medirá la cantidad de fisuras (longitud, ancho y profundidad), originadas por una carga P en el ensayo de compresión inconfiada, además el ensayo de estabilidad de una mezcla, demostrara que se mejora la resistencia la mezcla asfáltica con las fibras metálicas.

La comparación se dará entre los grupos de mezcla convencional con los grupos con mezcla modificada con fibras metálicas, cada grupo se evaluará su resistencia, estabilidad y dimensiones de fisuras.

Logrando que con las fibras metálicas, forme un entremallado en el interior de la mezcla, y que produzca una contracción que ayude a la disminución de las fisuras, e impida el desprendimiento de las partículas entre si dentro de la mezcla, mejorando sus propiedades mecánicas y físicas.

Se realizará el análisis de precios unitarios tanto de la mezcla convencional como a los grupos de mezclas modificadas para realizar la comparación económica de la misma.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE FALLAS Y REPARACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1. PAVIMENTOS

Del latín *pavimentum*, el pavimento es la capa o base que constituye el suelo de una construcción o de una superficie no natural. El pavimento funciona como sustento de los seres vivos y de las cosas.

Es importante tener en cuenta que el pavimento puede revestirse con diferentes materiales, como piedras o maderas. El término, sin embargo, suele asociarse en algunos países al asfalto, el material utilizado para construir calles, rutas y otras vías de comunicación.

Se cree que uno de los métodos más antiguos de pavimentación fue aquel que se conoce como calzada romana, creado para facilitar las comunicaciones y traslados dentro del Imperio. Esta calzada fue desarrollada en diversas etapas y algunos de sus trechos aún permanecen en buenas condiciones.

Las denominadas mezclas asfálticas y el concreto son los materiales más habituales para crear el pavimento urbano, ya que tienen un buen rendimiento de soporte y permiten el paso constante de vehículos sin sufrir grandes daños.

En los últimos años se ha promovido el desarrollo de pavimento que sea sostenible y que respete el medio ambiente.

La importancia de construir pavimentos resistentes:

Dado que un gran porcentaje de los accidentes automovilísticos que tienen lugar todos los días en las grandes ciudades están relacionados con el deterioro de las calles, resulta de gran importancia prolongar la vida de los pavimentos. Esto se logra estudiando potenciales cambios en sus diseños, de manera que el desgaste producido por los vehículos afecte tan sólo la capa superficial y no genere daños de tipo estructural. Es evidente que los beneficios de dichos avances repercutirían tanto en la seguridad vial como en la economía.

El pavimento como estructura de vías de comunicación terrestre, formada por una o más capas de materiales, que tiene como función el permitir el tránsito de vehículos:

Con seguridad.

Con comodidad.

Con el costo óptimo de operación.

Superficie impermeable.

Color y textura adecuados.

Resistencia a la repetición de cargas.

Resistencia a la acción del medio ambiente.

Que no transmita a la terracería esfuerzos mayores a su resistencia.

El pavimento forma parte del paquete estructural y es la capa constituida por uno o más materiales que se colocan sobre el terreno natural o nivelado, para aumentar su resistencia en la circulación de personas o vehículos. Entre los materiales utilizados en la pavimentación urbana, industrial o vial están los suelos con mayor capacidad de soporte, los materiales rocosos, el hormigón y las mezclas asfálticas.

2.1.1. Tipos de pavimentos

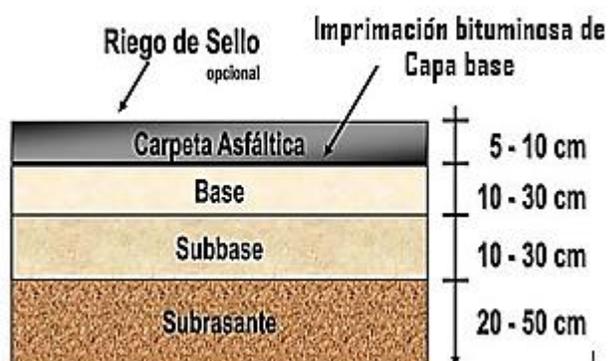
Básicamente existen dos tipos de pavimentos: rígidos y flexibles.

Pavimentos flexibles

Son aquellos que tienen un revestimiento asfáltico sobre una capa base granular. La distribución de tensiones y deformaciones generadas en la estructura por las cargas de rueda del tráfico, se da de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión del suelo de fundación por medio de la absorción de tensiones cizallantes. En este proceso ocurren tensiones de deformación y tracción en la fibra inferior del revestimiento asfáltico, que provocará su fisuración por fatiga por la repetición de las cargas de tráfico. Al mismo tiempo la repetición de las tensiones y

deformaciones verticales de compresión que actúan en todas las capas del pavimento producirán la formación de hundimientos en la huella de rueda, cuando el tráfico tiende a ser canalizado, y la ondulación longitudinal de la superficie cuando la heterogeneidad del pavimento fuera significativa.

Figura 2.1. Composición de pavimento flexible sección transversal



Fuente: Texto guía de carreteras II

Pavimentos rígidos

Nota: En el presente estudio no se describirá el pavimento rígido, ya que no corresponde al estudio que se realizará.

2.2. PAVIMENTOS FLEXIBLES

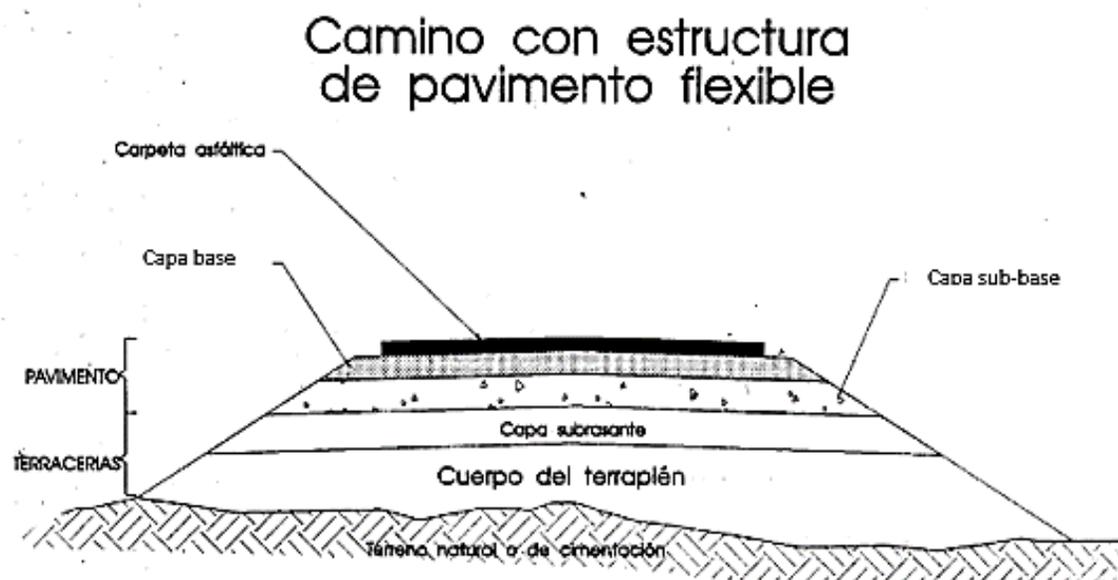
Se denomina pavimento flexible a aquel cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como puedan ser vías, aceras o parqueos.

Es más económico en su construcción inicial, tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil. Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de una carpeta asfáltica, de la base y de la sub-base.

2.2.1. Componentes de pavimentos flexibles

Con base a la figura 2.3 se describe los componentes de un pavimento flexible incluyendo aquellas capas que no forman parte del pavimento estrictamente pero que conforman parte de la sección de un camino y que trabajan en conjunto con las capas subyacentes.

Figura 2.2. Estructuración de pavimento flexible sección transversal



Fuente: Estructuración de vías terrestres Fernando Olivera Bustamante (1994)

Bajo una carpeta bituminosa, formada típicamente por una mezcla de agregado y un aglutinante asfáltico, que constituye la superficie de rodamiento propiamente dicha, se disponen casi siempre por lo menos dos capas bien diferenciadas: una base, de material granular y una sub-base, formada preferentemente, también por suelo granular, aunque el requisito obligue menos que en la base, en el sentido de poder admitir suelos de menor calidad, con mayor contenido de finos y menor exigencia en lo que se refiere a granulometría; la razón es el mayor alejamiento de la sub-base de la superficie de rodamiento, por lo que llegan esfuerzos de menor intensidad.

Bajo la sub-base se presenta casi por lo general otra capa denominada sub-rasante, todavía con menos requisitos de calidad mínima que la sub-base, por la misma razón, pero cuyo fundamental papel mecánico se discute cada vez menos.

Finalmente bajo la sub-rasante aparece el material convencional de la terracería o terreno natural.

2.2.1.1. Terracería o terreno natural

Las terracerías son el volumen de material que se extrae o sirve de relleno para la construcción de una vía terrestre. Si se necesita extraer material fuera de la línea de corte se tendrán zonas de préstamo. Si están entre 10 y 100 m.

Se les llaman préstamo lateral. Si las zonas de préstamo se encuentran a más de 100 m se denominan préstamos de banco. Las terracerías en terraplén se dividen en dos zonas; El cuerpo del terraplén que es la parte inferior, y la capa sub-rasante con un espesor mínimo de 30 cm. Esto funciona únicamente para caminos donde el tránsito vehicular es menor a 5000 vehículos. Cuando se tiene un camino para un tránsito superior a los 5000; entre el cuerpo del terraplén y la capa sub-rasante se forma una capa llamada subyacente de 50 cm. de espesor.

2.2.1.2. Cuerpo del terraplén

Su finalidad, es dar la altura necesaria para cumplir con las especificaciones geométricas. Resistir las cargas del tránsito que se transfieren por las capas superiores y distribuir los esfuerzos a través de su espesor para transmitirlos al terreno natural.

Según las normas de la ABC, los materiales utilizados para su construcción deben tener un tamaño máximo de 7.5 cm. y un límite líquido menor a 50%. El cuerpo del terraplén debe tener una expansión máxima de 5%, un VRS de 5% mínimo y un grado de compactación de 90%.

2.2.1.3. Capa sub-rasante

La finalidad es resistir las cargas que el tránsito transmite al pavimento, transmitir y distribuir las cargas al cuerpo del terraplén, evitar que los materiales finos plásticos del cuerpo del terraplén contaminen el pavimento y economizar los espesores de pavimento.

La parte superior de la capa sub-rasante coincide con la línea sub-rasante del proyecto geométrico. Es indispensable tomar en cuenta las especificaciones de la pendiente longitudinal, la altura para las obras de drenaje para que el agua capilar no afecte al pavimento. Para su construcción se necesita compactar dos capas de 15 cm. de espesor mínimo.

Según la norma de la ABC el espesor mínimo de la capa debe ser de 30 cm. El tamaño máximo del material debe de ser de 7.6 cm. Su grado de compactación es del 95% del peso volumétrico seco máximo (P.V.S.M.) El valor relativo de soporte debe de ser mínimo de 20%, la expansión máxima del material es menor a 2%, un límite líquido máximo de 40% y por último un índice plástico máximo de 12%.

2.2.1.4. Capa sub-base

La sub - base es la capa de material que se construye directamente sobre la terracería y su función es:

- Reducir el costo de pavimento disminuyendo el espesor de la base.
- Proteger a la base aislándola de la terracería, ya que, si el material de la terracería se introduce en la base, puede sufrir cambios volumétricos generados al cambiar las condiciones de humedad dando como resultado una disminución en la resistencia de la base.
- Proteger a la base impidiendo que el agua suba por capilaridad.
- Transmitir y distribuir las cargas a las terracerías.

Las características de calidad que se buscan en los materiales de sub-base, se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características de materiales de capa sub-base

Materiales de Sub-base	
Limite liquido máximo	35%
Índice de plasticidad máximo	8%
Densidad compactada mínima	95%
CBR mínimo	40 %
Equivalente de arena, en porcentaje mínima	30 %

Fuente: Manual de carreteras ABC sección 3. Bases y sub-bases de pavimentos

2.2.1.5. 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:

Tener la resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos.

Tener el espesor suficiente para que pueda resistir las presiones transmitidas a la sub-base.

Aunque exista humedad la base no debe de presentar cambios volumétricos perjudiciales.

Las características de calidad que se buscan en los materiales para base, se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Características de materiales de capa base

Materiales de base	
Limite líquido, en porcentaje (máx.)	25%
Índice plástico máximo	6%
Partículas alargadas y lajeadas máximo	35%
Densidad Insitu mínimo	95%
CBR mínimo	80%
Equivalente de arena mínimo	50 %
Porcentaje de sales solubles máximo	4 %

Fuente: Manual de carreteras ABC sección 3. Bases y sub-bases de pavimentos

2.2.1.6. Carpeta asfáltica

La carpeta asfáltica es la parte superior de un pavimento flexible. Es una capa de material pétreo cementado con asfalto que se coloca sobre la base.

Los materiales pétreos son de procedencia de ríos, arroyos o depósitos naturales., que después son procesados en chancadoras o trituradoras de agregados, para ser empleados en la carpeta asfáltica deben cumplir con ciertas características dadas por la granulometría, dureza, forma de la partícula y adherencia con el 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 utilicen tengan forma esférica, ya que las que son en forma de laja o de aguja pueden romperse muy fácilmente y afectar la granulometría. Las funciones de la carpeta asfáltica son las siguientes:

- 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 carga de los vehículos.

2.2.2. Características de pavimentos flexibles

Entre las características principales que debe cumplir un pavimento flexible se encuentran las siguientes:

Resistencia estructural.

Deformabilidad.

Durabilidad.

Costo.

Requerimientos de conservación.

Comodidad.

2.2.2.1. Resistencia estructural

La metodología para el análisis de la resistencia de un pavimento es proporcionada por la mecánica de suelos y es sabido, que en ese campo, las teorías de falla de mayor aceptación por hoy son las del esfuerzo cortante; como consecuencia, en el estudio de los pavimentos flexibles suele considerarse a los mismos esfuerzos como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural.

Las teorías de capacidad de carga de la mecánica de suelos suelen referirse a medios homogéneos e isótropos; la heterogeneidad de la estructura de los pavimentos flexibles,

así como su anisotropía, conducen a una primera incertidumbre en el planteamiento teórico de resistencia.

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 desde el punto de vista estructural. Además de los esfuerzos cortantes también se tienen los producidos por la aceleración, frenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructura.

En resumen, la resistencia de los materiales que forman los pavimentos interesa desde dos puntos de vista:

- a) En cuanto a la capacidad de carga que pueden desarrollar las capas constituyentes del pavimento para soportar adecuadamente las cargas del tránsito.
- b) En cuanto a la capacidad de carga de la capa sub-rasante, que constituye el nexo de unión entre el pavimento y la terracería, para soportar los esfuerzos transmitidos y transmitir, a su vez, esfuerzos a la terracería a niveles convenientes.

2.2.2.2. Deformabilidad

En los pavimentos las deformaciones interesan como es usual en la ingeniería, desde dos puntos de vista; Por un lado, porque las deformaciones excesivas están asociadas a estado de falla, y por otro lado, porque es sabido que en un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho.

Las cargas de tránsito producen en el pavimento deformaciones de varias clases. Las elásticas son de recuperación instantánea y las plásticas que son aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora.

La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en los materiales con resistencia a la tensión, colocados en la parte superior de la estructura, en los que puede llegar a generar falla por fatiga si el monto de la deformación es importante y los materiales susceptibles.

2.2.2.3. Durabilidad

La durabilidad está ligada con una serie de factores económicos y sociales del propio camino. En un camino de muy alto tránsito y gran importancia económica se requerirán pavimentos muy duraderos a fin de no tener que recurrir a costosas interrupciones de un tránsito importante.

Una vez fijado el criterio que proporciona la duración deseada en el pavimento, surgen muchas incertidumbres de carácter práctico para lograrla; el efecto del clima y del tránsito dista de estar bien establecido, de manera que su influencia en la vida del pavimento no puede definirse con exactitud.

2.2.2.4. Costo

Como toda estructura ingenieril, un pavimento representa el balance entre la satisfacción de requisitos de resistencia y estabilidad en general por un lado y el costo, por otro. Un diseño correcto será el que llegue a satisfacer los necesarios requerimientos del servicio a costo mínimo. Naturalmente para lograr el equilibrio podrán seguirse una gran cantidad de posibles líneas de conducta y de aquí emana uno de los aspectos de diseño más inciertos y de los que demandan mayor criterio.

Los pavimentos flexibles requieren menor inversión inicial, pero una conservación más rigurosa.

2.2.2.5. Requerimientos de conservación

Los factores climáticos influyen de gran manera en la vida de un pavimento. Otro factor es la intensidad del tránsito, ya que se tiene que prever el crecimiento futuro.

Se debe de tomar en cuenta el comportamiento futuro de las terracerías, deformaciones y derrumbes. La degradación estructural de los materiales por carga repetida es otro aspecto que no se puede dejar de lado.

La falta de conservación sistemática hace que la vida de un pavimento se acorte.

2.2.2.6. Comodidad

Para grandes autopistas y caminos, los métodos de diseño se ven afectados por la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad de proyecto.

La seguridad es muy importante al igual que la estética.

2.3. TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer et al., 2004).

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

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

Las mezclas asfálticas se dividen en dos grupos las cuales son:

Mezclas asfálticas en Frío

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

Mezclas asfálticas en Caliente

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

Nota: En el presente estudio no se describirá las mezclas asfálticas en frío, ya que no corresponde al estudio que se realizará.

2.3.1. Mezclas asfálticas en caliente

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

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 5% al 6% de cemento asfáltico en peso.

2.3.1.1. Características de las mezclas asfálticas en caliente

Estas mezclas en caliente, tienen buen comportamiento en servicio cuando son proyectadas, construidas y apoyadas correctamente. Se deben tener en cuenta para este fin, las siguientes características de servicio:

a) Durabilidad.- La mezcla debe ser resistente a los agentes climáticos, particularmente a la acción desintegrante del agua y al alto tránsito. Depende fundamentalmente de la utilización de agregados pétreos sanos, y duros, de un adecuado contenido de cemento asfáltico, de la compactación relativa de la mezcla, del contenido de vacíos, de la calidad del filler en el caso de usarse y de que el material que pasa el tamiz N°40 de la mezcla no tenga plasticidad.

b) Resistencia al deslizamiento.- Es necesario contar con un porcentaje de cemento asfáltico óptimo y con un porcentaje de vacíos adecuado. Un exceso de cemento asfáltico en la capa de rodamiento es la causa más común de deslizamiento; Bajo contenido de cemento asfáltico (o una falta de adherencia) y agregados que se pulan con el tránsito, originan una falta de fricción entre los neumáticos y el pavimento durante la acción del frenado, sobre todo en períodos de lluvia o alta humedad. Es necesario contar con un porcentaje de vacíos suficientes, como para el aumento de densidad de la mezcla por la reiteración de cargas, no sea motivo de afloración del cemento asfáltico.

c) Flexibilidad.- Es la capacidad de deformarse elásticamente que tiene la mezcla asfáltica, para acompañar sin agrietamientos, ni roturas, las pequeñas deflexiones que sufre la base bajo cargas, por otra parte debe tener cierto carácter plástico que le permita relajar las tensiones provocadas por las diferencias de temperatura y adaptarse al movimiento de las estructuras viales manteniendo uniforme e íntimo contacto con las capas de apoyo no asfálticas. Está influenciada por la rigidez del cemento asfáltico usado (medido por la penetración o la viscosidad y su susceptibilidad térmica), por un adecuado porcentaje de cemento asfáltico óptimo; por la relación filler-betún y por la relación estabilidad-fluencia.

d) Estabilidad.- Puede definirse como la resistencia a la deformación plástica de la mezcla bajo la acción del tránsito. La mezcla asfáltica compactada es sometida en estado de compresión semi-confinada a esfuerzos de corte. Depende su comportamiento de la forma, tamaño y textura superficial de los agregados; dureza y cubicidad de los mismos; características del cemento asfáltico; porcentaje óptimo del mismo; relación filler-betún y grado de compactación.

e) Compactabilidad.- La mezcla debe permitir una fácil distribución y una correcta densificación. Los factores que influyen son: tipo de cemento asfáltico; porcentaje óptimo del mismo, granulometría, textura y rugosidad del agregado y muy particularmente la forma de las partículas del agregado mineral y la relación filler-betún. Un adecuado porcentaje de arena natural redondeada, asegura una buena trabajabilidad.

El cumplimiento de estas cinco características mencionadas, involucra además de los factores mencionados para cada una de ellas, el especial cuidado de las temperaturas y procesos de mezclado, aplicación y compactación.

2.3.2. Componentes de mezclas asfálticas

Está compuesta de:

Asfalto de petróleo

Agregados pétreos.

2.3.2.1. Asfalto de petróleo

La American Society for Testing and Materials (ASTM) define al asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido, principalmente, por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos.

El betún según ASTM, es una sustancia ligante (sólida, semisólida o viscosa) oscura o negra, natural o artificial, compuesta principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular, como los asfaltos, alquitranes, breas y asfálticas.

Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas del agregado y por lo tanto es un excelente cemento para unir partículas del agregado en un pavimento de mezcla caliente.

El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de cemento asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daños químicos.

2.3.2.1.1. Propiedades del asfalto

Propiedades Químicas

Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, nitrógeno y otros elementos. El asfalto cuando es disuelto en un solvente como el heptano puede separarse en dos partes principales asfáltenos y máltenos,

Propiedades Físicas

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

2.3.2.1.2. Cementos Asfálticos

Son preparados especialmente por presentar cualidades y consistencias propias para su uso directo en la construcción de pavimentos asfálticos. Es un material ideal para aplicaciones en trabajos de pavimentación por sus propiedades aglutinantes, impermeabilizantes, flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a los ácidos y álcalis en general. Se clasifican de acuerdo a su consistencia medida por la viscosidad dinámica o absoluta y por su penetración (PEN).

Los asfaltos se producen por la refinación del petróleo en unidades de destilación primaria y de vacío. El producto obtenido del fondo de la destilación primaria (crudo reducido) es destilado a 26 mm Hg. de presión de vacío y alta temperatura (del orden de 700° F). El producto obtenido por los fondos de la torre de vacío se llama “Residual Asfáltico” o Cemento Asfáltico de Petróleo (CAP), semisólido a temperatura ambiente. Dicho CAP es obtenido a diferentes viscosidades las que miden su consistencia.

Los asfaltos obtenidos son denominados con la siguiente nomenclatura:

CAP PEN: 60/70 (Penetración 60 a 70).

CAP PEN: 85/100 (Penetración 85 a 100).

CAP PEN: 100/120 (Penetración 100 a 120).

2.3.2.2. Agregados

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 caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria, y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y el 85 por ciento, 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.

2.3.2.2.1. Clasificación de agregados

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

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.

Las rocas intrusivas, por otro lado, se forman a partir del magma que queda atrapado en las profundidades de la corteza terrestre. Al ser atrapado en la corteza, el magma se enfría y endurece lentamente, permitiendo la formación de una estructura cristalina.

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.

2.3.2.2. Fuentes de agregados

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

Agregados naturales

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua el movimiento del hielo, y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Los glaciares, por ejemplo, usualmente producen rocas y guijarros redondeados. Así mismos, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas.

Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena. La grava se define, usualmente, como partículas de un tamaño igual o mayor que 6.35 mm (1/4 pulgada). La arena se define como partículas de un tamaño menor que 6.35 mm (1/4 pulgada) pero mayor que 0.075 mm (N° 200). Las partículas de un tamaño menor que 0.075 mm (N° 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de 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 piedras 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.

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.

2.3.2.2.3. Propiedades de agregados

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica en caliente, el agregado conforma el 90 a 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación. Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aún más, un agregado que cumple con los requisitos de

costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Estas propiedades son:

Graduación

Tamaño máximo de partícula

Textura de la superficie

Limpieza

Capacidad de absorción

Dureza

Afinidad con el asfalto

Forma de la partícula

Peso específico

Cada una de estas propiedades importantes que debe poseer un agregado que será utilizado en pavimentación, se describen a continuación.

Graduación

Todas las especificaciones de mezcla asfáltica requieren que las partículas de agregado, estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas, esté presente en ciertas proporciones mediante el cribado de los agregados

Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado, es comúnmente llamada graduación del agregado o gradación del agregado.

Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

Tamaño máximo de partícula

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado utilizado.

Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas, estos se describen a continuación:

Tamaño máximo nominal de partícula, designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

Tamaño máximo de partícula, designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula, típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas de agregado.

Una mezcla de pavimentación, se clasifica de acuerdo a su tamaño máximo o a su tamaño máximo nominal.

La granulometría de las partículas es determinada por un análisis de tamices efectuado sobre las muestras de agregados. El análisis de tamices, consiste en pasar la muestra por una serie de tamices, cada uno de los cuales tiene aberturas de un tamaño específico.

Textura superficial

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento.

Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas.

Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento debido a que generalmente contienen superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula.

No existe un método directo para evaluar la textura superficial. Es tan solo una característica, como la forma de la partícula, que está reflejada en los ensayos de resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

Limpieza

Las especificaciones de la obra, generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales extraños que adulteran el agregado, generalmente estos materiales extraños los constituyen: vegetación, arcilla, partículas blandas, etc. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse usualmente, mediante inspección visual. Por un tamizado de lavado (donde el peso de la muestra de agregados antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No. 200).

Capacidad de absorción

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto, es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuara absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado.

Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso. Los agregados altamente porosos y absorbentes, no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables para su utilización en mezclas asfálticas, a pesar de su alta capacidad de absorción.

Dureza

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento.

Los agregados que están en, o cerca de la superficie, deben ser más duros, es decir deben tener más resistencia que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

El ensayo de Resistencia al Desgaste de Agregado Grueso de Tamaño Pequeño por Impacto y Abrasión en la Máquina de Los Ángeles (AASHTO T 96 o ASTM E 31), es la medida más común de la dureza en los agregados.

Este ensayo nos permite tener una idea, de la forma en que se comportaran los agregados, bajo los efectos de la abrasión causados por el tráfico, además nos proporciona una idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.

Los agregados intemperizados, tendrán valores de desgaste elevados, por lo que su uso será limitado o nulo dentro de un proyecto de pavimentación. Por lo tanto, este valor, es muy utilizado como un indicador de la relativa calidad de los agregados a utilizarse en pavimentación.

Afinidad con el asfalto

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto, los agregados que tienen alta afinidad con el asfalto son conocidos como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto; por consiguiente tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua.

Los agregados silíceos como: la cuarcita y algunos granitos, son algunos ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con mucha precaución.

No es muy claro por qué los agregados hidrofóbicos e hidrofílicos se comportan de tal manera. A pesar de esto, existen varios ensayos para determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos, la mezcla de agregado-asfalto sin compactar, es sumergida en agua, y las partículas cubiertas son observadas visualmente.

En otro ensayo, comúnmente conocido como ensayo de inmersión-compresión, dos muestras de mezcla son preparadas y una es sumergida en agua, posteriormente ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo a la susceptibilidad del agregado al desprendimiento.

Forma de la partícula

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida, la forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas.

El mejor entrelazamiento ocurre con partículas de bordes puntiagudos y de forma cubica, producidas casi siempre, por procesos de trituración. Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas, las partículas gruesas (grandes) de agregado, proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado, suministran la trabajabilidad

necesaria en la mezcla y generalmente provienen de arenas naturales.

La prueba de laboratorio más utilizada para medir la forma de las partículas es conocida como cubicidad de las partículas. Este método comprende el procedimiento de laboratorio para determinar las partículas chancadas (caras fracturadas), rodadas y lajeadas de la fracción retenida en la malla N° 4 (4.75 mm) de una muestra de agregados pétreos.

Peso específico

El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica), es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados en la mezcla, de acuerdo al peso.

Una tonelada de agregado de bajo peso específico, tiene un volumen mayor (ocupa un mayor espacio) que una tonelada de agregado con un peso específico más alto.

Por consiguiente para poder cubrir todas las partículas de agregado, mas asfalto debe ser adicionado a una tonelada de agregado con bajo peso específico (mayor volumen) que a una tonelada de agregado con un peso específico más alto (menos volumen).

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es: que este ayuda en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto porcentaje (en volumen) de vacíos o espacios de aire. Estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado

La única manera de calcular el porcentaje de vacíos de aire en un volumen dado de mezcla de pavimentación, es midiendo el peso específico de una muestra de la mezcla de pavimentación y luego, restando de su valor, los pesos específicos del agregado y el asfalto que conformara la mezcla, el resultado es una indicación del volumen de vacíos de aire en la muestra. Todos los agregados son hasta cierto punto porosos.

Se ha desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final; estos tres tipos son:

Peso específico bulk.

Peso específico aparente.

Peso específico efectivo.

La determinación de esta propiedad (peso específico) incluyendo los tres tipos ya mencionados, se logra mediante el ensayo de Gravedad Especifica y Absorción del Agregado.

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra. El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al saturar la muestra.

El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones, excepto en casos muy raros, es verdadera; sin embargo, el peso específico efectivo, el cual discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

2.3.3. Propiedades de las mezclas asfálticas

En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitudes a que están sometidas. Actualmente la modificación

de ligantes se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

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

Densidad de la mezcla.

Vacíos de aire, o simplemente vacíos.

Vacíos en el agregado mineral.

Contenido de asfalto.

2.3.3.1. Densidad de la mezcla

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

En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

2.3.3.2. Vacíos de aire (o simplemente vacíos)

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

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

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

2.3.3.3. Vacíos en el agregado mineral

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

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuanto mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos

valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla.

2.3.3.4. Contenido de cemento asfáltico

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

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

2.4. MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

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 experimentan niveles elevados de tránsito y gradientes de temperatura. Por lo general lo que se busca con este tipo de tecnología es mejorar algunas de las propiedades mecánicas y reológicas de los asfaltos y las mezclas asfálticas convencionales tales como la susceptibilidad térmica, la rigidez y la resistencia al envejecimiento, a las deformaciones plásticas y a la fatiga. Para modificar dichas propiedades, la tendencia actual es adicionar al asfalto (vía húmeda) o a la mezcla asfáltica (vía seca) aditivos poliméricos productos de desechos industriales con el fin de mitigar el impacto ambiental que éstos producen.

Los asfaltos modificados son el producto de la disolución o incorporación de un aditivo modificador (polímero o no polímero), que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades como: susceptibilidad a la temperatura, intervalo de plasticidad, cohesión, respuesta elástica, resistencia al agua y al envejecimiento.

Los modificadores aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos como la fatiga; reducen el agrietamiento, la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de la temperatura. Estos modificadores son adicionados al asfalto antes de mezclarlos con el material pétreo. (Heshmat, 1997).

Los ligantes asfálticos tradicionales tienen limitaciones en su respuesta a las cargas que día a día aumentan su frecuencia y su intensidad, sin olvidar la acción del clima que en muchos proyectos han generado ondulamientos y agrietamientos prematuros. En consecuencia es necesario buscar y desarrollar materiales más resistentes que alarguen el periodo de servicio y disminuyan los gastos de conservación. Los ligantes modificados han demostrado capacidad para mejorar el comportamiento de los tradicionales, dando la oportunidad de adecuarlos a unas condiciones específicas de respuesta en los proyectos. (Arenas Lozano, H. L., 2011).

Para la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas se realizaran ensayos Marshall, módulo dinámico y deformación permanente. Para el cemento asfáltico (CA) con y sin aditivo se realizaran ensayos de caracterización de asfaltos como penetración, punto de ablandamiento y viscosidad.

Un número de factores que incluyen el clima y la carga de tráfico influyen en el rendimiento de pavimento flexible. Hay una necesidad urgente de contar con la especificación basada en el desempeño y el uso de innovadores materiales de alto rendimiento para la construcción de pavimentos bituminosos. Al mejorar la resistencia y

durabilidad de las mezclas, la reducción del espesor de la capa y el aumento de la vida media puede ser conseguida.

Los principales objetivos que se encuentran dentro de diferentes proyectos de investigación con mezclas asfálticas modificadas se han concentrado en medir:

Deformación permanente (Ahuellamiento).

Desgaste (Cántabro).

Resistencia (Estabilidad Marshall).

Envejecimiento.

Comportamiento térmico.

Fatiga.

Adherencia.

Costos de la mezcla convencional vs. la modificada (economía).

Beneficios ambientales.

La influencia de adicionar nuevos materiales al asfalto.

Las bibliografías indican que para diferentes materiales con los que se modifica una mezcla asfáltica se tiene que ver la parte técnica-económica por lo cual los materiales que se adiciona son de porcentajes bajos. De los cuales se mencionan algunos:

- **Mezclas asfálticas modificadas con látex natural**

Presentan un aumento de la estabilidad en un 29% con respecto a la mezcla convencional en el porcentaje óptimo de asfalto y aditivo. Este tipo de mezcla muestra una tendencia a mejorar las propiedades de peso unitario y porcentaje de vacíos a medida que se adiciona el látex al asfalto. Con porcentajes a usar en la mezcla de 1% a 7% de látex natural.

- **Fibras de poliéster**

Cuando se adicionan estas fibras se produce una disminución de la estabilidad en las mezclas, debido a que la fibra no presenta resistencia significativa a cargas de compresión. Se observa además un ligero aumento del peso unitario con la adición de las fibras. Contrario a la estabilidad, adicionar poliéster a las mezclas produce un aumento del 139% de la resistencia última en el ensayo de tracción indirecta, con un contenido de fibras de 0.5% a 2%.

- **Caucho GCR**

En mezclas drenantes producen una disminución del porcentaje óptimo de asfalto de 5.1% (asfalto convencional) a un 4.6% (asfalto modificado). Además eleva la estabilidad en un 25%, sin presentar diferencias considerables en las otras propiedades. Se puede afirmar que la adición de caucho mediante el proceso por vía húmeda permite mejorar la resistencia a las cargas producidas por el tráfico, utilizando una menor proporción de ligante. Adicionar desperdicios elastoméricos a una mezcla asfáltica produce un aumento de la estabilidad y densidad. Este porcentaje varía entre 1% y 15%.

- **Desecho de PVC**

(En porcentajes de 0.5, 1.0 y 1.5% con respecto al peso de las briquetas) al asfalto con el fin de modificar mezclas drenantes, se genera una pérdida por desgaste Cántabro mayor que cuando se utiliza mezcla convencional. Los autores tienen como hipótesis que adiciones menores de desecho de PVC mejorarían el comportamiento de las mezclas drenantes.

- **Fibras metálicas, limadura de acero**

Cuando se adiciona fibras o limadura de acero a la mezcla asfáltica se reduce la deformación permanente aproximadamente entre un 15 y 25% cuando se compactan las briquetas a 50 golpes y esta disminución está entre 20 y 30% cuando se compactan a 75 golpes. Se observa además un aumento de la resistencia hasta

un 100 % en el ensayo de tracción indirecta y de la estabilidad, hasta un 40 %, con un contenido de fibras o limadura de 1% a 20%.

2.5.FALLAS EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

Según Rico y Del Castillo (1984), la tecnología que se ha desarrollado para pavimentos, tiene como meta evitar deterioros y fallas. Se han logrado establecer relaciones de causa - efecto, para desarrollar normas de criterio de proyecto y conservación. En pavimentos, la palabra falla se utiliza tanto para verdaderos colapsos como deterioros simples. El concepto de deterioro o falla está asociado al nivel de servicio que depende de la exigencia del consumidor. Una falla es algo que se aparta de lo que se consideró perfecto. Las fallas de los pavimentos pueden dividirse en tres grupos:

2.5.1. Falla por insuficiencia estructural

Pavimentos contruidos con material inapropiado en cuanto a resistencia. Se pueden utilizar materiales con buena calidad pero espesores insuficientes. Esta falla se produce por la combinación de la resistencia al esfuerzo cortante de cada capa y sus espesores.

2.5.2. Falla por defectos constructivos

Pavimentos bien proporcionados y con materiales de buena calidad pero que en su construcción se cometieron errores.

2.5.3. Falla por fatiga

Pavimentos que originalmente estuvieron bien proporcionados y contruidos, con el paso del tiempo y la continua repetición de cargas sufren efectos de fatiga, degradación estructural, pérdida de resistencia y acumulan deformaciones.

Aparte de estos tres grupos, también se agrupan por su origen, es decir por el modo en que suceden y se manifiestan. Se separan en tres nuevos grupos que son: por fracturamiento, por deformación y por desintegración. Se relacionan con el efecto

del tránsito, las características y estructuración del pavimento y el apoyo que proporciona la terracería. Las fallas por insuficiencia estructural, defecto constructivo o fatiga pueden ser a fin de cuentas causadas por el fracturamiento, la deformación y la desintegración (Rico y Del Castillo, 1984).

2.5.4. Fallas comunes en los pavimentos

Existen distintas fallas comunes en los pavimentos, entre ellas, se encuentra el agrietamiento en “piel de cocodrilo”, deformación permanente en la superficie del pavimento, fallas por cortante, agrietamiento longitudinal, consolidación del terreno de cimentación.

2.5.4.1. Agrietamiento en “Piel de cocodrilo”

Es un agrietamiento que se extiende sobre toda la superficie de rodamiento. Se da por el movimiento excesivo de una o más capas del pavimento o por fatiga de la carpeta. Es común en pavimentos contruidos en terracerías resilientes.

Es típico de bases débiles o insuficientemente compactadas. Puede formarse en lugares donde existe el congelamiento o en lugares que se requiere sub-drenaje. Este fenómeno puede ser progresivo generando la destrucción del pavimento, que comienza por desprenderse de la carpeta y la remoción de los materiales granulares expuestos. Es importante estudiar la causa, ya que si es por fatiga el progreso es muy lento, en cambio si es por deficiencia estructural o por exceso de agua el progreso es muy rápido.

2.5.4.2. Deformación permanente en la superficie del pavimento

De acuerdo con Rico y Del Castillo (1984), la deformación permanente en la superficie del pavimento está asociada al aumento de compacidad en las capas de base o sub-base, debida a cargas excesivas, cargas repetidas o rotura de granos. También

puede darse por consolidación en la sub-rasante. Por lo general, el ancho del surco es mayor al ancho de una llanta.

2.5.4.3. Fallas por cortante

Se debe a la falta de resistencia al esfuerzo cortante de la base o sub - base. En rara ocasión por falta de resistencia en la sub-rasante. Generalmente se hacen surcos profundos y bien marcados cuyo ancho no excede al de una llanta (Rico y Del Castillo, 1984).

2.5.4.4. Agrietamiento longitudinal

Grietas longitudinales de una abertura aproximada de 0.5 cm. en el área de circulación de las cargas más pesadas. Se deben a movimientos en las capas del pavimento en dirección horizontal. Este fenómeno, se da en la base, en la sub-base y con regularidad en la sub-rasante. El fenómeno se da por congelamiento, deshielo o por cambios volumétricos en la variación de agua en la sub-rasante.

2.5.4.5. Consolidación del terreno de cimentación

La consolidación del terreno de cimentación produce distorsión del pavimento independientemente de los espesores o de su condición estructural. Se pueden producir agrietamientos longitudinales y agrietamientos con trayectoria circular.

2.6. CONDICIÓN DE AUTO-REPARACIÓN

Durante los últimos años, son muchos los estudios que están siendo llevados a cabo en torno al análisis de la capacidad auto-reparadora de las mezclas bituminosas y de nuevas técnicas, existiendo actualmente cierta controversia sobre la verdadera capacidad para recuperar el daño producido en estos materiales. Por este motivo, el trabajo pretende demostrar este efecto mediante un procedimiento de ensayo que consiste en evaluar a

diferentes porcentajes de fibras metálicas en una mezcla, en la mejora de la resistencia, estabilidad y disminución del fisuramiento en la mezcla

Para ello, durante el estudio se tendrá en cuenta diferentes variables como el tipo de betún utilizado en la fabricación de la mezcla, el tipo de fibras metálicas a introducir.

En este sentido el ensayo para obligar a un estado de fisuramiento supone que el entremallado que se forma al interior de la mezcla genera una compresión en la mezcla que no permite que se siga fisurando la mezcla, fenómeno que hace que el material auto-reparante permita optimizar las tareas de conservación de carreteras y las mezclas bituminosas tenga capacidad auto-reparadora mejorando sus propiedades mecánicas y físicas.

Gracias a la adición de este material a la mezcla se planea reducir la disgregación de materiales pétreos de la carpeta asfáltica, el cuál es un problema presente en las vías del país, aumentando así su vida útil, lo que podría reducir costos y tiempo de mantenimiento. En la práctica, las mezclas convencional y modificada con fibras metálicas son diseñadas con el método Marshall. El método Marshall brinda como resultado valores de estabilidad de ambas mezclas, siendo este el parámetro mecánico que servirán como indicador para la comparación entre las distintas mezclas experimentales realizadas en esta investigación.

Se ha comprobado que las fibras metálicas ayudan a incrementar la resistencia mecánica de los pavimentos, permitiendo que estos tengan una mayor resistencia frente a las cargas de tráfico.

La auto-reparación se denomina a la capacidad de cerrarse las fisuras abiertas como efecto de las fibras metálicas ante la contracción de las mallas de acero originadas en el interior de la mezcla

Es mucho más barato mantener una carretera en buenas condiciones que tener que reconstruirla entera una vez que se hallan deterioradas.

2.7. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

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

Suficiente asfalto para asegurar durabilidad.

Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.

Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.

Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.

Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.

Las gravedades específicas de masa de todos los agregados usados y la gravedad específica del asfalto sean determinados para poderse usar en los análisis de densidad y vacíos.

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

2.7.1. Método Marshall

Los conceptos originales para el Diseño Marshall fueron desarrollados por Bruce Marshall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi, y rediseñado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estado Unidos en los años 40. Después se hicieron avances

y el desarrollo de especificaciones de materiales por organizaciones como el Cuerpo de Ingenieros y el Instituto del Asfalto.

Como cualquier otro método de diseño de pavimentos, el punto de partida es obtener muestras de materiales representativos de aquellos que serán usados para el proyecto. Este método usa unas muestras estándar de 2 ½ pulgadas de alto y 4 pulgadas de diámetro. Estos se preparan usando un procedimiento específico para calentamiento, mezclado y compactado de las mezclas de agregado y asfalto. Las dos características principales del método de Marshall, son las de análisis de densidad y vacíos en la mezcla y los resultados de estabilidad y flujo de las muestras compactadas.

2.7.2. Criterios para el diseño Marshall

Tabla 2.3. Requerimiento para mezclas con Cemento Asfáltico diseñadas con el Método Marshall

Criterios para mezcla del método Marshall	Tránsito liviano carpeta y base		Tránsito mediano carpeta y base		Tránsito pesado carpeta y base	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (756)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0.25mm (0.01pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver tabla 2.4.					
% VFA	70	80	65	78	65	75

Fuente: The Asphalt Institute

Tabla 2.4. Porcentaje mínimo de V.M.A.

Tamaño máximo		VMA mínimo, por ciento (%)		
		Vacíos de diseño, por ciento (%)		
(mm)	(Pulg)	3	4	5
1.18	No. 16	21.50	22.50	23.50
2.36	No. 8	19.00	20.00	21.00
4.75	No. 4	16.00	17.00	18.00
9.50	3/8	14.00	15.00	16.00
12.50	½	13.00	14.00	15.00
19.00	¼	12.00	13.00	14.00
25.00	1.00	11.00	12.00	13.00
37.50	1.50	10.00	11.00	12.00
50.00	2.00	9.50	10.50	11.50
63.00	2.50	9.00	10.00	11.00

Fuente: The Asphalt Institute

2.7.3. Determinación del porcentaje óptimo de ligante

Existen cuatro procedimientos en el desarrollo del método de Marshall que conllevan a la obtención del porcentaje óptimo de ligante de la mezcla:

Determinación de la densidad aparente o peso específico total de probetas.

Determinación del contenido de vacíos de las probetas de cada serie del ensayo.

Ensayos de estabilidad y fluencia Marshall.

Aplicación de criterios para determinar el porcentaje óptimo de ligante.

La base del método es, como ya se dijo, el ensayo Marshall, que implica el moldeo y ensayo de probetas y la evaluación de los resultados obtenidos.

Las probetas de ensayo de las distintas series tentativas son preparadas con cantidades diferentes de asfalto. Es común emplear 5 ó 6 series de probetas que abarquen un abanico de porcentajes alrededor de este 6%. Una práctica habitual es fabricar probetas con 4.0%,

4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%, aunque el rango de pruebas estará finalmente determinado en base a la experiencia previa que se tenga con los agregados disponibles y el tipo de mezcla a formular.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

1. El asfalto y la composición de los agregados se calientan por separado, a una temperatura similar, definida por la viscosidad del ligante que, para mezclas densas y semidensas, se sugiere que sea de 1,8 poise para el mezclado y cuyo valor surge del nomograma de Heukelom de viscosidades vs. temperaturas. Algunos investigadores aconsejan que la temperatura de áridos esté unos grados centígrados por debajo de la correspondiente al asfalto, más que nada para evitar el posible “choque térmico” que se daría si las partículas inertes tuviesen mayor energía calórica que el ligante y que derivaría en un envejecimiento prematuro de éste.
2. Luego se procede al mezclado en el laboratorio, que puede ser manual o, preferentemente, mecánico, hasta que todas las partículas de agregados estén recubiertas de asfalto. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
3. Se coloca la mezcla asfáltica caliente en un molde Marshall pre-calentado como preparación para la compactación. La cantidad de mezcla a colocar será tal que se asegure una altura final compactada de alrededor de 63.5 mm. Como el volumen de la probeta una vez desmoldada es de poco más de 500 cm³, conociendo las densidades individuales de los materiales y el valor medio de los límites de porcentaje de vacíos totales especificado es posible estimar esa cantidad de mezcla, el cual en general suele rondar los 1200 gramos.
4. Usando el dispositivo compactador Marshall (una especie de maza cilíndrica o martillo que se desliza por una guía y que se deja caer sobre la mezcla contenida en el molde), las probetas son compactadas mediante 50 o 75 golpes por cara, dependiendo de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Después de completada la compactación, las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

2.8. FIBRAS METÁLICAS

Las fibras de acero Dramix surgen en 1970 luego de 10 años de investigación y desarrollo; hoy son la mejor opción en el mercado mundial. La marca Dramix es parte de Bekaert, la empresa independiente de alambre y derivados más grande del mundo que reporta ventas anuales por 13 billones de euros.

Es la marca líder mundial en fibras de acero para reforzamiento de hormigón desarrollada por Bekaert.

Las Fibras metálicas, son producidas a partir de alambres de acero de bajo contenido de carbono. Actúan como una armadura tridimensional reduciendo las tensiones aplicadas al elemento estructural aumentando así su resistencia. El uso de las Fibras metálicas proporciona un mejor comportamiento, ya que reducen la formación de fisuras, proporcionando una mejor calidad y durabilidad de los elementos.

De acuerdo a su estructura o forma, estas pueden utilizarse en distintas aplicaciones como los son las fibras onduladas o fibras en forma de gancho, que de acuerdo a su forma presentan un anclaje.

Las fibras de acero se pueden obtener por diferentes métodos; el más común consiste en fabricarlas por corte de alambre trefilado, de acero, de bajo contenido en carbono.

El diámetro de los alambres está comprendido entre 1,05 mm y 0,55 mm.

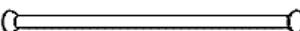
La longitud de las fibras puede variar entre 10 mm. y 60 mm.

Las fibras están disponibles en diferentes relaciones de longitud / diámetro en todas las series Dramix®. Se suministran en paquetes de diferentes tamaños, desde bolsas de 10 y 20 kg a sacos de gran capacidad para aplicaciones a gran escala.

2.8.1. Tipos de fibras metálicas

Tipos de fibras según su forma:

Cuadro 2.1. Tipos de fibras metálicas

Tipos de fibras según su forma	Esquema
Recta de sección circular	
Recta de sección rectangular	
Ondulada	
Recta con extremos en forma de cono	
Recta con extremos en forma de gancho	
Rectas con extremos chatos	

Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

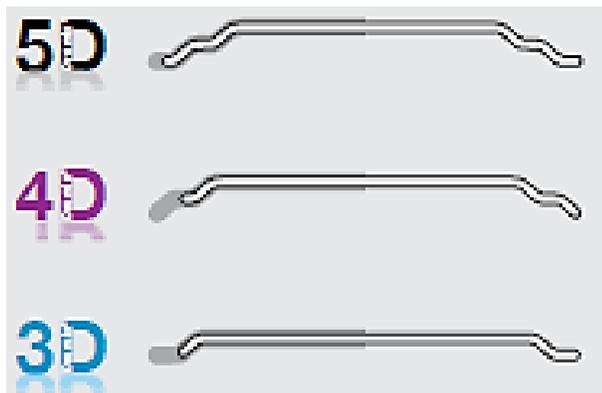
Fibras metálicas rectas con extremos en forma de gancho

La exclusiva forma de las nuevas fibras Dramix® 5D y 4D ya habla por sí sola. Diseñadas a la perfección, las nuevas fibras de acero Dramix® ofrecen niveles de anclaje, resistencia a la tracción y ductilidad hasta ahora no disponibles y que garantizan el máximo rendimiento. Al mismo tiempo, permiten al sector de la construcción utilizar el refuerzo con fibra de acero en un amplio campo de aplicaciones nuevas. Cualquiera que sea su proyecto, Dramix® le ofrece la mejor solución posible.

Las fibras de acero Dramix® para refuerzo de hormigón se ofrecen en tres series.

- La serie Dramix® 3D se utiliza en aplicaciones comunes que no requieran resistencias muy elevadas.
- Dramix® 4D está diseñada para actuar sobre fisuras de entre 0,1 y 0,3 mm, proporcionando superficies resistentes e hidrófugas. También se utilizan como refuerzo en sistemas de armado tradicionales.
- Dramix® 5D se utiliza en aplicaciones estructurales de alta resistencia, desde losas de cimentación a estructuras suspendidas. Las fibras están provistas de un gancho indeformable y de un alambre dúctil que se alarga mientras el gancho permanece en sitio, lo que aumenta tanto la resistencia como la ductilidad del hormigón.

Figura 2.3. Fibras metálicas con extremos en forma de gancho



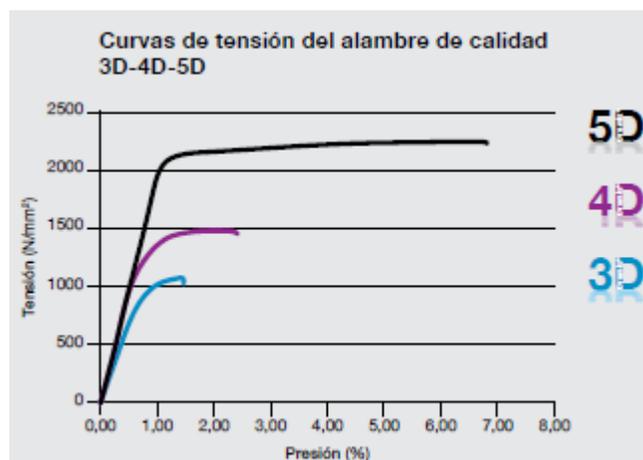
Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

2.8.2. Características

Resistencia a tracción

La resistencia a la tracción de las series 5D, 4D y 3D ofrece diferentes niveles de rendimiento en las diferentes aplicaciones. La serie 5D combina una resistencia a la tracción extrema con una capacidad de alargamiento muy específica, proporcionando unos niveles de ductilidad nunca vistos.

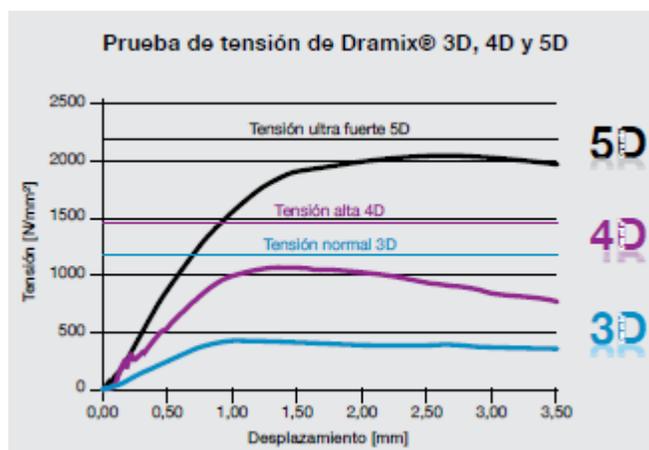
Gráfica 2.1. Curva de tensión vs presión



Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

La prueba de tensión muestra claramente las diferencias de trabajo de los tres tipos de fibra Dramix®. El gancho en las series 3D y 4D se deforma lentamente durante el proceso de tensión, mientras que el gancho 5D permanece firmemente anclado, pero el alambre se alarga creando mayor ductilidad.

Gráfica 2.2. Curva de tensión vs desplazamiento



Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

Resistencia de anclaje

Las terminaciones de gancho de Dramix® 3D aseguran la tensión que se busca en la fibra. El anclaje mejorado de Dramix® 4D utiliza el mismo principio, pero se traduce en una resistencia del acero mayor. Dramix® 5D, por el contrario, se ha formado para conseguir el anclaje perfecto, el mecanismo de tensión se ha reemplazado por el estiramiento de la fibra.

Resistencia del alambre

La resistencia a la tracción de una fibra de acero tiene que aumentar paralelamente a la resistencia de su anclaje. Sólo de esta manera la fibra puede resistir las fuerzas que actúan sobre ella.

Por otro lado, un alambre más fuerte no puede utilizarse con un diseño de anclaje común.

Por lo tanto la resistencia a la tracción de una fibra tiene que estar perfectamente alineada con el sistema de su anclaje y con su diámetro. Dramix® 3D, 4D y 5D están diseñadas por separado para sacar el máximo provecho a la resistencia del alambre.

Ductilidad del alambre

Dramix® 3D y 4D crean la ductilidad del alambre mediante la deformación lenta del gancho durante el proceso de tensión.

Esto es diferente con Dramix®5D, el alambre se alarga, proporcionando la ductilidad mediante el mismo principio que el refuerzo de acero clásico.

Esto sólo es posible con un alambre de acero dúctil con una calidad superior y excepcional.

Especificaciones técnicas

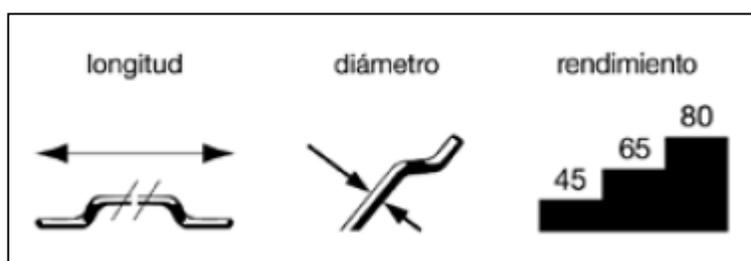
Tabla 2.5. Especificaciones técnicas de las fibras metálicas

Tipo de fibra	Dramix 3D 65/35 BG	Dramix 3D 45/35 BL	Dramix 3D 80/60 BG-BL	Dramix 4D 55/60 BG-BL	Dramix 5D 65/60 BG-BL
Longitud (L)	35 mm	35 mm	60 mm	60 mm	60 mm
Diámetro (D)	0.55 mm	0.75 mm	0.75 mm	1.05 mm	0.90 mm
Relación de esbeltez (L/D)	65	45	80	55	65
Resistencia a la tracción	1345 N/mm ²	1225 N/mm ²	1225 N/mm ²	1500 N/mm ²	2300 N/mm ²
Presentación	Encolada	Suelta	Encolada/ suelta	Encolada/ Suelta	Encolada/ Suelta

Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

Gracias a la nomenclatura, basada en las principales características de nuestras fibras, se puede reconocer de una forma clara, rápida y sencilla.

Figura 2.4. Nomenclatura de las fibras metálicas empleadas



Fuente: Ficha técnica BEKAERT

2.8.3. Ventajas

La fibra tiene dobleces en los extremos que permite mejorar adherencia.

Alta resistencia a tracción.

Alta absorción de energía por medio del alambre trefilado de bajo contenido de carbono.

Elimina el habilitado y colocación de malla y varillas convencionales por la sustitución de estos materiales con fibras de acero.

De fácil aplicación.

Distribución homogénea.

Aumento de la capacidad de carga.

Reduce la formación de fisuras.

Mejor comportamiento a las variaciones de temperatura.

Mayor resistencia a la fatiga y al impacto.

Mayor durabilidad del pavimento por tener mejor control de fisuras.

Las fibras de acero Dramix son desarrolladas y elaboradas por Bekaert y cuentan con todo el respaldo que da el tener la marcación (CE) de la Comunidad Europea bajo norma EN 14889-1, clasificándolas como sistema nivel o clase 1. Esta clasificación las califica como fibras de acero de uso estructural.

CAPÍTULO III

INVESTIGACIÓN SOBRE EL EFECTO DE AUTO-REPARACIÓN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1. SELECCIÓN DE MATERIALES

3.1.1. Materiales pétreos

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales para la realización de mezclas asfálticas, pero el criterio asumido para escoger el banco de materiales fue por la disponibilidad más práctica que se tenía. Ya que el banco escogido fue el que dispone la alcaldía, ubicada en la comunidad de La Pintada cuyo material es procedente de Sunchuhuayco, esta planta produce agregados pétreos para la realización de pavimento flexible para las vías urbanas.

La planta asfáltica está ubicada sobre la ruta fundamental F001, en el tramo Tarija-Bermejo.

Se escogió los siguientes materiales: agregado grueso de 3/4", agregado intermedio de 3/8" y agregado fino.

Ubicación geográfica

Las coordenadas geográficas de la entrada de la planta asfáltica y trituradora de agregados son:

Latitud: 21°37'0.82" S.

Longitud: 64°38'38.24" O.

Zona: 20

Imagen 3.1. Ubicación de la planta de asfaltos y trituradora de agregados de la alcaldía



Fuente: Google earth

3.1.2. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico a usar provisionado de la planta asfáltica de SEDECA, ubicado en la comunidad de Charaja. El cemento es de procedencia brasilera de la empresa STRATURA ASFALTOS S.A., Betupen Plus 85-100.

La planta de asfaltos de SEDECA está ubicado en sobre la ruta 45, tramo Chocloca-Juntas.

Ubicación geográfica

Las coordenadas geográficas de la entrada de la planta asfáltica y trituradora de agregados de SEDECA son:

Latitud: 21°46'54.71" S.

Longitud: 64°46'09.95" O.

Zona: 20

Imagen 3.2. Ubicación de la planta de asfaltos y trituradora de agregados de SEDECA



Fuente: Google earth

3.1.3. Fibras metálicas

Las fibras metálicas a emplear para la realización de este proyecto de investigación fue las que importa la empresa Geomallas con ubicación en la ciudad de Tarija, barrio 6 de Agosto, avenida Circunvalación N° 867, entre calles Santa Cruz y Segundino Ugarte, única sucursal en Bolivia de la empresa Beakeart de origen alemán, marca de fibras metálicas Dramix 3D.

Imagen 3.3. Ubicación de la empresa Geo-Mallas



Fuente: Google earth

3.2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

3.2.1. Granulometría

La granulometría de un árido es la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido, determinada de acuerdo con el A0506 del manual técnico de diseño de carreteras.

Se procedió a realizar el análisis granulométrico por el método de la vía seca.

Procedimiento

Hacer secar la muestra por un periodo de 24 horas en horno a temperatura entre 100-110 °C. Tomar una muestra de 5 Kg aproximadamente, y tamizar de forma mecánica inicialmente y después un tamizado final que tiene que ser manual.

Pesar el material retenido en cada tamiz.

Imagen 3.4. Muestra seca sacada del horno agregado grueso



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.5. Muestra seca agregado intermedio (gravilla)



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.6. Muestra seca agregado intermedio (gravilla)



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.7. Juego de tamices para granulometría



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.8. Obtención de pesos retenidos en cada tamiz



Fuente: Elaboración Propia

Cálculos

Muestra 1, granulometría del agregado grueso para tamiz de $\frac{3}{4}$ ".

Peso retenido acumulado

$$\text{Retenido acumulado} = \text{Retenido acumulado}_i + \text{Peso retenido}_{i-1}$$

$$\text{Retenido acumulado} = 508.96 \text{ g}_{(3/4'')} + 0.00 \text{ g}_{(1'')}$$

$$\text{Retenido acumulado} = 508.96 \text{ g}$$

Porcentaje retenido

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Retenido acumulado}_i}{\text{Peso total seco}} * 100$$

$$\% \text{ Retenido} = \frac{508.96 \text{ g}}{5000 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{ Retenido} = 10.18 \%$$

Porcentaje que pasa del total

$$\% \text{ Que pasa del total} = 100 \% - \% \text{ Retenido}$$

$$\% \text{ Que pasa del total} = 100 \% - 10.18 \%$$

$$\% \text{ Que pasa del total} = 89.82 \%$$

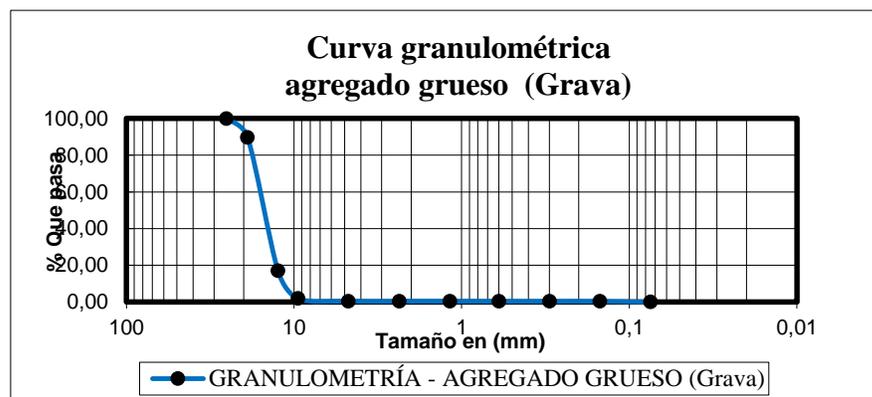
Tabla 3.1. Tabla de resultados de lo granulometría del agregado grueso (Grava)

Peso total seco 5000.00 (g)					
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acumulado (g)	% Retenido	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	508.96	508.96	10.18	89.82
1/2"	12.5	3633.68	4142.64	82.85	17.15
3/8"	9.50	758.29	4900.93	98.02	1.98
Nº4	4.75	72.28	4973.21	99.46	0.54
Nº8	2.36	1.00	4974.21	99.48	0.52
Nº16	1.18	1.60	4975.81	99.52	0.48
Nº30	0.60	1.90	4977.71	99.55	0.45
Nº50	0.30	0.80	4978.51	99.57	0.43
Nº100	0.15	0.50	4979.01	99.58	0.42

N°200	0.075	19.29	4998.30	99.97	0.03
Base	-	1.70	5000.00	100.00	0.00
	Suma	5000.00			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1. Curva Granulométrica del agregado grueso (Grava)



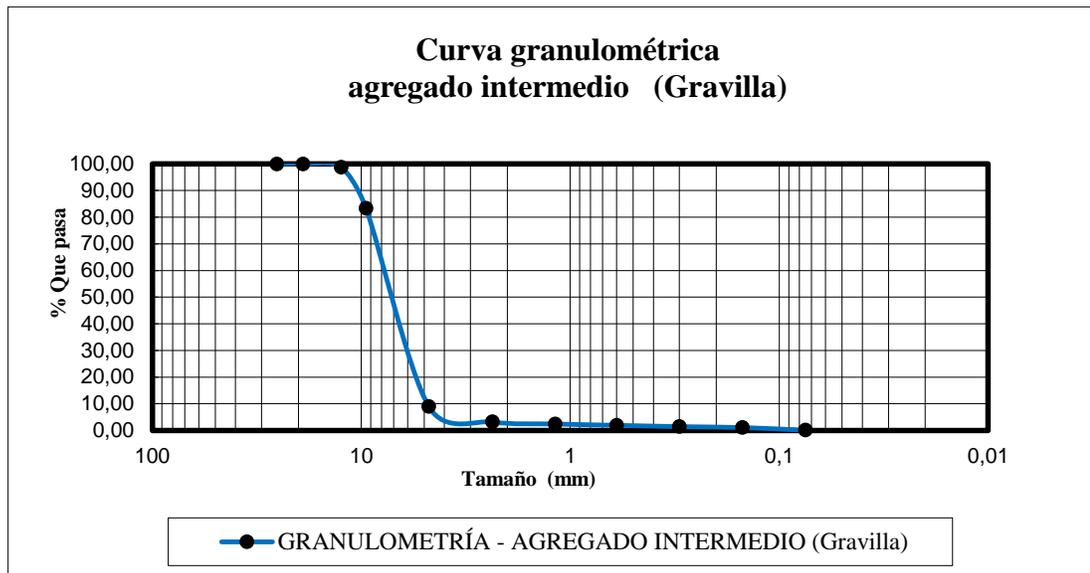
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2. Tabla de resultados de lo granulometría del agregado intermedio (Gravilla)

Peso total seco 5000.00 (g)					
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret (g)	% 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	63.00	63.00	1.26	98.74
3/8"	9.50	766.95	829.94	16.60	83.40
N°4	4.75	3721.59	4551.53	91.03	8.97
N°8	2.36	289.65	4841.18	96.82	3.18
N°16	1.18	38.50	4879.67	97.59	2.41
N°30	0.60	24.17	4903.84	98.08	1.92
N°100	0.15	42.10	4945.94	98.92	1.08
N°200	0.075	50.73	4996.67	99.93	0.07
Base	-	3.33	5000.00	100.00	0.00
	Suma	5000.00			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2. Curva Granulométrica del agregado intermedio (Gravilla)



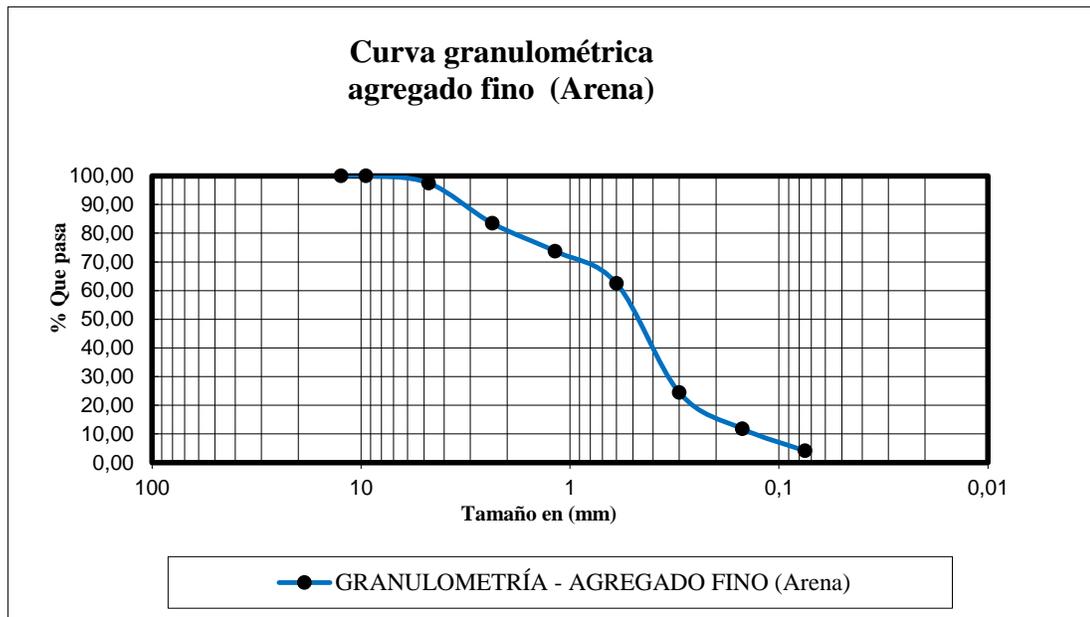
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3. Tabla de resultados de la granulometría del agregado fino (Arena)

Peso total seco 5000.00 (g)					
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Retenido Acumulado (g)	% 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
N°4	4.75	127.45	127.45	2.55	97.45
N°8	2.36	700.12	827.57	16.55	83.45
N°16	1.18	487.30	1314.87	26.30	73.70
N°30	0.60	558.52	1873.39	37.47	62.53
N°50	0.30	1905.48	3778.87	75.58	24.42
N°100	0.15	630.63	4409.50	88.19	11.81
N°200	0.075	385.30	4794.80	95.90	4.10
Base	-	205.20	5000.00	100.00	0.00
	Suma	5000.00			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.3. Curva Granulométrica del agregado fino (Arena)



Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Peso específico y porcentaje de absorción

3.2.2.1. Peso específico a granel, con superficie seca y saturado y la absorción de agua en agregados gruesos (ASTM E 127 AASHTO T85-91)

Este método establece los procedimientos para determinar el peso específico real, el peso específico neto y la absorción de agua en áridos gruesos.

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

Densidad o peso específico de pétreos:

Cociente entre la masa y el volumen de un material pétreo a una temperatura determinada. Se expresa normalmente en Kg/m³.

Peso específico aparente, a granel o peso específico bruto:

Considera el volumen macizo de las partículas de un pétreo más el volumen de los poros y de los huecos. Corresponde a la capacidad de la medida que lo contiene.

Peso específico neto:

Se considera el volumen macizo de las partículas de material pétreo más el volumen de los poros inaccesibles.

Peso específico real:

Se considera el volumen macizo de las partículas de material pétreo, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles de esas partículas.

Peso específico real saturado superficialmente seco:

Es el que considera la masa del pétreo seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.

Peso específico seco:

Peso específico real en que se considera solamente la masa del pétreo seco.

Este ensayo sirve para determinar los pesos específicos aparente y nominal, así como la absorción, después de 24 horas de sumergidos en agua, de los agregados con tamaño igual o mayor a 4.75 mm (tamiz N°4).

Procedimiento

Lavar el agregado hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de partículas, se seca en horno a temperatura de 100°-110°C.

Sumergir en agua por 24 horas, se seca el agregado superficialmente haciendo rodar sobre un paño absorbente húmedo hasta que desaparezca la película visible de agua adherida. Secar individualmente las partículas mayores manteniendo el árido, cubrir con un paño húmedo hasta el momento de pesar. Efectuar toda la operación en el menor tiempo posible y se toma el dato del árido saturado superficialmente seco, registrar el valor en “B”.

Determinar la masa del pétreo saturado superficialmente seco, pesar a temperatura ambiente, colocar la muestra inmediatamente en el canastillo porta muestra, sumergiendo el canastillo en agua a $20 \pm 3^\circ \text{C}$, por un período de al menos 3 minutos, determinar la masa sumergida, aproximando a 1 g. Registre su valor como “C”. Mantener el canastillo y su contenido totalmente sumergido durante la operación, procurar que el elemento de suspensión del canastillo tenga la menor dimensión posible, a fin de minimizar su efecto sobre los resultados.

Retirar la muestra del canastillo y vaciar completamente del recipiente, cuidando de no dejar partículas atrapadas.

Secar la muestra hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$, determinar la masa de la muestra seca, pesar a temperatura ambiente, aproximando a 0.1g, registrar su valor como “A”

Imagen 3.9. Secado superficial del agregado pétreo saturado



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.10. Obtención del peso de las muestras saturadas superficialmente seca.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.11. Muestra sumergida



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.12. Muestras secas del horno después de 24 horas



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Muestra 1, pesos específicos y porcentaje de absorción del agregado grueso (grava)

Ecuaciones

$$\text{P.E. a granel} = \frac{A}{B - C} * 1000$$

$$\text{P.E. saturado sup. seco} = \frac{B}{B - C} * 1000$$

$$\text{P.E. aparente} = \frac{A}{A - C} * 1000$$

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

Donde:

P.E.= Peso específico (Kg/m³)

A= Masa del agregado seco (g).

B= Masa del agregado saturado superficialmente seco (g).

C= Masa de agregado sumergido (g)

(B-C)= Término que representa pérdida de peso de la muestra sumergida y significa por lo tanto el volumen de agua desplazado o el volumen de la muestra.

Peso específico a granel o real del árido seco:

$$\text{P.E. a granel} = \frac{A}{B - C} * 1000 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$$\text{P.E. a granel} = \frac{3550.10 \text{ g}}{3600.60 \text{ g} - 2206.00 \text{ g}} * 1000$$

$$\text{P.E. a granel} = 25.45.60 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

Peso específico del pétreo saturado superficialmente:

$$\text{P.E. saturado sup. seco} = \frac{B}{B - C} * 1000 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$$\text{P.E. saturado sup. seco} = \frac{3600.60 \text{ g}}{3600.60 \text{ g} - 2206.00 \text{ g}} * 1000$$

$$\text{P.E. saturado sup. seco} = 2581.82 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

Peso específico aparente:

$$\text{P.E. aparente} = \frac{A}{A - C} * 1000 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$$\text{P.E. aparente} = \frac{3550.10 \text{ g}}{3550.10 \text{ g} - 2206.00 \text{ g}} * 1000$$

$$\text{P.E. aparente} = 2641.25 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

Porcentaje de absorción:

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (\%)$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{3600.60 \text{ g} - 3550.10 \text{ g}}{3550.10 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = 1.42 \quad (\%)$$

Tabla 3.4. Datos de las muestras de agregado grueso (grava) para el peso específico

Muestra N°	Peso muestra Secada "A" (g)	Peso muestra Saturada con sup. seca "B" (g)	Peso muestra Saturada dentro Del agua "C" (g)
1	3550.10	3600.60	2206.00
2	3547.10	3597.40	2205.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5. Resultados de peso específico agregado grueso (grava)

	Peso específico a granel (Kg/m ³)	Peso específico Saturado con sup. seca (Kg/m ³)	Peso específico aparente (Kg/m ³)	Porcentaje de absorción (%)
	2545.60	2581.82	2641.25	1.42
	2547.47	2583.60	2642.95	1.42
Promedio	2546.54	2582.71	2642.10	1.42

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6. Datos de las muestras de agregado intermedio (gravilla) para el peso específico

Muestra N°	Peso muestra Secada "A" (g)	Peso muestra saturada con sup. seca "B" (g)	Peso muestra Saturada dentro Del agua "C" (g)
1	3927.70	4006.20	2451.00
2	3921.80	4000.10	2445.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7. Resultados de peso específico agregado intermedio (gravilla)

	Peso específico a granel (Kg/m ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (Kg/m ³)	Peso específico aparente (Kg/m ³)	Porcentaje de absorción (%)
	2525.53	2576.00	2659.78	2.00
	2521.90	2572.25	2655.61	2.00
Promedio	2523.71	2574.12	2657.69	2.00

Fuente: Elaboración propia

Nota: se valida los valores promedio para 2 muestras gemelas cuando los pesos específicos tienen una variación igual o inferior a 20 Kg/m³ y una diferencia igual o inferior a cuatro décimas porcentuales en la determinación del porcentaje de absorción de agua.

3.2.2.2. Método para determinar el peso específico a granel, saturado con superficie seca, peso específico aparente y la absorción de agua en agregados finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00)

Este método establece los procedimientos para determinar el peso específico a granel, saturado con superficie seca, peso específico aparente y la absorción de agua en áridos finos, es aplicable a los áridos finos de peso específico neto entre 2.000 y 3.000 kg/m³, que se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Definiciones de los pesos específicos están mencionados en el anterior subtítulo.

Absorción de agua:

Masa de agua necesaria para llevar un material pétreo del estado seco al estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje referido a la masa del pétreo seco.

Procedimiento

Homogenizar la muestra y eliminar el material de tamaño superior al tamiz N°4, se selecciona, por cuarteo una cantidad máxima a 1000 g, saturar por 24 horas.

Secar la muestra superficialmente con una secadora, para colocar en un molde cónico que se apisona 25 golpes con una varilla en 3 capas, para finalizar enrasar el cono y retirar el cono y ver que la muestra no este demasiado seca, ni tampoco húmeda.

Tomar 500g de esta muestra para el matraz , llenar el matraz hasta la marca de aforo en 500 ml, hacer rodar el matraz con cuidado de no perder material ni agua con el objeto de eliminar vacíos del agregado fino, pesar la masa del agregado fino más el matraz y el agua hasta su marca de aforo en 500 ml.

Sacar la muestra por completo del matraz para llevar a al horno entre 100-110°C, por 24 horas dejar enfriar a temperatura ambiente y pesar.

Imagen 3.13. Muestra retirada del cono, saturada superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.14. Peso del agregado fino más el matraz y agua



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.15. Peso de la muestra secada en horno



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Muestra 1, pesos específicos y porcentaje de absorción del agregado fino (arena).

Peso específico a granel o real del árido seco:

$$\text{P.E. a granel} = \frac{A}{V-W} * 1000 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$$\text{P.E. a granel} = \frac{489.70 \text{ g}}{500 \text{ g} - 301.20 \text{ g}} * 1000$$

$$\text{P.E. a granel} = 2463.28 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

Peso específico del pétreo saturado superficialmente:

$$\text{P.E. saturado sup. seco} = \frac{500}{V - W} * 1000 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$$\text{P.E. saturado sup. seco} = \frac{500}{500 \text{ g} - 301.20 \text{ g}} * 1000$$

$$\text{P.E. saturado sup. seco} = 2515.09 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

Peso específico aparente:

$$\text{P.E. aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)} * 1000 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$$\text{P.E. aparente} = \frac{489.70 \text{ g}}{(500 \text{ g} - 301.20 \text{ g}) - (500 \text{ g} - 489.70 \text{ g})} * 1000$$

$$\text{P.E. aparente} = 2597.88 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

Porcentaje de absorción:

$$\% \text{ de absorción} = \frac{\text{Peso de la muestra} - A}{\text{Peso de la muestra}} * 100 \quad (\%)$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{500 \text{ g} - 489.70 \text{ g}}{(500 \text{ g} - 301.20 \text{ g}) - (500 \text{ g} - 489.70 \text{ g})} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = 2.06 \text{ (\%)}$$

Donde:

P.E.= Peso específico (Kg/m³)

A= Masa del agregado fino seco (g).

V= Volumen del matraz (ml) o (g)

W= Peso del agua agregado al matraz (ml) o (g)

Tabla 3.8. Datos de las muestras de agregado fino (arena) para el peso específico

Muestra N°	Peso muestra (g)	Peso de matraz (g)	Muestra + matraz+ agua (g)	Peso del agua agregado al matraz "W" (ml) ó (g)	Peso muestra secada "A" (g)	Volumen del matraz "V" (ml)
1	500.00	171.70	972.90	301.20	489.70	500.00
2	500.00	171.70	973.70	302.00	489.60	500.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9. Resultados de peso específico agregado fino (arena)

	P. E. A granel (Kg/m ³)	P. E. Saturado con Sup. seca (Kg/m ³)	P. E. aparente (Kg/m ³)	Porcentaje de absorción (%)
	2463.28	2515.09	2597.88	2.06
	2472.73	2525.25	2609.81	2.08
Promedio	2468.00	2520.17	2603.84	2.07

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99)

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

Procedimiento

Pesar los tamaños de las fracciones correspondientes al grado elegido, de acuerdo con la tabla 3.10. Registrar la masa total de material por ensayar como masa inicial de muestra (m_i), aproximado a 0.1g. Colocar la masa inicial de material en la máquina de los ángeles, de acuerdo con el grado elegido seleccionar el número de esferas y número de revoluciones según la tabla 3.10.

Una vez completado el número de revoluciones, sacar el material de la máquina de los ángeles evitando pérdidas, efectuar un primer tamizado con un tamiz N°8 o superior para evitar dañar el tamiz N°12, el cual sirve para separar el material desgastado

Lavar el material que se retiene en el tamiz N°12, llevar al horno a temperatura de 100-110 °C por 24 horas, pesar el material seco y registrar como masa final (m_f).

Tabla 3.10. Grado de ensaye definidos por su rango de tamaño

Gradación		1	2	3	4	5	6	7
Diámetro		Cantidad de material a emplear (g)						
Pasa	Retenido							
3"	2 1/2 "	2500±50						
2 1/2"	2"	2500±50						
2"	1 1/2"	5000±50	5000±50					
1 1/2"	1"		5000±50	5000±25	1250±25			
1"	3/4"			5000±25	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		10000±100	10000±75	10000±50	5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Número de esferas		12			12	11	8	6
N° de revoluciones		1000			500			

Fuente: Manual de carreteras V4-A ASTM E-131

Imagen 3.16. Muestra sacada de la máquina de los ángeles a 500 revoluciones



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.17. Muestra separada por el tamiz N°12 y lavada



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.18. Masa final del ensayo de desgaste de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Muestra 1, agregado grueso gradación 5.

- Desgaste de los ángeles

$$P = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100 \quad (\%)$$

$$P = \frac{(5002.70 \text{ g} - 3661.00 \text{ g})}{5002.70 \text{ g}} * 100$$

$$P = 26.82 \quad (\%)$$

Donde:

P= Pérdida de masa de la muestra o porcentaje de desgaste

m_i = Masa inicial de la muestra (g).

m_f = Masa final de la muestra (g).

Tabla 3.11. Datos para el ensayo de desgaste de los ángeles agregado grueso (grava)

Gradación 5		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido (g)
3/4"	1/2"	2500.40
1/2"	3/8"	2502.30
Total		5002.70

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12. Resultados del porcentaje de desgaste de los ángeles agregado grueso (grava)

Gradación	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Porcentaje de desgaste (%)	Especificación ASTM
5	5002.70	3661.00	26.82	35% Max.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13. Datos para el ensayo de desgaste de los ángeles agregado intermedio (gravilla)

Gradación 6		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido (g)
3/8"	1/4"	2503.00
1/4"	N°4	2500.70

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14. Resultados del porcentaje de desgaste de los ángeles agregado intermedio (gravilla)

Gradación	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Porcentaje de desgaste (%)	Especificación ASTM
6	5003.70	3630.80	27.44	35% Max.

Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Equivalente de arena (ASTM D 2419)

Este ensayo tiene por objeto asignar un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino, polvo nocivo o material arcilloso presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular.

Procedimiento

Hacer pasar el material por el tamiz N°4 para tener una muestra representativa, con ayuda del embudo verter la muestra aproximada a 40 g de arena en el cilindro graduado. Golpear varias veces el fondo del cilindro con la palma de la mano para liberar las burbujas de aire y remojar la muestra completamente, 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 aproximadamente, al finalizar el periodo de sedimentación, leer y anotar los niveles alcanzados

Imagen 3.19. Ensayo de equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Muestra 2, equivalente de arena

$$\text{Eq. arena} = \frac{H_1}{H_2} * 100 \quad (\%)$$

$$\text{Eq. arena} = \frac{9.85 \text{ cm}}{11.40 \text{ cm}} * 100$$

$$\text{Eq. arena} = 86.40 \quad (\%)$$

Donde:

Eq= Equivalente de arena (%)

H₁= Nivel de arena (cm)

H₂= Nivel total arena más filler (cm)

Tabla 3.15. Datos y resultados para el ensayo de equivalente de arena

Nº de Muestra	H1 (cm)	H2 (cm)	Equivalente de Arena (%)
1	9.15	11.00	83.18
2	9.85	11.40	86.40
3	9.80	11.45	85.59
Promedio			85.06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16. Resultados de caracterización de agregados y comparaciones con la norma ASTM

Ensayos	Especificación		Resultado	Norma
	Mínimo	Máximo		
Peso específico de agregado grueso 3/4" (Tn/m ³)	2	3	2.55	ASTM E 127
Peso específico de agregado intermedio 3/8" (Tn/m ³)	2	3	2.52	ASTM E 127
Peso específico de agregado fino (Tn/m ³)	2	3	2.47	ASTM E 128
Absorción de agregado grueso 3/4" (%)	---		1.42	ASTM E 127
Absorción de agregado intermedio 3/8" (%)	---		2.00	ASTM E 127
Absorción de agregado fino (%)	---		2.07	ASTM E 128
Desgaste de los ángeles agregado grueso 3/4" (%)		35	26.82	ASTM E 131
Desgaste de los ángeles agregado intermedio 3/8" (%)		35	27.44	ASTM E 131
Equivalente de arena (%)	50		85.06	ASTM D 2419

Fuente: Elaboración propia

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

3.3.1. Ensayo de penetración (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.

Procedimiento

Separar una muestra de 400 a 500 gramos de material, colocar en un recipiente que se calienta cuidadosamente hasta que este fluido, vaciar en 3 moldes. Dejar enfriar a temperatura ambiente y colocar en baño María por 25 minutos a 25 °C.

Una vez transcurrido el tiempo de inmersión, aproximar la aguja del penetrómetro hasta que la punta toque la superficie de la muestra, sin que penetre.

Se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado. Finalmente se lee y anota la distancia, expresada en decimas de milímetros, que haya penetrado la muestra.

Imagen 3.20. Ensayo de penetración



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Promedio de la muestra 1:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Lec1} + \text{Lec2} + \text{Lec3}}{3} \quad (\times 10^{-1} \text{ mm})$$

$$\text{Promedio} = \frac{86 + 90 + 93}{3} \quad (\times 10^{-1} \text{ mm})$$

$$\text{Promedio} = 89.67 \quad (\times 10^{-1} \text{ mm})$$

Promedio de las tres muestras:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{prom. 1} + \text{prom. 2} + \text{prom. 3}}{3} \quad (\times 10^{-1} \text{ mm})$$

$$\text{Promedio} = \frac{89.67 + 93.67 + 89.33}{3} \quad (\times 10^{-1} \text{ mm})$$

$$\text{Promedio} = 90.89 \quad (\times 10^{-1} \text{ mm})$$

Tabla 3.17. Datos y resultado del ensayo de penetración

Penetración	Muestra	Lectura 1 (x10-1 mm)	Lectura 2 (x10-1 mm)	Lectura 3 (x10-1 mm)	Promedio (x10-1 mm)
Temperatura=25°C Tiempo= 5 s Carga= 100 g	1	86	90	93	89.67
	2	100	91	90	93.67
	3	94	86	88	89.33
Promedio					90.89

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Ensayo de peso específico (ASTM D-70)

Se tiene como peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al peso igual de agua de agua a la misma temperatura, a los 25 °C.

Procedimiento

Limpiar el matraz para la calibración, después que ha secado, pesar con aproximación de 0.01 g, desinar este peso como “A”.

El peso del matraz más agua destilada hasta la marca de aforo designar con la letra “B”.

Calentar con cuidado la muestra, hasta que este fluida para que pueda ser vertida en el matraz, hasta que alcance aproximadamente 30 ml, acondicionar a una temperatura de 25 °C en baño maría, pesar y designar este valor como “C”.

Llenar el matraz hasta su marca de aforo con agua destilada, también acondicionar a una temperatura de 25 °C y designar este valor de peso como “D”.

Los pesos que contienen el agua destilada y/o cemento asfáltico deben ser acondicionados durante media hora a la temperatura de 25°C y a baño maría.

Imagen 3.21. Ensayo de peso específico, acondicionamiento de muestras



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.22. Ensayo de peso específico de cemento asfáltico, determinación de la masa de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Cálculos y resultados

Muestra 3, peso específico del cemento asfáltico:

$$\text{P. E. de cemento asfáltico} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)} * 0.99713 * 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{P. E. Cemento Asf.} = \frac{(61.29 \text{ g} - 33.98\text{g})}{(81.06 \text{ g} - 33.98\text{g}) - (81.25 - 61.29)} * 0.99713 * 1000$$

$$\text{P. E. de cemento asfáltico} = 1004.12 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$P. E. \text{ promedio} = \frac{P. E. \text{Muestra 1} + P. E. \text{Muestra 2} + P. E. \text{Muestra 3}}{3}$$

$$P. E. \text{ promedio} = 1004.15 \text{ Kg/m}^3 \quad \text{ó} \quad 1.004 \text{ g/cm}^3$$

Donde:

A= Peso del matraz vacío (g)

B= Peso del matraz más agua (g)

C= Peso del matraz más cemento asfáltico (g)

D= peso del matraz, cemento asfáltico y agua (g)

P.E.= Peso específico del cemento asfáltico (Kg/m^3)

Tabla 3.18. Datos y resultado del ensayo de peso específico del cemento asfáltico

Muestra	Peso matraz vacío "A" (g)	Peso matraz +agua "B"(g)	Peso de matraz +C.A "C"(g)	Peso de matraz +C.A.+agua "D" (g)	P.E. del cemento asfáltico (Kg/m^3)
1	33.73	81.49	64.79	81.72	1004.57
2	32.81	78.87	61.61	79.06	1003.75
3	33.98	81.06	61.29	81.25	1004.12
Promedio					1004.15

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Ensayo de ductilidad (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, se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas, el ensayo se efectúa a una temperatura de 25 ± 0.5 °C y a una velocidad de $5 \text{ cm/min} \pm 5\%$.

Procedimiento

El material se calienta cuidadosamente, hasta que este lo suficientemente fluido para para verterlo en los moldes.

Preparar el molde poniendo en la base un material lubricante, obtenido de la mezcla de vaselina líquida con talco para que no se adhiera el cemento asfáltico a la base del molde normalizado. Echar cuidadosamente el cemento asfáltico fluido hasta el borde del molde dejar enfriar a temperatura ambiente por media hora, después sumergir a baño maría por media hora a 25 °C.

Enganchar los anillos de cada extremo de los clips a las clavijas del ductilímetro y sepárelos a la velocidad uniforme especificada hasta la ruptura de la briqueta, lecturar la distancia a la que ocurrió la ruptura.

Nota: se debe tener cuidado con la formación de burbujas ya que estas pueden suspender el cemento asfáltico cuando esté en su punto más delgado.

Imagen 3.23. Ensayo de ductilidad, acondicionamiento de muestras a temperatura ambiente y a 25°C



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.24. Ensayo de ductilidad, proceso de elongación de las muestras



Fuente: Elaboración propia

Cálculos y resultado.

- Promedio de las tres muestras:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{ensayo 1} + \text{ensayo 2} + \text{ensayo 3}}{3} \quad (\text{cm})$$

$$\text{Promedio} = \frac{125.00 \text{ cm} + 135 \text{ cm} + 140 \text{ cm}}{3}$$

$$\text{Promedio} = 133.33 \text{ cm}$$

Tabla 3.19. Resultado del ensayo de ductilidad

Ductilidad	Muestra	Lectura (cm)
Temperatura=25°C	1	125.00
	2	135.00
	3	140.00
Promedio		133.33

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Ensayo de punto de inflamación mediante la copa abierta de cleveland (ASTM D-92)

El punto de inflamación del cemento asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra y crean un “destello” en presencia de una llama abierta.

Procedimiento

Llenar la copa con cemento asfáltico, hasta la marca de enrase. Colocar el termómetro de capacidad 360°C por encima de 6.50 mm de la base de la copa. Cuando la temperatura de la muestra este por debajo del punto de llama esperado, disminuir el calor y empezara a pasar un fosforo por encima de la superficie para ir controlando la temperatura y el punto de inflamación, la lectura sobre el termómetro será el punto de inflamación.

Imagen 3.25. Ensayo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

Cálculos y resultado

- Promedio de dos muestras

$$\text{Promedio} = \frac{\text{ensayo 1} + \text{ensayo 2}}{2} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\text{Promedio} = \frac{298\text{ }^\circ\text{C} + 296\text{ }^\circ\text{C}}{2}$$

$$\text{Promedio} = 297\text{ }^\circ\text{C}$$

Tabla 3.20. Resultado del ensayo de punto de inflamación

Punto de inflamación	Muestra	Lectura (°C)
	1	298.00
	2	296.00
Promedio		297.00

Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Ensayo de punto de ablandamiento (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. En 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

Punto de ablandamiento es la menor temperatura a la que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra se calienta mediante incrementos a una velocidad prescrita, en un baño de agua.

Procedimiento

Colocar cuidadosamente cemento asfáltico en los dos anillos sobre una base de vidrio, que tiene que estar lubricado, para luego retirar los anillos y poner dentro del aparato de punto de ablandamiento, y sobre las muestras colocar una esfera de acero.

Someter el aparato a una temperatura de 5°C, y de golpe ir haciendo subir la temperatura en baño maría, hasta que las muestras son forzadas a caer 25 mm y la lectura del termómetro indica su punto de ablandamiento.

Imagen 3.26. Ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Cálculos y resultado

- Promedio de dos muestras

$$\text{Promedio} = \frac{\text{ensayo 1} + \text{ensayo 2}}{2} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\text{Promedio} = \frac{50^\circ\text{C} + 52^\circ\text{C}}{2}$$

$$\text{Promedio} = 51^\circ\text{C}$$

Tabla 3.21. Resultado del ensayo de punto de ablandamiento

Punto de ablandamiento	Muestra	Lectura (°C)
	1	50.00
	2	52.00
Promedio		51.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.22. Resultados de la caracterización de cemento asfáltico y comparación con la norma ASTM

Ensayos	Especificación		Resultado	Norma
	Mínimo	Máximo		
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s. (1/10mm)	85	100	90.89	ASTM D-5
Peso específico (Kg/m ³)	1000	1005	1004.15	ASTM D-71
Ductilidad (cm)	100	--	133.33	ASTM D-113
Punto de inflamación (°C)	232	--	297	ASTM D-92
Punto de ablandamiento (°C)	42	--	51	ASTM D-36

Fuente: Elaboración propia

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS METÁLICAS

Resistencia a la tracción

$$R = 1225 \text{ N/mm}^2$$

Tolerancias = $\pm 7.5\%$ promedio

$$\text{Módulo de Young} = \pm 210000 \text{ N/mm}^2$$

Geometría

Longitud (l)= 60 mm

Diámetro (d)= 0.75 mm

Proporción (l/d)= 80

Imagen 3.27. Fibras metálicas



Fuente: Elaboración propia

3.5. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO DE MARSHALL PARA OBTENER EL CONTENIDO ÓPTIMO

3.5.1. Equipo

Molde de Compactación:

Consiste de una placa de base plana, molde y collar de extensión cilíndricos. El molde tiene un diámetro interior de 101.6 mm (4") y altura aproximada de 76.2 mm (3"); la placa de base plana y el collar deben ser intercambiables.

Martillo de compactación:

Con base plana circular de apisonado de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un pisón de 4.54 kg (10 lb.) de peso total, cuya altura de caída es de 457.2 mm (18").

Extractor de Muestras de Asfaltos:

Para extraer el espécimen del molde, en forma de disco con diámetro de 100 mm (3.95") y 12.7 mm (1/2") de espesor.

Soporte para molde o porta-molde:

Dispositivo con resorte de tensión diseñado para sostener rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal.

Mordaza:

Consiste de dos semi-cilindros, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") de acero enchapado para facilitar su fácil limpieza. El segmento inferior termina en una base plana con dos varillas perpendiculares que sirven de guía.

Medidor de Estabilidad:

La resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 20 kN (2039 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 50 N (5 kgf) hasta 5 kN (510 kgf) y 100 N (10 kgf) hasta 20 kN (2 039 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm.

Horno:

Horno capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 3 °C, se emplea para calentar los agregados.

Termómetros blindados:

De 10°C a 360°C para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 3°C.

Balanza:

Para pesar agregado y asfalto de 6100 g de capacidad, y sensibilidad de un 0.01g, para pesar probetas compactadas de 1200 g.

3.5.2. Granulometría de la mezcla

Tabla 3.23. Pesos de agregados retenidos a diferentes porcentajes

Fuente: Elaboración propia

Tamices	tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	Total
		Peso Ret. a 5000 (g)	Peso Ret. a 5000 (g)	Peso Ret. a 5000 (g)	al	al	Al	Peso Ret.
					0.24	0.22	0.54	1
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.0	508.96	0.00	0.00	122.15	0.00	0.00	122.15
1/2"	12.5	3633.68	63.00	0.00	872.08	13.86	0.00	885.94
3/8"	9.50	758.29	766.95	0.00	181.99	168.73	0.00	350.72
N°4	4.75	72.28	3721.59	127.45	17.35	818.75	68.82	904.92
N°8	2.36	1.00	289.65	700.12	0.24	63.72	378.07	442.03
N°16	1.18	1.60	38.50	487.30	0.38	8.47	263.14	271.99
N°30	0.60	1.90	24.17	558.52	0.46	5.32	301.60	307.37
N°50	0.30	0.80	25.10	1905.48	0.19	5.52	1028.96	1034.67
N°100	0.15	0.50	17.00	630.63	0.12	3.74	340.54	344.40
N°200	0.075	19.29	50.73	385.30	4.63	11.16	208.06	223.85
BASE	-	1.70	3.33	205.20	0.41	0.73	110.81	111.95
Suma		5000.00	5000.00	5000.00	1200.00	1100.00	2700.00	5000.0

En la presente investigación se realiza la mezcla de agregados provenientes de la planta de asfaltos de la Alcaldía Municipal.

Para el diseño de dicha faja se utilizó los materiales que se disponía, tanto para el agregado grueso, intermedio y fino; con lo cual se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 24% de agregado grueso de 3/4", 22% de agregado intermedio de 3/8", y 54% de agregado fino.

A continuación se muestra la granulometría formada y sus rangos según especificaciones:

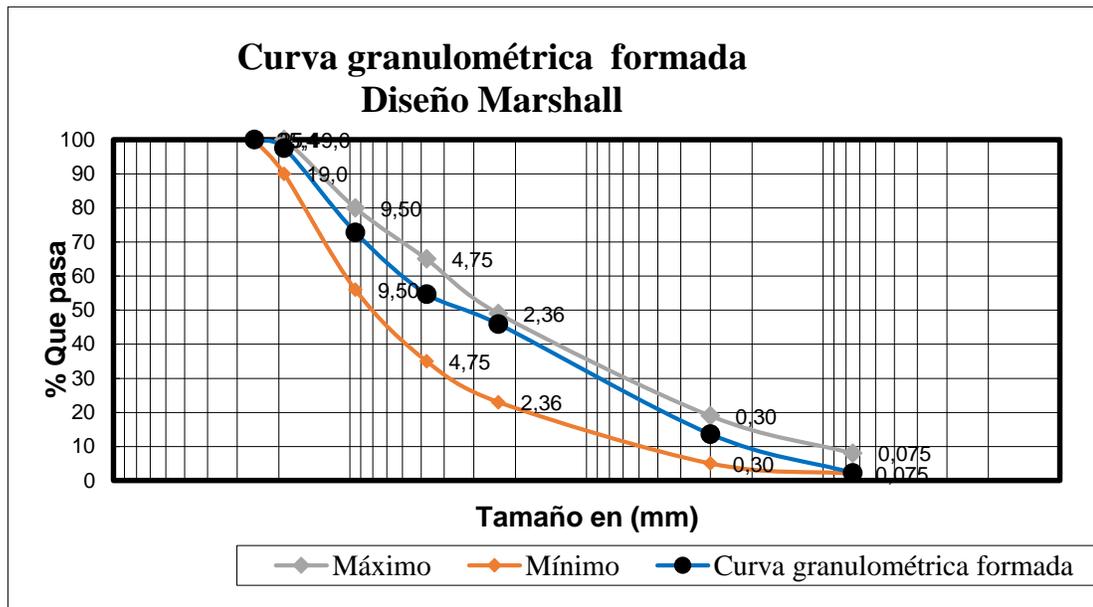
Tabla 3.24. Granulometría formada y especificaciones

Tamices	Tamaño (mm)	Peso total Ret.	Ret. Acum. (g)	% Retenido	% Que pasa del total	Especificaciones	
		(g)				Mínimo	Máximo
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.0	122.15	122.15	2.44	97.56	90	100
1/2"	12.5	885.94	1008.09	20.16	79.84	-	-
3/8"	9.50	350.72	1358.81	27.18	72.82	56	80
Nº4	4.75	904.92	2263.73	45.27	54.73	35	65
Nº8	2.36	442.03	2705.76	54.12	45.88	23	49
Nº16	1.18	271.99	2977.75	59.56	40.44	-	-
Nº30	0.60	307.37	3285.12	65.70	34.30	-	-
Nº50	0.30	1034.67	4319.80	86.40	13.60	5	19
Nº100	0.15	344.40	4664.20	93.28	6.72	-	-
Nº200	0.075	223.85	4888.05	97.76	2.24	2	8
Base	-	111.95	5000.00	100.00	0.00	-	-
Suma		5000.00					

Fuente: Elaboración propia

Finalmente la gráfica que indica que la granulometría está dentro de los parámetros establecidos por la norma.

Grafico 3.4. Granulometría formada



3.5.3. Determinación de la cantidad aproximada de cemento asfáltico

Para la determinación del contenido óptimo del cemento asfáltico se procede a realizar el diseño de 15 briquetas mediante el método de Marshall, con porcentajes diferentes de cemento asfáltico para conocer el porcentaje óptimo a utilizar.

- Determinación de la cantidad aproximada de cemento asfáltico:

$$\%A = 0.020 a + 0.035 b + K * c + F$$

- Calculo de F y de %A:

$$F = (\% \text{grava} * \% \text{abs.}) + (\% \text{gravilla} * \% \text{abs.}) + (\% \text{arena} * \% \text{abs.})$$

$$F = (0.24 * 1.42) + (0.22 * 2.00) + (0.54 * 2.07)$$

$$F = 1.8986$$

$$\%A = 0.020 a + 0.035 b + K * c + F$$

$$\%A=0.020 *54.12 + 0.035 43.64 +0.20*2.24 +1.8986$$

$$\%A= 4.96 \% \approx 5.00 \%$$

Donde:

$\%A$ = Porcentaje de cemento asfáltico.

a = Porcentaje retenido en el tamiz N°8 (%).

b = Porcentaje que pasa el tamiz N° 8 y se retiene en el tamiz N°200 (%).

c = Porcentaje que pasa el tamiz N°200

F = Porcentaje de absorción de los agregados

K= 0.15 si el porcentaje que retiene el tamiz de 3/4" esta entre 11-15 (%).

K=0.18 si el porcentaje que retiene el tamiz de 3/4" esta entre 6-10 (%).

K=0.20 si el porcentaje que retiene el tamiz 3/4" es de 5 o menos (%).

Los porcentajes para los que se trabajaran en las diferentes briquetas son las siguientes:

-0.50 % de contenido aproximado de cemento asfáltico= 4.50%

+0.50 % de contenido aproximado de cemento asfáltico= 5.00%

+1.00 % de contenido aproximado de cemento asfáltico= 5.50%

+1.50 % de contenido aproximado de cemento asfáltico= 6.00%

+2.00 % de contenido aproximado de cemento asfáltico= 6.50%

Preparación de las probetas

Para la dosificación se utilizó la granulometría ya calculada anteriormente.

Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico se va a preparar 5 grupos de briquetas para la mezcla de agregados, de forma que las curvas que representen los

resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido, cada grupo con diferentes contenidos de cemento asfáltico. Este contenido varía con el incremento de ± 0.5 % de un grupo a otro.

De esta forma varían los pesos de los agregados según varíe la proporción de cemento asfáltico

Tabla 3.25. Grupos de briquetas para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico

Grupo de contenido de cemento asfáltico (%)	N° de muestras
4.50	3
5.00	3
5.50	3
6.00	3
6.50	3
Total	15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.26. Pesos de los agregados y cemento asfáltico para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico

Contenido de cemento asfáltico (%)	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%	6.50%
Porcentaje de Agregado (%)	95.50%	95.00%	94.50%	94.00%	93.50%
Peso del Cemento asfáltico (g)	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de Grava (g)	275.04	273.60	272.16	270.72	269.28
Peso de Gravilla (g)	252.12	250.80	249.48	248.16	246.84
Peso de Arena (g)	618.84	615.60	612.36	609.12	605.88
Peso total de la briketa (g)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

La anterior tabla muestra las cantidades de agregado y cemento asfáltico a utilizar para realizar las briquetas y obtener los diferentes puntos, de esta manera mediante las gráficas encontrar un porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño de la mezcla asfáltica.

3.5.4. Desarrollo de las briquetas

Antes de preparar la mezcla asfáltica, se debe calentar el conjunto de molde y la base de compactación a una temperatura entre 100-150 °C. Por un lado se pesa en fuentes los distintos tipos de los agregados calculados para una briqueta de 1200 g, por otro lado se calienta el cemento asfáltico a una temperatura superior a 100 °C, hasta que este fluido.

Mezclar los agregados con el cemento asfáltico, agitar durante el calentamiento de la mezcla para evitar sobrecalentamientos locales y evitar un envejecimiento prematuro de la mezcla asfáltica.

Cuando la mezcla haya alcanzado los 140°C, se debe vaciar con una cuchara en el molde abierto, previamente pasado con un poco de aceite, para el desmolde de briqueta y un papel filtro en la base, para que la muestra se pueda quitar fácilmente después de haber enfriado.

El molde tiene un diámetro interior de 4", la compactación se hace usando un martillo de 10 lb de peso, el martillo tiene una altura de caída libre de 18".

Para el diseño de la mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 15 briquetas, con las dosificaciones indicadas en la tabla 3.26.

Se extraen las muestras con la ayuda de un gato hidráulico.

Imagen 3.28. Proceso de elaboración de briquetas



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.29. Briquetas finalizadas



Fuente: Elaboración propia

3.5.5. Ensayos para determinar la densidad de la mezcla

La densidad real es la que considera el volumen macizo de la probeta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles.

Para calcular la densidad real de la mezcla se usa el método con superficie saturada seca, ya que este método se emplea para muestras con porcentajes de absorción menores a 2%.

Procedimiento.-

Dejar secar las muestras a temperatura ambiente, pesar y registrar este valor como “A”. Sumergir en baño de agua a 25 ± 1 °C por 5 minutos, secar superficialmente, pesar y llamar este valor como “B”. Sumergir la muestra y el peso registrar con “C”.

Imagen 3.30. Ensayos para determinar la densidad de la mezcla



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Briqueta 1

- Porcentaje de absorción:

$$\text{Abs} = \frac{B - A}{B - C} * 100 \quad (\%)$$

$$\text{Abs} = \frac{1186.5 \text{ g} - 1185.3 \text{ g}}{1186.5 \text{ g} - 651 \text{ g}} * 100$$

$$\text{Abs} = 0.22 \%$$

- Densidad real:

$$\text{Densidad} = \frac{A}{B - C} \quad \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$$

$$\text{Densidad} = \frac{1185.3 \text{ g}}{1186.5 \text{ g} - 651 \text{ g}}$$

$$\text{Densidad} = 2.21 \quad \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$$

Donde:

A= Masa de la probeta al aire (g).

B= Masa de la probeta al aire superficie seca (g).

C= Masa de la probeta sumergida (g).

Tabla 3.27. Densidades promedio de las mezclas asfálticas a diferentes porcentajes de cemento asfáltico

Contenido de cemento asfáltico (%)	Muestra	Masa de la briqueta seca "A"(g)	Masa de la briq. Saturada superf. Seca "B"(g)	Masa de la briq. Sumergida "C" (g)	Porcentaje de absorción (%)	Densidad real de la mezcla (g/cm3)	Densidad promedio de la mezcla (g/cm3)
4.5	1	1185.30	1186.50	651.00	0.22	2.21	2.21
	2	1183.26	1184.10	647.00	0.16	2.20	
	3	1201.61	1201.72	656.00	0.02	2.20	
5	4	1189.55	1189.57	652.00	0.00	2.21	2.22
	5	1183.20	1183.20	650.00	0.11	2.22	
	6	1192.63	1192.68	656.00	0.01	2.22	
5.5	7	1174.29	1174.90	648.00	0.12	2.23	2.23
	8	1174.17	1174.74	647.00	0.11	2.22	
	9	1204.40	1204.75	665.00	0.07	2.23	
6	10	1184.87	1185.21	653.00	0.06	2.23	2.23
	11	1198.05	1198.76	663.00	0.13	2.24	
	12	1173.70	1174.65	650.00	0.18	2.24	
6.5	13	1176.17	1176.59	645.00	0.08	2.21	2.22
	14	1190.36	1190.59	655.00	0.04	2.22	
	15	1185.08	1185.85	656.00	0.15	2.24	

Fuente: Elaboración propia

3.5.6. Ensayos de estabilidad y fluencia

Una vez que se haya obtenido los valores para calcular la densidad se debe medir con un vernier en 4 puntos de la briqueta, las alturas, para sacar un promedio y usar un factor de corrección.

Antes de realizar el ensayo las muestras deben ser sumergidas en baño de agua a $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo de 25 minutos, no mayor a 30 minutos.

Se limpia las superficies de las mordazas, se debe verificar previamente la aplicación de la carga, que es el indicador del dial del anillo, que se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Se coloca la briqueta en las mordazas y se aplica la carga a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto, hasta que se produce 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 el valor de “Estabilidad Marshall”, el cual después se anotara como Kilogramo fuerza, para el sistema que se maneja en el medio.

Mientras se realiza el ensayo de estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (flujo), en posición sobre la varilla guía, leer y anotar como valor de flujo de la briqueta, expresado en milímetros (mm).

Imagen 3.31. Ensayo de Marshall



Fuente: Elaboración propia

Cálculos y resultados

- Briquetas 7,8 y 9 para un porcentaje de cemento asfáltico de 5.5 %.
- Lectura de dial de briqueta 7

Lectura = 910 mm

$$\text{Carga} = (0.012 * \text{Lec.} - 0.0812) * 102 * 2.20 \text{ (lb)}$$

$$\text{Carga} = (0.012 * 910 - 0.0812) * 102 * 2.20$$

$$\text{Carga} = 2432.23 \text{ lb}$$

Los factores de corrección para las diferentes alturas se encuentran en anexos

$$\text{Carga corregida} = \text{Carga} * \text{Factor de corrección}$$

$$\text{Carga corregida} = 2432.23 \text{ lb} * 0.956$$

$$\text{Carga corregida} = 2325.94 \text{ lb}$$

Después se realiza un promedio de las 3 briquetas corregidas:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{briqueta}_7 + \text{briqueta}_8 + \text{briqueta}_9}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{2325.94 \text{ lb} + 2286.21 \text{ lb} + 2254.29 \text{ lb}}{3}$$

$$\text{Promedio} = 2288.81 \text{ lb}$$

Finalmente se convierte al sistema que se maneja en el medio (SI):

$$1 \text{ lb} = 0.4535923 \text{ Kg}$$

$$\text{Estabilidad} = 2288.81 \text{ lb} * 0.4535923$$

$$\text{Estabilidad} = 1038.19 \text{ kg}$$

El flujo es la lectura del dial para flujo.

Tala 3.28. Resultados del ensayo de estabilidad y fluencia para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico

Contenido de cemento asfáltico (%)	Muestra	Lectura dial (mm)	Carga (lb)	Factor de correc. de altura	Estabilidad real corregida (lb)	Estabilidad promedio (lb)	Estabilidad promedio (kg)	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio (0.01 pulg)
4.5	1	820.00	2189.87	0.92	2020.16	2029.33	920.49	150.00	0.06	5.64
	2	830.00	2216.80	0.92	2046.66			140.00	0.06	
	3	835.00	2230.27	0.91	2021.18			140.00	0.06	
5	4	860.00	2297.59	0.93	2138.07	2169.04	983.86	140.00	0.06	5.64
	5	875.00	2337.98	0.94	2196.30			150.00	0.06	
	6	855.00	2284.12	0.95	2172.75			140.00	0.06	
5.5	7	910.00	2432.23	0.96	2325.94	2288.81	1038.19	150.00	0.06	5.77
	8	890.00	2378.37	0.96	2286.21			150.00	0.06	
	9	900.00	2405.30	0.94	2254.29			140.00	0.06	
6	10	950.00	2539.94	0.94	2382.82	2382.14	1080.52	150.00	0.06	5.91
	11	960.00	2566.87	0.94	2408.08			150.00	0.06	
	12	955.00	2553.40	0.92	2355.51			150.00	0.06	
6.5	13	900.00	2405.30	0.98	2357.19	2315.78	1050.42	160.00	0.06	6.17
	14	910.00	2432.23	0.95	2302.15			160.00	0.06	
	15	890.00	2378.37	0.96	2287.99			150.00	0.06	

Fuente: Elaboración propia

3.5.7. Contenido óptimo de cemento asfáltico

Se debe realizar los cálculos del porcentaje de vacíos total de la mezcla y la relación betumen vacíos (R.B.V.). De las cuales se obtendrá el valor de contenido de cemento asfáltico a 4% de vacíos y 75% de R.B.V.

Cálculos y resultados

Briquetas 7,8 y 9 al 5.5% de cemento asfáltico:

Densidad máxima teórica:

$$\text{Densidad max. teo.} = \frac{100}{\frac{\%C.A.}{P.E. C.A.} + \left(\frac{100 - \% C.A.}{P.E. agreg.}\right)}$$

$$\text{Densidad max. teo.} = \frac{100}{\frac{5.5 \%}{1.004} + \left(\frac{100 - 5.5\%}{2.50}\right)}$$

$$\text{Densidad max. teo.} = 2.31 \text{ g/cm}^3$$

Porcentaje de vacíos:

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{\text{Densidad max. teo.} - \text{Densidad prom.}}{\text{Densidad max. teo.}} * 100$$

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{2.31 \text{ g/cm}^3 - 2.22 \text{ g/cm}^3}{2.31 \text{ g/cm}^3} * 100$$

$$\% \text{ Vacíos} = 3.51 \%$$

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

$$V.A.M. = \% \text{ Vacíos} + \frac{\text{Densidad prom.} * \% C.A.}{P.E. C.A.}$$

$$V.A.M. = 3.51 \% + \frac{2.23 \text{ g/cm}^3 * 5.5 \%}{1.004 \text{ g/cm}^3}$$

$$V.A.M. = 15.72 \%$$

Relación betumen vacíos (R.B.V.):

$$R.B.V. = \frac{V.A.M. - \% \text{ Vacíos}}{V.A.M.} * 100$$

$$R.B.V. = \frac{15.72\% - 3.51\%}{15.72\%} * 100$$

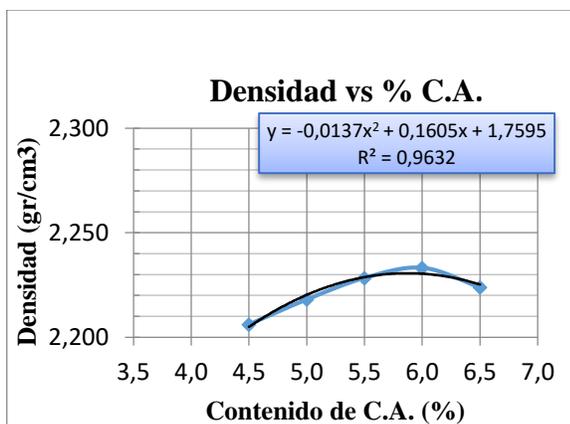
R. B. V. = 77.67 %

Tabla 3.29. Resultados de porcentaje de vacíos y relación betumen vacíos.

Contenido de cemento asfáltico (%)	Muestra	Densidad promedio (g/cm ³)	Densidad máxima teórica (g/cm ³)	Porcentaje de vacíos mezcla total (%)	V.A.M. Vacíos agregado mineral (%)	R.B.V. Relación betumen vacíos (%)
4.5	1	2.21	2.34	5.79	15.68	63.07
	2					
	3					
5	4	2.22	2.33	4.62	15.66	70.50
	5					
	6					
5.5	7	2.23	2.31	3.51	15.72	77.64
	8					
	9					
6	10	2.23	2.29	2.64	15.98	83.49
	11					
	12					
6.5	13	2.22	2.28	2.38	16.78	85.81
	14					
	15					

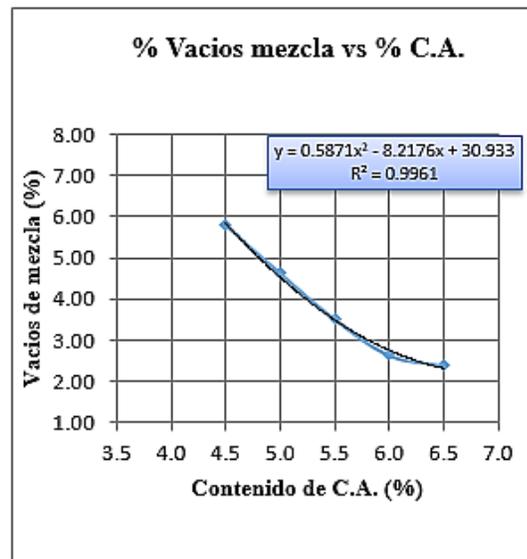
Fuente: Elaboración propia

Gráficos de curvas de diseño de la mezcla asfáltica método Marshall, para encontrar el contenido óptimo.

Gráfico 3.5. Contenido de cemento asfáltico vs densidad de las briquetas

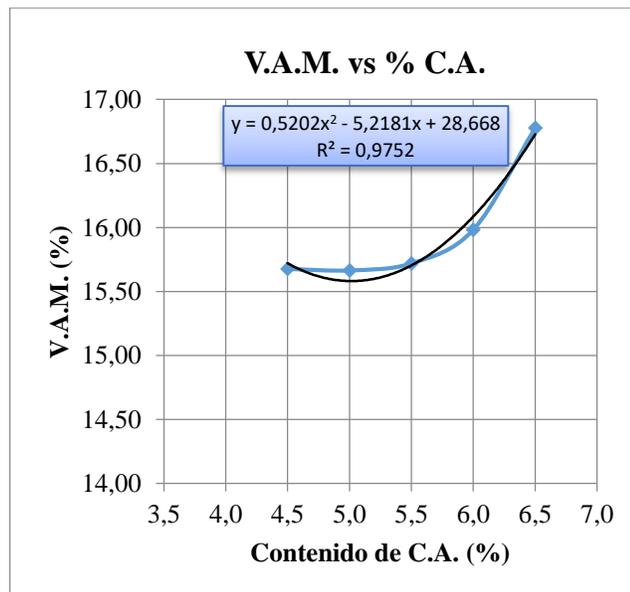
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.6. Contenido de cemento asfáltico vs porcentaje de vacíos de la mezcla



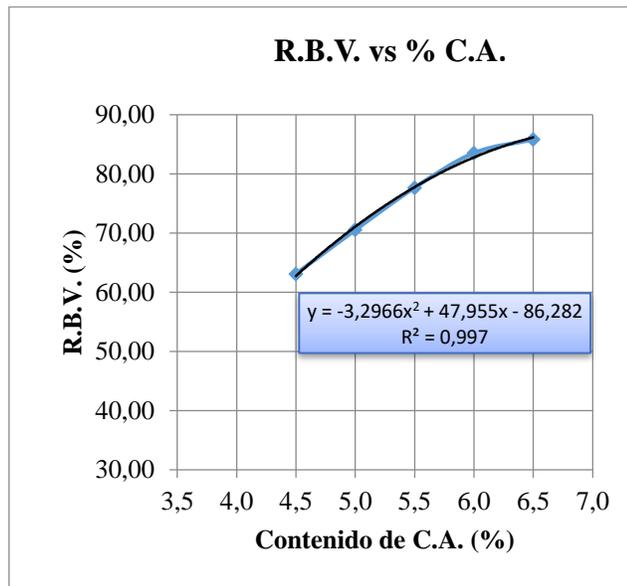
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.7. Contenido de cemento asfáltico vs porcentaje de vacíos de agregado mineral



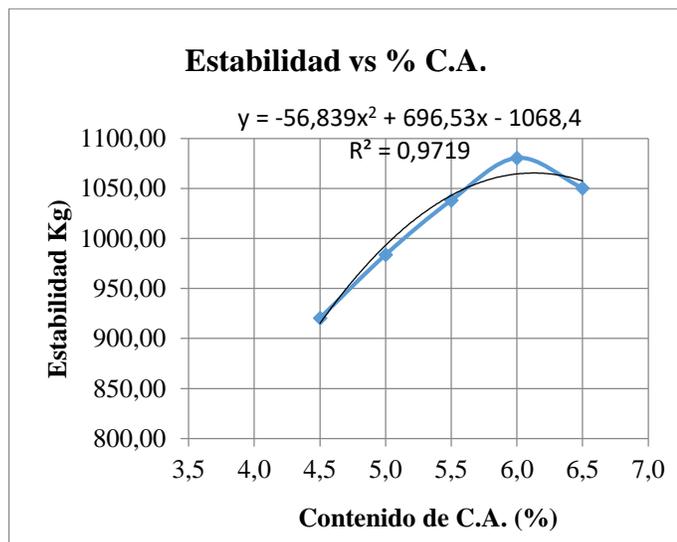
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.8. Contenido de cemento asfáltico vs relación betumen vacíos



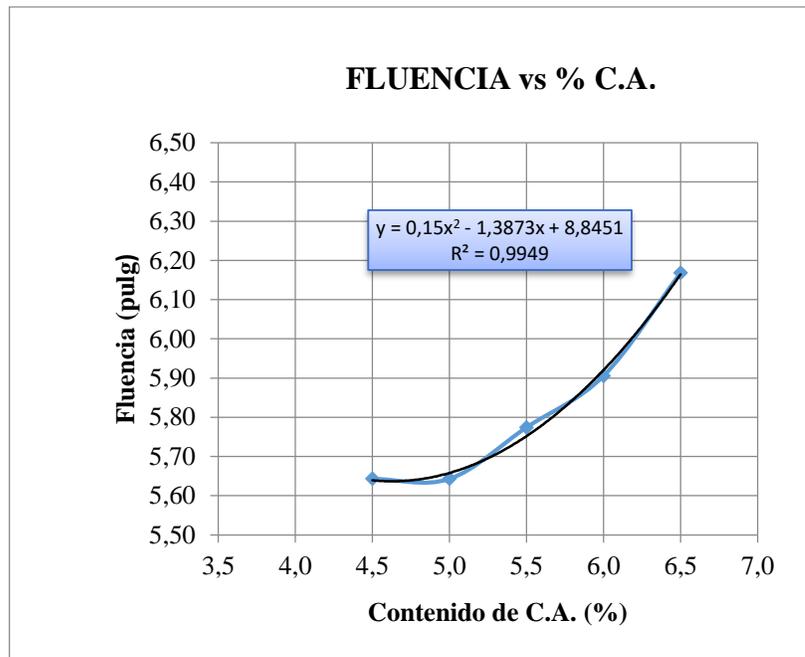
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.9. Contenido de cemento asfáltico vs estabilidad corregida



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.10. Fluencia vs contenido de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.30. Resultados de los ensayos para encontrar el contenido óptimo

Contenido de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (kg)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4.5	2.206	920.49	5.64	5.79	63.07	15.68
5.0	2.218	983.86	5.64	4.62	70.50	15.66
5.5	2.228	1038.19	5.77	3.51	77.64	15.72
6.0	2.233	1080.52	5.91	2.64	83.49	15.98
6.5	2.224	1050.42	6.17	2.38	85.81	16.78
X	5.90	6.12		5.24	5.28	
Y máx	2.31	1065.50		4.00	75.00	

Fuente: Elaboración propia

Los valores que se deben promediar para encontrar el contenido óptimo para la mezcla asfáltica son los siguientes:

$$C. O. de C. A. = \frac{C. O._{Dens. \text{ máx.}} + C. O._{Est.máx.} + C. O._{\% \text{ Vacíos } 4\%} + C. O._{R.B.V.75\%}}{4}$$

$$C. O. de C. A. = \frac{5.90 \% + 6.12\% + 5.24\% + 5.28\%}{4}$$

$$C. O. de C. A. = 5.64 \%$$

Donde:

C.O. de C.A.= Contenido óptimo de cemento asfáltico.

C. O._{Dens. máx.}= Contenido óptimo de para una densidad máxima.

C. O._{Est.máx.}= Contenido óptimo para la estabilidad máxima.

C. O._{% Vacíos 4%}= Contenido óptimo al 4% de vacíos.

C. O._{R.B.V.75%}= Contenido óptimo para una relación betumen vacíos de 75%.

3.6. ENSAYOS DE DENSIDAD, ESTABILIDAD Y RESISTENCIA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL Y CON FIBRAS METÁLICAS

El equipo es el mismo usado para encontrar el contenido óptimo de la mezcla asfáltica. En cuanto a los materiales se le agregara fibras metálicas a 1%, 2%, 4%, 8%, y 15% de peso del total de la briqueta de 1200 g, el porcentaje de cemento asfáltico a usar será el encontrado en el anterior cálculo de 5.64%, para la mezcla convencional corresponderá 0% de fibras metálicas.

3.6.1. Porcentajes de agregados y porcentaje de fibras metálicas a usar

Con el aumento de fibras metálicas en la mezcla va disminuyendo la cantidad de agregados.

Tabla 3.31. Pesos de los agregados de la mezcla asfáltica convencional y modificada

Contenido óptimo C.A. (%)	5.64%	5.64%	5.64%	5.64%	5.64%	5.64%
Porcentaje de fibras metál. (%)	0.00%	1.00%	2.00%	4.00%	8.00%	15.00%
Porcentaje de Agregado (%)	94.36%	93.36%	92.36%	90.36%	86.36%	79.36%
Peso del Cemento asfáltico (g)	67.62	67.62	67.62	67.62	67.62	67.62
Peso fibras (g)	0.00	12.00	24.00	48.00	96.00	180.00
Peso de Grava (g)	271.77	268.89	266.01	260.25	248.73	228.57
Peso de Gravilla (g)	249.12	246.48	243.84	238.56	228.00	209.52
Peso de Arena (g)	611.49	605.01	598.53	585.57	559.65	514.29
Peso total de la briqueta (g)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Ensayos de densidad de la densidad de la mezcla asfáltica convencional y modificada con fibras metálicas

El procedimiento y los cálculos para la encontrar la densidad y estabilidad de la mezcla están descritos en el subtítulo 3.5.5. y 3.5.6. respectivamente, la diferencia es que en las siguientes tablas se trabaja con el contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla, encontrado en el subtítulo 3.5.7. cuyo valor es de 5.64%.

Con las cantidades para la dosificación de la tabla 3.31. se elabora 6 briquetas para cada grupo, de análisis, la cual el primer grupo corresponde a una mezcla convencional, y los demás grupos corresponden a la mezcla modificada con fibras metálicas al 1%, 2%, 4%, 8% y 15%.

Tabla 3.32. Resultados de densidad para la mezcla convencional y con fibras metálicas

N° de briqueta	Porcentaje de fibras met. (%)	Porcentaje óptimo de C.A. (%)	Peso seco (g)	Peso sat. Sup. Seca (g)	Peso sumerg. en agua (g)	volumen briqueta (cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Densidad prom. (g/cm ³)	Densidad máxima teórica (g/cm ³)
1	0	5.64	1185.71	1185.76	665.00	520.76	2.28	2.25	2.30
2			1182.67	1197.15	670.00	527.15	2.24		
3			1196.93	1201.81	665.00	536.81	2.23		
7	1	5.64	1179.81	1180.54	658.00	522.54	2.26	2.27	2.32
8			1170.75	1171.90	658.00	513.90	2.28		
9			1175.30	1176.25	656.00	520.25	2.26		
13	2	5.64	1194.72	1196.00	668.00	528.00	2.26	2.25	2.33
14			1176.26	1177.82	654.00	523.82	2.25		
15			1179.47	1181.64	654.00	527.64	2.24		
19	4	5.64	1184.50	1189.13	656.00	533.13	2.22	2.22	2.36
20			1200.12	1202.70	668.00	534.70	2.24		
21			1169.43	1174.39	642.00	532.39	2.20		
25	8	5.64	1190.43	1203.53	667.00	536.53	2.22	2.21	2.42
26			1187.82	1199.37	658.00	541.37	2.19		
27			1181.59	1193.54	663.00	530.54	2.23		
31	15	5.64	1172.00	1188.05	674.00	514.05	2.28	2.28	2.53
32			1180.40	1196.31	677.00	519.31	2.27		
33			1176.25	1192.20	675.00	517.20	2.27		

Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Ensayo de estabilidad de la mezcla asfáltica convencional y modificada con fibras metálicas

Para encontrar la estabilidad de la mezcla convencional y modificada con fibras metálicas se debe seguir el procedimiento y cálculos descrito en el subtítulo 3.5.6. El porcentaje de vacíos y la relación betumen vacíos se encuentra siguiendo los cálculos del subtítulo 3.5.7.

La mezcla asfáltica convencional y modificada está diseñada con el contenido óptimo de cemento asfáltico de 5.64%.

Tabla 3.33. Estabilidad de la mezcla convencional y modificada con fibras metálicas

Contenido de fibras metálicas (%)	N° de briqueta	Altura de briq. (cm)	Lectura dial (mm)	Carga (lb)	Factor de correc. de altura	Estab. real correg. (lb)	Estab. Prom. (lb)	Estab. prom. (kg)
0	1	6.49	910.00	2432.23	0.97	2348.62	2371.10	1075.51
	2	6.54	940.00	2513.01	0.96	2400.80		
	3	6.51	920.00	2459.15	0.96	2363.86		
1	7	6.44	1400.00	3751.70	0.98	3669.63	3617.26	1640.76
	8	6.48	1380.00	3697.84	0.97	3575.35		
	9	6.46	1383.00	3705.92	0.97	3606.79		
2	13	6.48	1420.00	3805.55	0.97	3681.87	3698.00	1677.38
	14	6.44	1390.00	3724.77	0.98	3645.62		
	15	6.41	1425.00	3819.02	0.99	3766.51		
4	19	6.55	1460.00	3913.27	0.95	3729.25	3753.91	1702.74
	20	6.53	1480.00	3967.12	0.96	3791.88		
	21	6.50	1450.00	3886.34	0.96	3740.60		
8	25	6.90	1415.00	3792.09	0.88	3325.28	3305.79	1499.48
	26	6.94	1400.00	3751.70	0.87	3261.73		
	27	6.79	1380.00	3697.84	0.90	3330.37		
15	31	6.96	1320.00	3536.27	0.87	3061.35	2909.16	1319.57
	32	7.74	1360.00	3643.99	0.75	2746.11		
	33	7.35	1355.00	3630.52	0.80	2920.03		

Fuente: Elaboración propia

3.6.4. Ensayo de compresión inconfiada de la mezcla asfáltica convencional y modificada con fibras metálicas

Procedimiento

Se mide las alturas de las briquetas, de mezcla convencional y modificada con fibras metálicas. Para el ensayo de resistencia o capacidad de soporte se usó el ensayo de compresión inconfinado.

Se colocó la muestra en la base de la equipo de C.B.R., para que al encender la maquina el pistón que tiene el equipo penetre, hasta su valor máximo de capacidad de soporte de la mezcla asfáltica, y llegue a su ruptura y este valor marcado en el dial en unidades de (mm),

sea el que se registre para su posterior cálculo de resistencia o capacidad de soporte en unidades de (Kg/cm^3).

Imagen 3.32. Ensayo de compresión inconfiada de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Cálculos y resultados:

Briquetas 22, 23 y 24 a 4% de porcentaje de fibras metálicas:

Carga puntual:

$$\text{carga puntual} = \frac{9.2414 * \text{Lec. dial (mm)} + 57.06}{2.21}$$

$$\text{carga puntual} = \frac{9.2414 * 90 \text{ mm} + 57.06}{2.21}$$

$$\text{carga puntual} = 402.16 \text{ Kg}$$

Resistencia:

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Carga puntual}}{19.40} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)$$

$$\text{Resistencia} = \frac{402.16 \text{ Kg}}{19.40}$$

$$\text{Resistencia} = 20.73 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)$$

Promedio:

$$\text{Resist. prom.} = \frac{\text{Resistencia}_{22} + \text{Resistencia}_{23} + \text{Resistencia}_{24}}{3}$$

$$\text{Resist. prom.} = \frac{20.73 + 19.87 + 21.87}{3} \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}\right)$$

$$\text{Resist. prom.} = 20.66 \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}\right)$$

Tabla 3.34. Resistencia de las briquetas con mezcla convencional y con distintos porcentajes de fibras metálicas.

Contenido de fibras metálicas (%)	N° de briqueta	Lectura extensómetro (mm)	Carga puntual (Kg)	Carga puntual promedio(Kg)	Resistencia (Kg/cm2)	Carga promedio (Kg/cm2)
0	4	42	201.45	194.48	10.38	10.02
	5	39	188.90		9.74	
	6	40	193.08		9.95	
1	10	60	276.72	265.56	14.26	13.69
	11	58	268.35		13.83	
	12	54	251.63		12.97	
2	16	69	314.35	300.41	16.20	15.49
	17	65	297.62		15.34	
	18	63	289.26		14.91	
4	22	90	402.16	400.77	20.73	20.66
	23	86	385.44		19.87	
	24	93	414.71		21.38	
8	28	85	381.26	364.53	19.65	18.79
	29	76	343.62		17.71	
	30	82	368.71		19.01	
15	34	80	360.35	322.71	18.57	16.63
	35	70	318.53		16.42	
	36	63	289.26		14.91	

Fuente: Elaboración propia

3.6.5. Fallas de fisuramiento de las briquetas por el ensayo de compresión incofinado

Procedimiento

Se procedió a medir la longitud, profundidad y ancho de las fisuras con un vernier, formadas por la aplicación de la carga del ensayo de compresión incofinada de las briquetas con mezcla convencional y modificada.

Tabla 3.35. Resultados de dimensiones de fisuras

Contenido de fibras metálicas (%)	N° de briqueta	Fisura ancho (cm)	Fisura ancho promedio (cm)	Fisura largo (cm)	Fisura longitud promedio (cm)	Fisura profundidad (cm)	Fisura profundidad promedio (cm)
0	4	0.22	0.33	2.37	3.07	4.71	4.78
	5	0.30		3.94		3.81	
	6	0.47		2.89		5.82	
1	10	0.17	0.18	2.97	2.88	4.51	4.49
	11	0.19		3.16		4.72	
	12	0.16		2.50		4.23	
2	16	0.16	0.16	2.90	2.77	4.53	4.27
	17	0.17		2.55		4.20	
	18	0.14		2.86		4.08	
4	22	0.05	0.08	2.33	2.42	3.87	3.04
	23	0.10		2.56		2.51	
	24	0.08		2.38		2.73	
8	28	0.12	0.14	2.78	2.63	3.12	3.35
	29	0.15		2.50		3.55	
	30	0.14		2.62		3.37	
15	34	0.22	0.23	3.25	2.90	4.54	4.27
	35	0.33		2.95		3.93	
	36	0.15		2.51		4.35	

Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.33. Medición de ancho, profundidad y la longitud de las fisuras



Fuente: Elaboración propia

3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

Altura para las briquetas 19, 20, 21, 22, 23 y 24 para un porcentaje de fibras metálicas de 4%.

- Calculo de la media

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{6.55 + 6.53 + 6.50 + 6.40 + 6.56 + 6.48}{6} \quad (\text{cm})$$

$$\bar{x} = 6.50 \text{ cm}$$

Donde:

\bar{x} = Media aritmética de una muestra

x_i = Valores del conjunto de muestra

n = Tamaño de la muestra

- Cálculo de la mediana:

$$\text{Me} = \begin{cases} \frac{x_{(n/2)} + x_{(n/2+1)}}{2}, & \text{si } n \text{ es par} \\ x_{(n+1/2)}, & \text{si } n \text{ es impar} \end{cases}$$

Donde:

$x_{(n/2)}, x_{(n/2+1)}$ = Valores de los dos datos centrales

$x_{(n+1/2)}$ = Valor del dato central

Me = Mediana

Ordenando de menor a mayor

Mediana = 6.40, 6.48, 6.50, 6.53, 6.54, 6.56.

$$\text{Me} = \frac{6.50 + 6.53}{2} \text{ (cm)}$$

$$\text{Me} = 6.52 \text{ cm}$$

- Cálculo de la desviación estándar:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$S = \sqrt{\frac{0.01624}{5}}$$

$$S = 0.057$$

Donde:

S = Desviación estándar

\bar{x} = Media aritmética de una muestra

x_i = Valores del conjunto de muestra

n = Tamaño de la muestra

- Varianza:

$$\text{Varianza} = \frac{\text{Desviación estandar}}{\text{Media}} * 100 (\%)$$

$$\text{Varianza} = \frac{0.057}{6.50} * 100$$

$$\text{Varianza} = 0.88 \%$$

Donde:

S = Desviación estándar

\bar{x} = Media aritmética de la muestra

De igual manera se procede a realizar los cálculos obtenidos para las demás briquetas, para la estabilidad, fluencia, resistencia, longitud d fisuras, profundidad de fisuras y ancho de fisuras.

Tabla 3.36. Evaluación estadística de las briquetas con mezcla convencional

Contenido de fibras metálicas (0%)	Medida (cm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia (Km/cm ²)	Fisura ancho (cm)	Fisura largo (cm)	Fisura profundidad (cm)
Media	6.50	1075.51	10.02	0.33	3.07	4.78
Mediana	6.51	1065.32	9.95	0.30	2.89	4.71
Desviación estándar	0.03	12.17	0.33	0.13	0.80	1.01
Varianza (%)	0.48	1.13	3.28	38.69	26.08	21.06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.37. Evaluación estadística de las briquetas de la mezcla con fibras metálicas al 1%

Contenido de fibras metálicas (1%)	Medida (cm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia (Km/cm²)	Fisura ancho (cm)	Fisura largo (cm)	Fisura profundidad (cm)
Media	6.46	1640.76	13.69	0.20	2.88	4.49
Mediana	6.47	1636.01	13.83	0.20	2.97	4.51
Desviación estándar	0.03	21.77	0.66	0.01	0.34	0.25
Varianza (%)	0.45	1.33	4.81	5.00	11.81	5.48

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.38. Evaluación estadística de las briquetas de la mezcla con fibras metálicas al 2%

Contenido de fibras metálicas (2%)	Medida (cm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia (Km/cm²)	Fisura ancho (cm)	Fisura largo (cm)	Fisura profundidad (cm)
Media	6.47	1677.38	15.49	0.16	2.77	4.27
Mediana	6.48	1670.07	15.34	0.16	2.72	4.20
Desviación estándar	0.04	28.14	0.66	0.02	0.23	0.23
Varianza (%)	0.68	1.68	4.25	9.75	8.28	5.46

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.39. Evaluación estadística de las briquetas de la mezcla con fibras metálicas al 4%

Contenido de fibras metálicas (4%)	Medida (cm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia (Km/cm²)	Fisura ancho (cm)	Fisura largo (cm)	Fisura profundidad (cm)
Media	6.50	1702.74	20.66	0.08	2.42	3.04
Mediana	6.52	1696.71	20.73	0.08	2.45	2.73
Desviación estándar	0.06	15.14	0.76	0.03	0.19	0.73
Varianza (%)	0.88	0.89	3.66	32.83	7.90	24.04

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.40. Evaluación estadística de las briquetas de la mezcla con fibras metálicas al 8%

Contenido de fibras metálicas (8%)	Medida (cm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia (Km/cm²)	Fisura ancho (cm)	Fisura largo (cm)	Fisura profundidad (cm)
Media	6.88	1499.48	18.79	0.14	2.63	3.35
Mediana	6.91	1508.32	19.01	0.14	2.62	3.37
Desviación estándar	0.09	17.35	0.99	0.02	0.14	0.22
Varianza (%)	1.38	1.16	5.26	11.18	5.33	6.45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.41. Evaluación estadística de las briquetas de la mezcla con fibras metálicas al 15%

Contenido de fibras metálicas (15%)	Medida (cm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia (Km/cm²)	Fisura ancho (cm)	Fisura largo (cm)	Fisura profundidad (cm)
Media	7.32	1319.57	16.63	0.23	2.90	4.27
Mediana	7.30	1324.50	16.42	0.22	2.95	4.35
Desviación estándar	0.27	71.62	1.84	0.09	0.37	0.31
Varianza (%)	3.63	5.43	11.07	38.89	12.82	7.30

Fuente: Elaboración propia

3.8. COMPARACIÓN ECONÓMICA DE PRECIOS UNITARIOS DE LA MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON FIBRAS METÁLICAS

Se realiza el análisis de precios unitarios por metro cúbico para una mezcla convencional y para la mezcla modificada.

Para ejecución y transporte una carpeta de concreto asfáltico, el análisis de precios unitarios comprende los costos de materiales, mano de obra, equipo y herramientas, gastos generales e impuestos.

Tabla 3.42. Análisis de precios unitarios, mezcla convencional

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total (Bs)
1.- Materiales				
Grava triturada (24%)	m ³	0.21	130.00	26.65
Gravilla triturada (22%)	m ³	0.19	150.00	28.45
Arena clasificada (54%)	m ³	0.48	125.00	59.50
Cemento asfáltico convencional 85-100	Kg	129.90	10.70	1 389.31
Diésel	L	10.00	3.74	37.40
Total materiales				1 541.30
2.- Mano de obra				
Ayudante de operador	Hr.	0.03	12.07	0.34
Capataz A	Hr.	1.80	17.95	32.31
Operador A	Hr.	0.82	17.95	14.72
Operador de equipo liviano	Hr.	0.08	15.37	1.26
Operador de planta	Hr.	0.09	23.19	2.09
Obrero A	Hr.	0.07	12.07	0.87
Chofer A	Hr.	0.0012	15.37	0.02
Subtotal mano de obra				51.60
Beneficios sociales - % del subtotal de mano de obra			71.18%	36.73
Impuesto al valor agregado - % subtot m.o.+ cargas sociales			14.94%	13.20
Total mano de obra				101.53
3.- Equipo y herramientas				
Compactador rodillo liso	Hr.	0.035	303.85	10.63
Distribuidor de agregados autop.	Hr.	0.028	455.03	12.74
Escoba mecánica autop.	Hr.	0.028	71.55	2.00
Planta calentamiento de asfalto	Hr.	0.090	965.23	86.87
Compactador de rodillo neumático tsp 10000	Hr.	0.084	332.81	27.96
Terminadora de asfalto	Hr.	0.075	669.06	50.18
Cargador frontal de ruedas >=950 m3	Hr.	0.0001	421.29	0.04
Volquete >=12m3	Hr.	0.0012	227.87	0.27
Herramientas - % del total de la mano de obra			5.00%	5.08
Total equipo y herramientas				195.78
4.- Gastos generales				
Gastos generales - % de 1+2+3			10.00%	183.86
Total gastos generales				183.86
5.- Utilidad				
Utilidad - % de 1+2+3 +4			0.00%	0.00
Total utilidad				0.00
6.- Impuestos				
Impuesto a las transacciones - % de 1+2+3+4+5			3.09%	17.73
Total impuestos				17.73
Total precio unitario				2 040.20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.43. Análisis de precios unitarios, mezcla con fibras metálicas 1%

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total (Bs)
1.- Materiales				
Grava triturada (24%)	m ³	0.20	130.00	26.54
Gravilla triturada (22%)	m ³	0.19	150.00	28.32
Arena clasificada (54%)	m ³	0.47	125.00	59.24
Fibras metálicas (1%)	Kg	23.13	20.00	462.52
Cemento asfáltico convencional 85-100	Kg	129.90	10.70	1 389.31
Diésel	L	10.00	3.74	37.40
Total materiales				2 003.32
2.- Mano de obra				
Ayudante de operador	Hr.	0.028	12.07	0.34
Capataz A	Hr.	1.800	17.95	32.31
Operador A	Hr.	0.820	17.95	14.72
Operador de equipo liviano	Hr.	0.082	15.37	1.26
Operador de planta	Hr.	0.090	23.19	2.09
Obrero A	Hr.	0.072	12.07	0.87
Chofer A	Hr.	0.001	15.37	0.02
Subtotal mano de obra				51.60
Beneficios sociales - % del subtotal de mano de obra			71.18%	36.73
Impuesto al valor agregado - % subtot m.o.+ cargas sociales			14.94%	13.20
Total mano de obra				101.53
3.- Equipo y herramientas				
Compactador rodillo liso	Hr.	0.035	303.85	10.63
Distribuidor de agregados autop.	Hr.	0.028	455.03	12.74
Escoba mecánica autop.	Hr.	0.028	71.55	2.00
Planta calentamiento de asfalto	Hr.	0.090	965.23	86.87
Compactador de rodillo neumático tsp 10000	Hr.	0.084	332.81	27.96
Terminadora de asfalto	Hr.	0.075	669.06	50.18
Cargador frontal de ruedas >=950 m3	Hr.	0.000	421.29	0.04
Volquete >=12m3	Hr.	0.001	227.87	0.27
Herramientas - % del total de la mano de obra			5.00%	5.08
Total equipo y herramientas				195.78
4.- Gastos generales				
Gastos generales - % de 1+2+3			10.00%	183.81
Total gastos generales				183.81
5.- Utilidad				
Utilidad - % de 1+2+3 +4			0.00%	0.00
Total utilidad				0.00
6.- Impuestos				
Impuesto a las transacciones - % de 1+2+3+4+5			3.09%	17.72
Total impuestos				17.72
Total precio unitario				2 502.16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.44. Análisis de precios unitarios, mezcla con fibras metálicas 2%

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productiv.	Costo Total
1.- Materiales				
Grava triturada (24%)	m ³	0.203	130.00	26.42
Gravilla triturada (22%)	m ³	0.188	150.00	28.20
Arena clasificada (54%)	m ³	0.472	125.00	58.98
Fibras metálicas (2%)	Kg	45.432	20.00	908.63
Cemento asfáltico convencional 85-100	Kg	129.902	10.70	1 389.31
Diésel	L	10.000	3.74	37.40
Total materiales				2 448.93
2.- Mano de obra				
Ayudante de operador	Hr.	0.028	12.07	0.34
Capataz a	Hr.	1.800	17.95	32.31
Operador a	Hr.	0.820	17.95	14.72
Operador de equipo liviano	Hr.	0.082	15.37	1.26
Operador de planta	Hr.	0.090	23.19	2.09
Obrero a	Hr.	0.072	12.07	0.87
Chofer a	Hr.	0.0012	15.37	0.02
Subtotal mano de obra				51.60
Beneficios sociales - % del subtotal de mano de obra			71.18%	36.73
Impuesto al valor agregado - % subtot m.o.+ cargas sociales			14.94%	13.20
Total mano de obra				101.53
3.- Equipo y herramientas				
Compactador rodillo liso	Hr.	0.035	303.85	10.63
Distribuidor de agregados autop.	Hr.	0.028	455.03	12.74
Escoba mecánica autop.	Hr.	0.028	71.55	2.00
Planta calentamiento de asfalto	Hr.	0.090	965.23	86.87
Compactador de rodillo neumático tsp 10000	Hr.	0.084	332.81	27.96
Terminadora de asfalto	Hr.	0.075	669.06	50.18
Cargador frontal de ruedas >=950 m3	Hr.	0.0001	421.29	0.04
Volquete >=12m3	Hr.	0.0012	227.87	0.27
Herramientas - % del total de la mano de obra			5.00%	5.08
Total equipo y herramientas				195.78
4.- Gastos generales				
Gastos generales - % de 1+2+3			10.00%	183.76
Total gastos generales				183.76
5.- Utilidad				
Utilidad - % de 1+2+3 +4			0.00%	0.00
Total utilidad				0.00
6.- Impuestos				
Impuesto a las transacciones - % de 1+2+3+4+5			3.09%	17.71
Total impuestos				17.71
Total precio unitario				2 947.71

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.45. Análisis de precios unitarios, mezcla con fibras metálicas 4%

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1.- Materiales				
Grava triturada (24%)	m ³	0.201	130.00	26.18
Gravilla triturada (22%)	m ³	0.186	150.00	27.94
Arena clasificada (54%)	m ³	0.468	125.00	58.45
Fibras metálicas (4%)	Kg	90.714	20.00	1 814.27
Cemento asfáltico convencional 85-100	Kg	129.902	10.70	1 389.31
Diésel	L	10.000	3.74	37.40
Total materiales				3 353.55
2.- Mano de obra				
Ayudante de operador	Hr.	0.028	12.07	0.34
Capataz a	Hr.	1.800	17.95	32.31
Operador a	Hr.	0.820	17.95	14.72
Operador de equipo liviano	Hr.	0.082	15.37	1.26
Operador de planta	Hr.	0.090	23.19	2.09
Obrero a	Hr.	0.072	12.07	0.87
Chofer a	Hr.	0.001	15.37	0.02
Subtotal mano de obra				51.60
Beneficios sociales - % del subtotal de mano de obra			71.18%	36.73
Impuesto al valor agregado - % subtot m.o.+ cargas sociales			14.94%	13.20
Total mano de obra				101.53
3.- Equipo y herramientas				
Compactador rodillo liso	Hr.	0.035	303.85	10.63
Distribuidor de agregados autop.	Hr.	0.028	455.03	12.74
Escoba mecánica autop.	Hr.	0.028	71.55	2.00
Planta calentamiento de asfalto	Hr.	0.090	965.23	86.87
Compactador de rodillo neumático tsp 10000	Hr.	0.084	332.81	27.96
Terminadora de asfalto	Hr.	0.075	669.06	50.18
Cargador frontal de ruedas >=950 m3	Hr.	0.000	421.29	0.04
Volquete >=12m3	Hr.	0.001	227.87	0.27
Herramientas - % del total de la mano de obra			5.00%	5.08
Total equipo y herramientas				195.78
4.- Gastos generales				
Gastos generales - % de 1+2+3			10.00%	183.66
Total gastos generales				183.66
5.- Utilidad				
Utilidad - % de 1+2+3 +4			0.00%	0.00
Total utilidad				0.00
6.- Impuestos				
Impuesto a las transacciones - % de 1+2+3+4+5			3.09%	17.69
Total impuestos				17.69
Total precio unitario				3 852.21

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.46. Análisis de precios unitarios, mezcla con fibras metálicas 8%

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productiv.	Costo Total
1.- Materiales				
Grava triturada (24%)	m ³	0.198	130.00	25.69
Gravilla triturada (22%)	m ³	0.183	150.00	27.41
Arena clasificada (54%)	m ³	0.459	125.00	57.34
Fibras metálicas (8%)	Kg	179.060	20.00	3 581.20
Cemento asfáltico convencional 85-100	Kg	129.902	10.70	1 389.31
Diésel	L	10.000	3.74	37.40
Total materiales				5 118.34
2.- Mano de obra				
Ayudante de operador	Hr.	0.028	12.07	0.34
Capataz a	Hr.	1.800	17.95	32.31
Operador a	Hr.	0.820	17.95	14.72
Operador de equipo liviano	Hr.	0.082	15.37	1.26
Operador de planta	Hr.	0.090	23.19	2.09
Obrero a	Hr.	0.072	12.07	0.87
Chofer a	Hr.	0.001	15.37	0.02
Subtotal mano de obra				51.60
Beneficios sociales - % del subtotal de mano de obra			71.18%	36.73
Impuesto al valor agregado - % subtot m.o.+ cargas sociales			14.94%	13.20
Total mano de obra				101.53
3.- Equipo y herramientas				
Compactador rodillo liso	Hr.	0.035	303.85	10.63
Distribuidor de agregados autop.	Hr.	0.028	455.03	12.74
Escoba mecánica autop.	Hr.	0.028	71.55	2.00
Planta calentamiento de asfalto	Hr.	0.090	965.23	86.87
Compactador de rodillo neumático tsp 10000	Hr.	0.084	332.81	27.96
Terminadora de asfalto	Hr.	0.075	669.06	50.18
Cargador frontal de ruedas >=950 m3	Hr.	0.000	421.29	0.04
Volquete >=12m3	Hr.	0.001	227.87	0.27
Herramientas - % del total de la mano de obra			5.00%	5.08
Total equipo y herramientas				195.78
4.- Gastos generales				
Gastos generales - % de 1+2+3			10.00%	183.45
Total gastos generales				183.45
5.- Utilidad				
Utilidad - % de 1+2+3 +4			0.00%	0.00
Total utilidad				0.00
6.- Impuestos				
Impuesto a las transacciones - % de 1+2+3+4+5			3.09%	17.65
Total impuestos				17.65
Total precio unitario				5 616.75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.47. Análisis de precios unitarios, mezcla con fibras metálicas 15%

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productiv.	Costo Total
1.- Materiales				
Grava triturada (24%)	m ³	0.190	130.00	24.75
Gravilla triturada (22%)	m ³	0.176	150.00	26.42
Arena clasificada (54%)	m ³	0.442	125.00	55.26
Fibras metálicas (15%)	Kg	348.252	20.00	6 965.05
Cemento asfáltico convencional 85-100	Kg	129.902	10.70	1 389.31
Diésel	L	10.000	3.74	37.40
Total materiales				8 498.18
2.- Mano de obra				
Ayudante de operador	Hr.	0.028	12.07	0.34
Capataz a	Hr.	1.800	17.95	32.31
Operador a	Hr.	0.820	17.95	14.72
Operador de equipo liviano	Hr.	0.082	15.37	1.26
Operador de planta	Hr.	0.090	23.19	2.09
Obrero a	Hr.	0.072	12.07	0.87
Chofer a	Hr.	0.001	15.37	0.02
Subtotal mano de obra				51.60
Beneficios sociales - % del subtotal de mano de obra			71.18%	36.73
Impuesto al valor agregado - % subtot m.o.+ cargas sociales			14.94%	13.20
Total mano de obra				101.53
3.- Equipo y herramientas				
Compactador rodillo liso	Hr.	0.035	303.85	10.63
Distribuidor de agregados autop.	Hr.	0.028	455.03	12.74
Escoba mecánica autop.	Hr.	0.028	71.55	2.00
Planta calentamiento de asfalto	Hr.	0.090	965.23	86.87
Compactador de rodillo neumático tsp 10000	Hr.	0.084	332.81	27.96
Terminadora de asfalto	Hr.	0.075	669.06	50.18
Cargador frontal de ruedas >=950 m3	Hr.	0.000	421.29	0.04
Volquete >=12m3	Hr.	0.001	227.87	0.27
Herramientas - % del total de la mano de obra			5.00%	5.08
Total equipo y herramientas				195.78
4.- Gastos generales				
Gastos generales - % de 1+2+3			10.00%	183.04
Total gastos generales				183.04
5.- Utilidad				
Utilidad - % de 1+2+3 +4			0.00%	0.00
Total utilidad				0.00
6.- Impuestos				
Impuesto a las transacciones - % de 1+2+3+4+5			3.09%	17.58
Total impuestos				17.58
Total precio unitario				8 996.11

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.48. Comparación de precios unitarios

Actividad	Precio unitario por m³ (Bs)	Relación de gastos	Porcentaje de gastos (%)	Porcentaje de gasto adicional (%)
Suministro, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica convencional	2 040.20	1.00	100.00	0.00
Suministro, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica modificada con 1% de fibras metálicas	2 502.16	1.23	122.64	22.64
Suministro, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica modificada con 2% de fibras metálicas	2 947.71	1.44	144.48	44.48
Suministro, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica modificada con 4% de fibras metálicas	3 852.21	1.89	188.82	88.82
Suministro, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica modificada con 8% de fibras metálicas	5 616.75	2.75	275.30	175.30
Suministro, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica modificada con 15% de fibras metálicas	8 996.11	4.41	440.94	340.94

Fuente: Elaboración propia

3.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados se tomará los valores medios de cada una de las variables a analizar: Estabilidad, resistencia, longitud, profundidad y ancho de fisuras.

La media aritmética será válida si la varianza o coeficiente de variación es 50% o menos.

Se realiza también una comparación de una mezcla convencional con las mezclas modificadas con fibras metálicas, los gráficos mostrarán la diferencia entre un valor óptimo de una mezcla asfáltica modificada y una mezcla convencional.

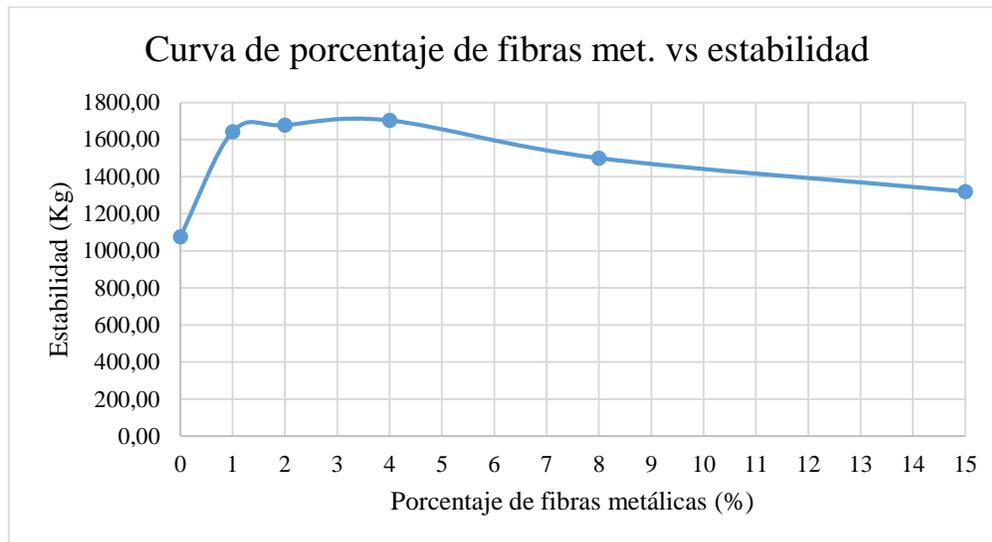
Se realiza las curvas de estabilidad, resistencia y fisuración de las briquetas, para ver el comportamiento de la mezcla convencional y modificada con las fibras metálicas dentro de la mezcla.

Tabla 3.49. Resultados de medias de las propiedades mecánicas y físicas de la mezcla asfáltica convencional y con fibras metálicas

Contenido de fibras metálicas (%)	Estabilidad (Kg)	Resistencia (Km/cm²)	Fisura ancho (cm)	Fisura largo (cm)	Fisura profundidad (cm)
0	1075.51	10.02	0.33	3.07	4.78
1	1640.76	13.69	0.20	2.88	4.49
2	1677.38	15.49	0.16	2.72	4.27
4	1702.74	20.66	0.08	2.42	3.04
8	1499.48	18.79	0.14	2.63	3.35
15	1319.57	16.63	0.23	2.90	4.27

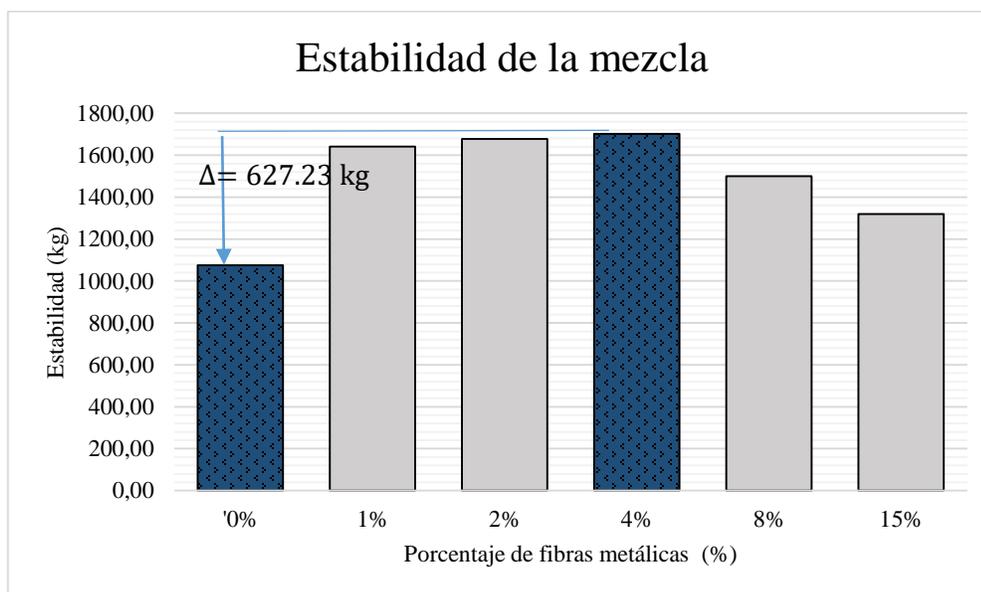
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.11. Curva de porcentaje de fibras metálicas vs estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.12. Histograma de estabilidad de las mezclas asfálticas, convencional y modificada con fibras metálicas



Fuente: Elaboración propia

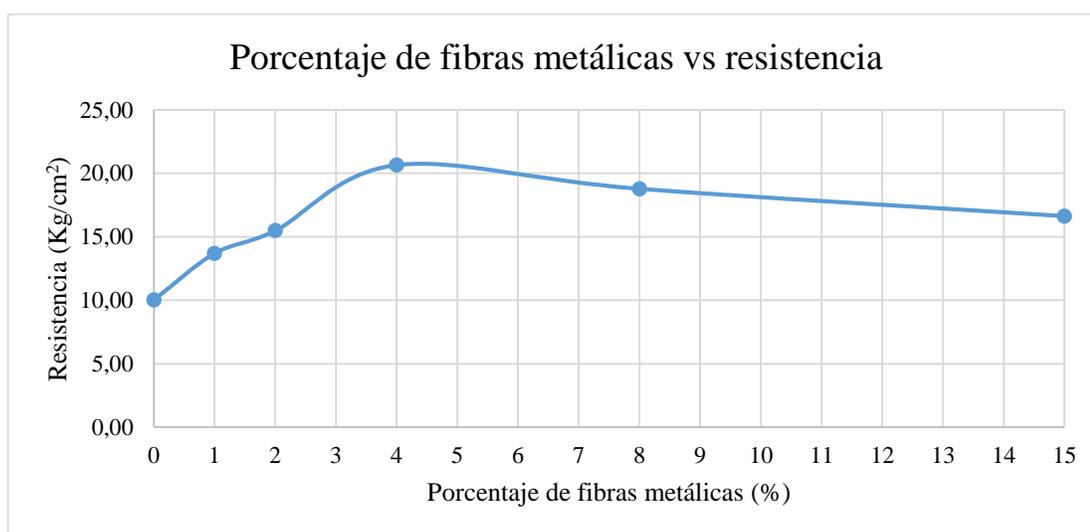
Análisis

En la curva de contenido de fibras metálicas versus estabilidad se puede apreciar que se comporta de forma ascendente hasta un porcentaje de fibras metálicas de 4%, se interpreta que a ese contenido de fibras metálicas se alcanza la mayor estabilidad de la mezcla, además de distinguir que entre un contenido de 2% y 4% se comporta de forma recta con una pendiente muy baja, pasado el 4% se tiene una curva de descenso suave, pero aun así en el punto final, que corresponde al 15% de fibras metálicas, con una estabilidad superior a la que tiene una mezcla convencional.

Esto se debe a la adición de fibras que mejora su estabilidad, por lo tanto se puede obtener un pavimento de mejor calidad.

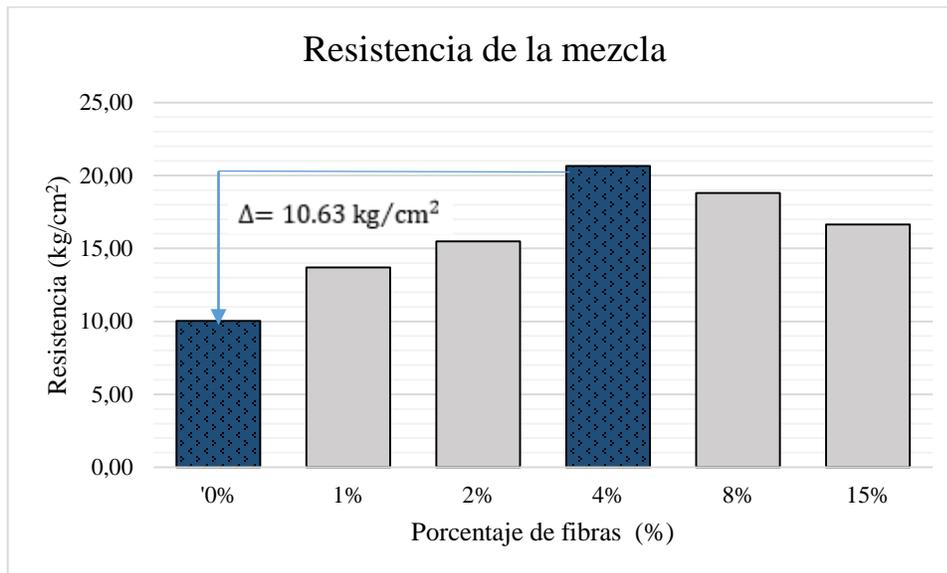
El gráfico 3.12. muestra la diferencia entre la mezcla convencional con 0% de fibras metálicas y la mezcla modificada con 4% de fibras metálicas, el cual es un valor de 627.23 Kg, e indica que hay un aumento de estabilidad de 58.32% en comparación con la mezcla convencional.

Gráfico 3.13. Curva de porcentaje de fibras metálicas vs resistencia



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.14. Histograma de resistencia de la mezcla



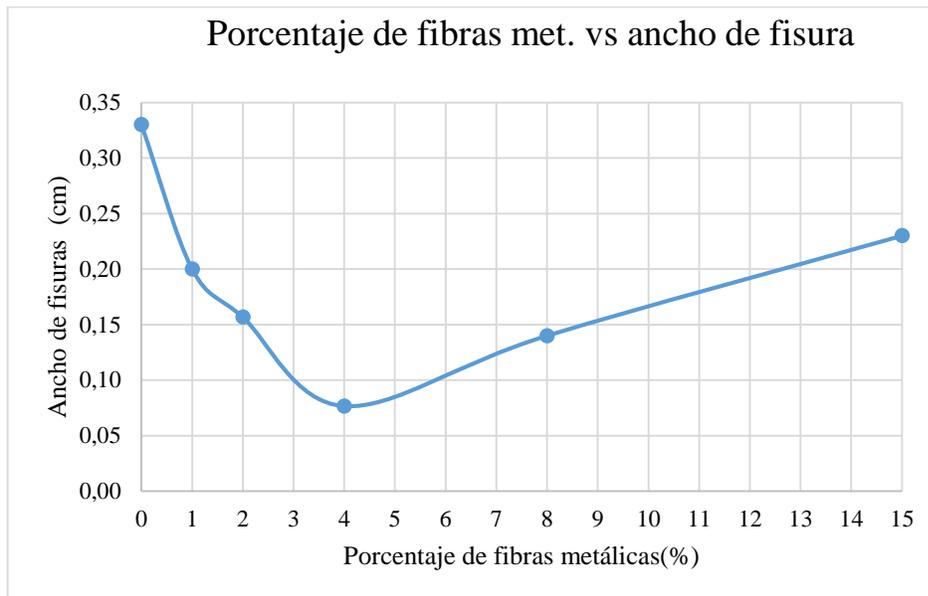
Fuente: Elaboración propia

Análisis

La curva porcentaje de fibras metálicas versus resistencia es de forma ascendente, hasta un contenido de 4% de fibras metálicas lo que significa que a este punto llega a su máxima resistencia a compresión o esfuerzo axial, para los puntos al 8% y 15% se presenta una curva descendente, pero con pendiente baja, aun así superior a la mezcla convencional.

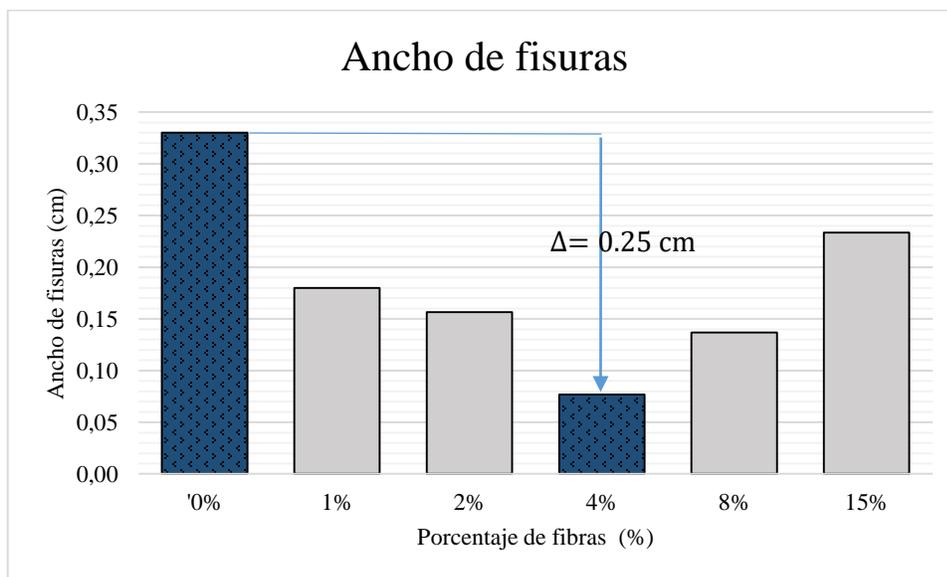
El histograma de la resistencia de las mezclas, se remarca la diferencia entre la mezcla convencional y la óptima con fibras metálicas al 4%, se tiene una diferencia de 10.63 Kg/cm². Hay un aumento de resistencia a compresión de 106.19%, frente a una mezcla convencional.

Gráfico 3.15. Curva de porcentaje de fibras metálicas vs ancho de fisuras



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.16. Histograma de ancho de fisuras



Fuente: Elaboración propia

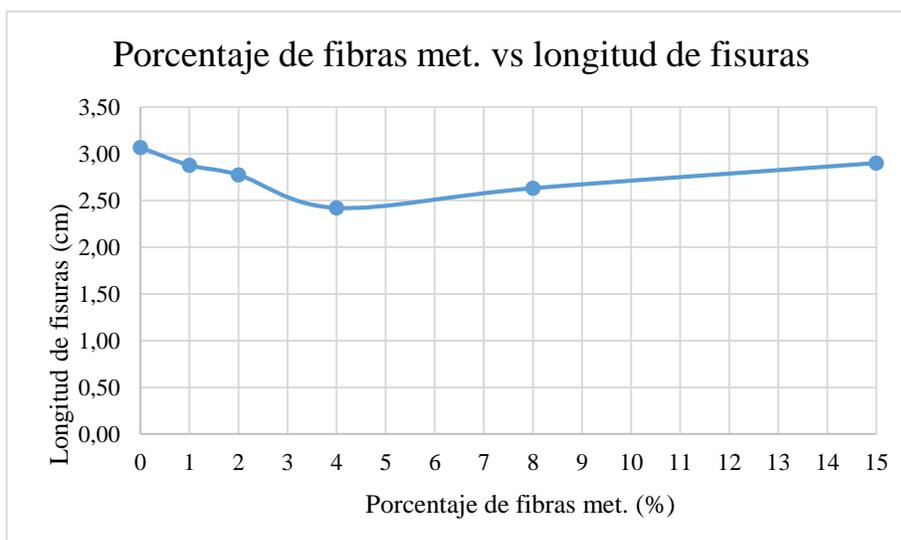
Análisis

La curva de porcentaje de fibras metálicas versus ancho de fisura es de forma descendente, llegando a su punto más bajo en el 4% de contenido de fibras metálicas, donde se evidencia que hay una disminución del ancho de fisuras.

Pasando el 4% de fibras metálicas la curva cambia a ser ascendente, lo cual significa que para mayor cantidad de fibras metálicas las fisuras se harán más anchas, pero aun así usando un 8% y 15% de fibras metálicas, se presenta menor ancho de fisuras que la mezcla convencional. A estos porcentajes son admisibles constructivamente porque los valores son menores al ancho que se pueda tener en una mezcla convencional, pero económicamente no sería conveniente, por el costo de las fibras metálicas.

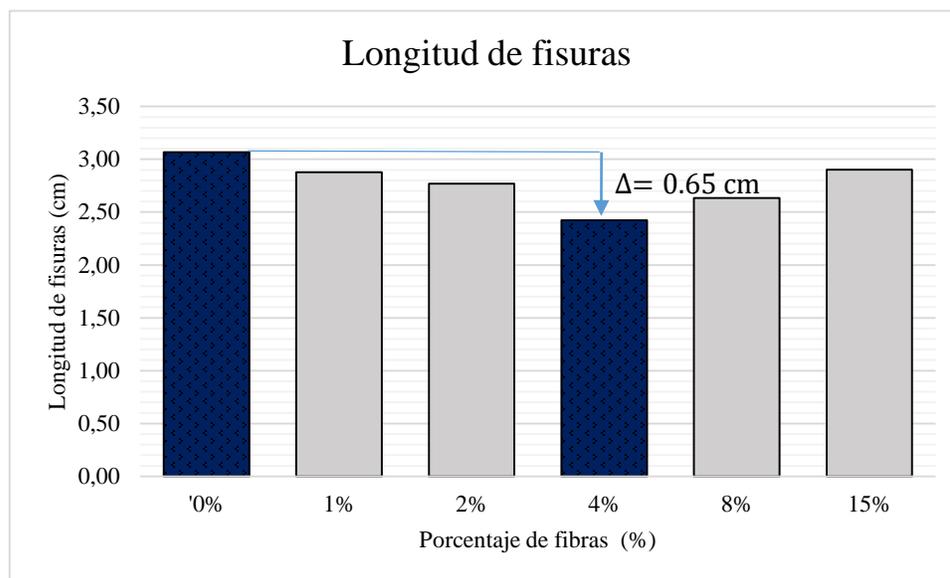
El histograma de ancho de fisuras remarca la diferencia que se tiene en el ancho de fisuras de una mezcla convencional, comparada con la mezcla modificada con 4% de fibras metálicas, con la disminución de valor de 0.25 cm. Se presenta una disminución de ancho de fisura de 75.76% con relación a la mezcla convencional.

Gráfico 3.17. Curva de porcentaje de fibras metálicas vs longitud de fisuras



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.18. Histograma de longitud de fisuras



Fuente: Elaboración propia

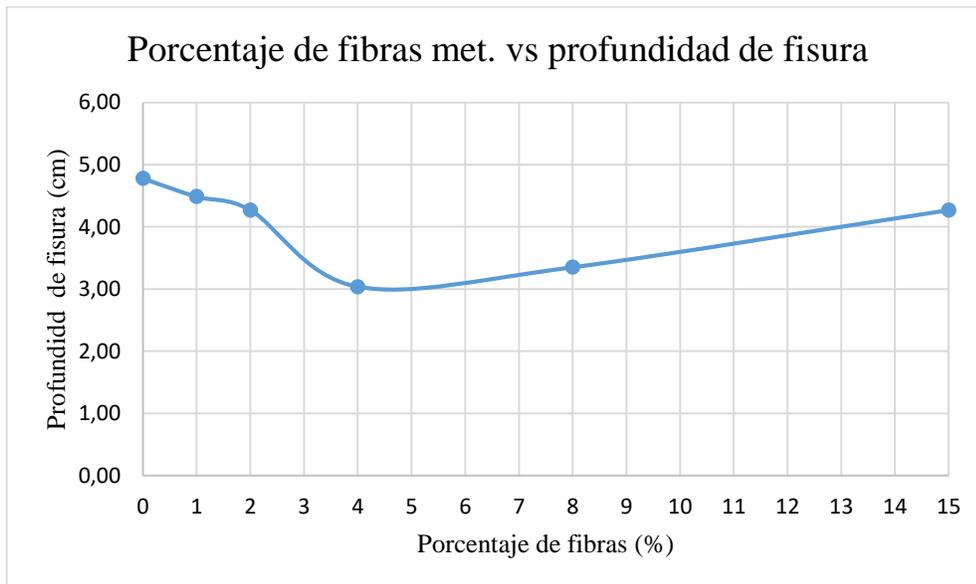
Análisis

La curva porcentaje de fibras metálicas versus longitud de fisuras, se visualiza que hasta un 2% de fibras metálicas presenta una curva suave, casi constante, con una pendiente muy baja, pero descendente. Pasando el 2%, llegando al 4% de contenido de fibras metálicas la curva tiene mayor pendiente descendente, llegando así al 4% a su punto más bajo, donde el valor de la longitud de fisura es el mínimo de todas las muestras de estudio para las fisuras.

Para un contenido de 8% y 15% las fibras metálicas, presenta una curva ascendente que indica que las longitudes de fisura aumentan, pero para estos porcentajes el uso es también conveniente frente a la mezcla convencional ya que son de menor dimensión. De igual forma que el anterior no es conveniente de forma económica ya que representa un mayor costo.

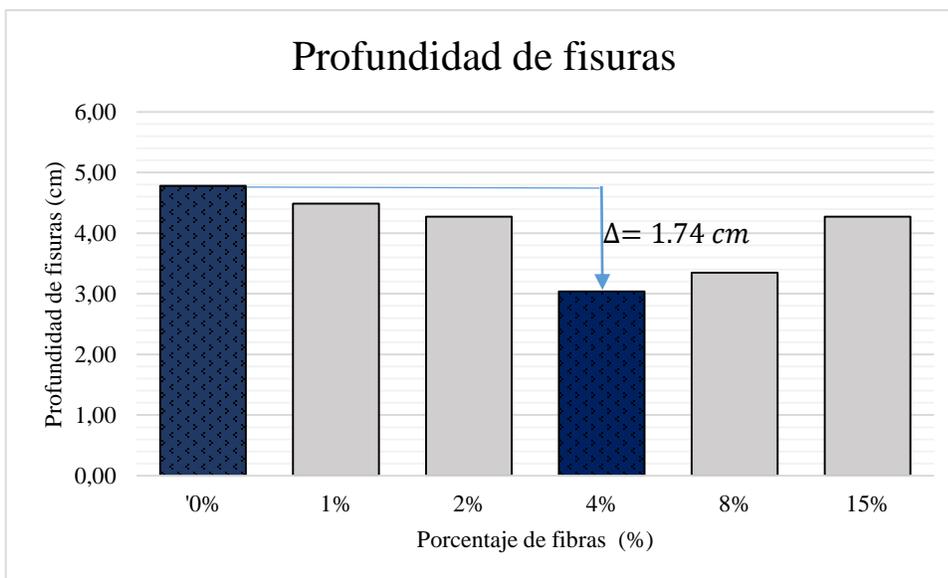
El histograma muestra la diferencia de la mezcla convencional con la mezcla modificada con un valor de 0.65 cm, la disminución máxima de la longitud de fisura es de 21.17%, frente a una mezcla convencional.

Gráfico 3.19. Curva de porcentaje de fibras metálicas vs profundidad de fisuras



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.20. Histograma de profundidad de fisuras



Fuente: Elaboración propia

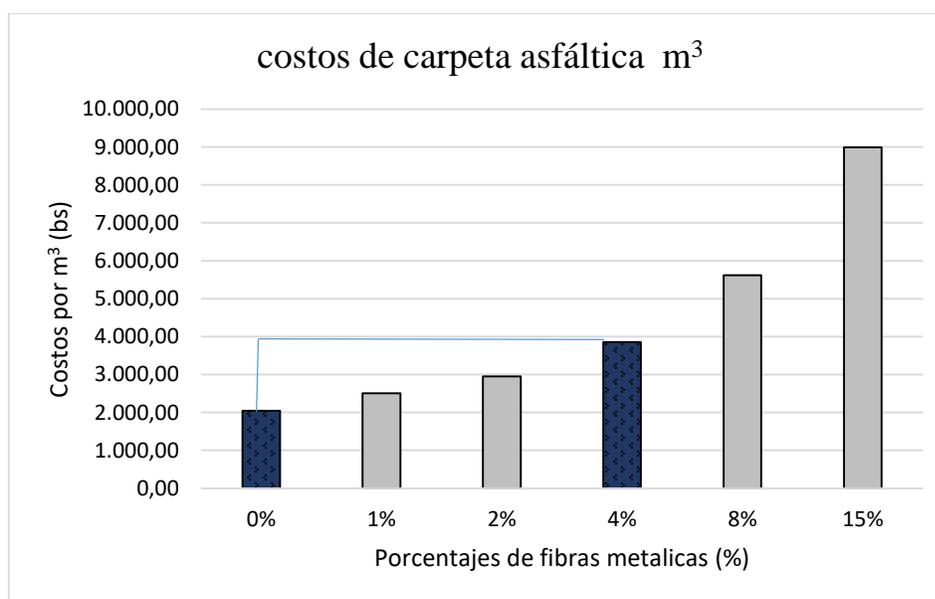
Análisis

La curva porcentaje de fibras metálicas versus profundidad de fisuras puede constatar, que es descendente hasta el 4%, lo que significa que hay menor fisuramiento, y que el material le está dando una propiedad auto-reparante a la mezcla asfáltica, gracias al entremallado interno que se forma con las fibras en la mezcla.

Un análisis al 8% y 15% indica que también es favorable, porque hay menor fisuramiento que en la mezcla convencional, pero se incrementa el costo del pavimento a este porcentaje, es por eso que no es conveniente.

El gráfico 3.20. muestra la diferencia que se tiene entre una mezcla convencional y una modificada con fibras metálicas al 4%, con un valor de 1.74 cm, que representa que hay una disminución máxima de profundidad de fisuras de 36.40%, frente a una mezcla convencional.

Gráfico 3.21. Histograma de costos de las carpetas asfálticas



Fuente: Elaboración propia

Análisis

El histograma de costos remarca los valores de la mezcla asfáltica convencional y modificada al 4%, se presenta un aumento del 88.82% en relación al costo de una mezcla convencional, el costo comprende el suministro, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se realizó la caracterización de los agregados y cemento asfáltico dando como conclusión que el agregado y el cemento asfáltico cumplen con las especificaciones técnicas.
- Se realizó la dosificación y compactación de las briquetas para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico cuyo valor es 5.64%, para una mezcla convencional y también usarlo en la mezcla modificada.
- En el ensayo de Marshall se comprobó que se mejora la calidad de la mezcla asfáltica alcanzando un valor máximo de 1702.74 Kg de estabilidad, siendo este el óptimo a 4% de fibras metálicas en la mezcla.
- En el ensayo de resistencia o compresión inconfiada, determina que para un porcentaje de fibras metálicas de 4% alcanza una resistencia máxima de 20.66 Kg/cm².
- Se concluye que para una carga de 20.66 Kg/cm², y un porcentaje de fibras de 4% en la mezcla se obtiene un menor ancho que es de 0.08 cm en promedio, que para lo cual se comprueba que el material añadido le da una propiedad de auto-reparación, teniendo en cuenta que las fibras forman un entre-mallado en el interior de la mezcla permitiendo que no se siga abriendo más.
- Para la carga de 20.66 Kg/cm² y un porcentaje de fibras metálicas de 4% en la mezcla, se tiene el valor mínimo de la longitud de fisuras que es de 2.42 cm en promedio.
- Se comprueba que se tiene menor profundidad de fisura usando 4% de fibras metálicas en la mezcla, dando como menor valor que es de 3.04 cm de profundidad, para una carga de 20.66 Kg/cm².
- De acuerdo a la hipótesis se concluye que si le proporcionamos a la mezcla convencional una condición auto-reparante agregando fibras metálicas, sus

propiedades son diferentes y permiten la disminución de la fisuración, logrando mayor calidad y estabilidad máxima de 1702.74 Kg y alcanzando una resistencia máxima de 20.66 Kg/cm².

- Del análisis de precios unitarios se tiene que va aumentando el costo por m³ de carpeta asfáltica por el costo de las fibras metálicas, teniendo un costo adicional de 88.82 % con un porcentajes de 4% de fibras metálicas comparado con el costo de una mezcla convencional.

4.2. RECOMENDACIONES

- Tener cuidado en la caracterización de los materiales, agregados y cemento asfáltico, para así evitar obtener datos erróneos en el momento de obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico.
- Seguir procedimientos de seguridad antes de realizar el dosificado y compactado de la mezcla asfáltica, utilizando guantes, barbijo, y lentes de seguridad para que los gases que emiten la mezcla, no sean perjudiciales a la salud.
- Cuidar la temperatura y realizar una mezcla homogénea, para evitar que se quemee el asfalto y pierda sus propiedades físicas y mecánicas.
- No perder la temperatura al contacto del medio ambiente y los artículos que se usa para vaciar al molde previamente calentado, y no generar zonas frías en la mezcla asfáltica.
- Golpear con el martillo compactador a una velocidad y altura constante debido a que el ensayo Marshall es una práctica pulcra y un error puede hacer fallar los resultados.
- No sobrecalentar varias veces el cemento asfáltico debido a que pierde sus propiedades.
- Tener mucho cuidado en la ruptura por Marshall, el ensayo de compresión confinado y tabulación de datos, para evitar lecturas erróneas.
- Calentar a temperatura constante los agregados pétreos, las fibras metálicas y los moldes de las briquetas, para obtener mejores resultados.
- Siempre se desea que haya una mejora continua del mismo, por lo tanto se recomienda a futuros compañeros que tengan interés en el proyecto, la complementación con la optimización de procesos para realizar un equilibrio técnico y económico entre una mezcla convencional y una con fibras metálicas al 4%, teniendo como base que las mezclas asfálticas con fibras metálicas tienen un mayor estabilidad y resistencia y menor fisuración, frente una mezcla convencional, y aún más recomendable sería la posibilidad de realizar y analizar briquetas con menor espesor para las mezclas con fibras metálicas, para hacer una comparación con una mezcla convencional.

