

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El progreso de un país está relacionado directamente con la capacidad de movilidad que posee el mismo, por esta razón el desarrollo de nuevas propuestas para mejorar las características de sus componentes y reducir sus costos de construcción desarrollarán una economía sustentable y competitiva globalmente.

La modificación de las mezclas asfálticas es una técnica utilizada para el mejor aprovechamiento de los asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en añadir algún tipo de material como las fibras a las mezclas asfálticas convencionales con el objetivo principal de modificar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica que estará sometida a condiciones de servicio como (temperatura, clima, zona geográfica y tipo de tráfico). De esta manera se busca diseñar materiales resistentes a los esfuerzos de tensión y deformación generando que los mismos se desempeñen apropiadamente y presenten una mayor vida útil de servicio. Considerando que la modificación de mezclas asfálticas es una práctica cada vez más común.

El uso de fibras como material modificador de mezclas asfálticas es una alternativa que promueve un progreso tecnológico, planteando otro uso con un proceder positivo para mejorar las propiedades físicas y mecánicas, fortaleciendo los mecanismos de fricción y trabazón entre los agregados con el consecuente beneficio al obtener periodos de diseño muchos mayores de los pavimentos convencionales.

La presente investigación pretende aplicar la técnica de modificación de mezclas asfálticas añadiendo fibras de poliolefina a una mezcla asfáltica convencional para así poder establecer un criterio de la mejora de sus propiedades mecánicas generando un análisis de beneficios y costos del uso de una mezcla modificada con fibras de poliolefina en comparación de una mezcla convencional y así poder aportar una alternativa en la construcción de vías de pavimentos flexibles de mezclas modificadas que posean un mejor desempeño durante su vida útil.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En conocimiento de la problemática vial del país y específicamente de los problemas que representa el mal estado de las carreteras en varias zonas del país, debido a los continuos problemas con el pavimento flexible, como son el ahuellamiento, desprendimientos y fisuras que deterioran el confort y disminuyen su funcionalidad, estos problemas hacen que se deje a un lado las ventajas que ofrece el pavimento asfáltico y se prefiera otra alternativa de pavimento con mayor facilidad de construcción y que genere menores problemas en su operación y mantenimiento durante su vida útil. Para esto se propone realizar una investigación detallada sobre la modificación que se puede realizar a la mezcla asfáltica convencional con la inclusión de fibras de poliolefina, para lograr como resultado una mejor calidad de las mezclas asfálticas, por ende, obtener capas de rodadura de la más alta calidad con costos razonables y proveer de una alternativa útil a la construcción de carreteras de pavimento asfáltico.

El uso de mezclas asfálticas modificadas es una técnica que viene siendo utilizada desde ya varios años en gran parte de los países del mundo, en la construcción y operación de pavimentos dando un significativo número de carreteras con una mayor duración vial que genera ahorros significativos para la economía de dichos países.

La presente investigación pretende dar a conocer la aplicación de las fibras de poliolefina como un agente modificador en las mezclas asfálticas que ayudará a mejorar las propiedades y características mecánicas de las mezclas asfálticas generando mezclas asfálticas de mayor resistencia y durabilidad, ofreciendo a nuestro país pavimentos con una mayor vida útil y costos de mantenimientos y reparaciones menores en comparación a pavimentos con mezclas convencionales.

Dentro de las ventajas que tiene la incorporación de fibras en la mezcla asfáltica se puede mencionar: Aumentar los módulos dinámicos, disminuir la susceptibilidad al agua, mejorar el comportamiento frente a las deformaciones permanentes, es posible aumentar la viscosidad del ligante asfáltico el cual se retiene en las fibras y permite un mejor recubrimiento de los áridos y aumenta la resistencia a la fisuración térmica debido a que las fibras actúan como un puente entre las microgrietas generadas por las repeticiones de cargas a las que está expuesto un pavimento durante su vida útil.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Situación problemática

El desarrollo de cualquier país está ligado a la comunicación entre sus regiones, donde el transporte de productos y servicios es de gran relevancia para su progreso.

Los pavimentos asfálticos requieren una gran cantidad de recursos financieros que son invertidos en las reparaciones y mantenimientos para alcanzar la vida útil de servicio para los que fue proyectado en condiciones adecuadas.

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 que genera nuevas demandas de obras viales con mayores periodos de vida útil, por esta razón buscamos soluciones que ayuden a mejorar las características de los pavimentos asfálticos y su comportamiento ante las cargas vehiculares y los agentes atmosféricos a los que está expuesto durante su vida útil.

El pavimento flexible de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la climatología, lo que genera un mal estado de las carreteras que implica mayores costos de transporte, representados en mantenimiento de los vehículos, mayor consumo de combustible y mayores tiempos de viaje, entre otros. Enfocándonos un poco más en las condiciones actuales de la infraestructura vial surgen nuevas técnicas para crear mezclas asfálticas más resistentes, de mejores características, debido a que las mezclas convencionales limitan las mismas ocasionando infraestructuras viales decadentes que no pueden satisfacer las demandas del país.

Es por esto que avanzar en la tecnología de pavimentos se convierte en una necesidad para el desarrollo del país y la técnica de modificación de mezclas asfálticas con fibras de poliolefina es una alternativa competente que ofrecerá mejoras ventajosas como:

Mayor resistencia, reducción de fisuras, una mayor vida útil en comparación a pavimentos realizados con mezclas convencionales.

1.3.2 Problema

¿Debido a que las estructuras viales construidas no logran cumplir con la resistencia esperada y fallan prematuramente es necesario incorporar las fibras de poliolefina y mejorar la resistencia y la durabilidad?

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Analizar las propiedades mecánicas y los beneficios económicos que se podrán obtener mediante la inclusión de fibras de poliolefina a una mezcla asfáltica convencional que a consecuencia nos generen mezclas asfálticas de mejor calidad.

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 convencional y la mezcla modificada con la inclusión de fibras de poliolefina
- Evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con fibras de poliolefina.
- Comparar la estabilidad, densidad, vacíos, flujo y costos de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina, con una mezcla asfáltica convencional.
- Realizar el análisis de precios unitarios de la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con fibras de poliolefina.

1.5 HIPÓTESIS

¿Si elaboramos una mezcla asfáltica convencional y le añadimos fibras de poliolefina, entonces sus propiedades mecánicas mejorarán logrando una mezcla asfáltica de mayor calidad, durabilidad y servicio?

1.6 VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1 Variables independientes

Mezcla asfáltica con fibras de poliolefina

1.6.2 Variable dependiente

Comportamiento de la mezcla asfáltica a partir de la inclusión de fibras de poliolefina

Tabla 1. Operacionalización de las variables

Variable	Concepto	Medición	Unidad
Independiente Mezcla asfáltica con fibras de poliolefina	La inclusión de fibras es una técnica empleada para mejorar las propiedades mecánicas y reológicas de la mezcla asfáltica utilizada en la construcción de una estructura de pavimento flexible principalmente usada en capas de rodadura.	Análisis granulométrico	% pasa cada tamiz
		Caracterización cemento asfáltico	glb
Dependiente Comportamiento de la mezcla asfáltica a partir de la inclusión de fibras de poliolefina	Para poder analizar el comportamiento de la mezcla asfáltica modificada se realizará la elaboración de la mezcla asfáltica con los agregados, cemento asfáltico y fibras de poliolefina que se usarán para el diseño de la mezcla asfáltica modificada y posterior se someterá a ensayos para medir sus propiedades mecánicas.	Porcentaje de vacíos	%
		Vacíos del agregado mineral	%
		Relación betumen de vacíos	%
		Densidad	gr/cm ³
		Estabilidad	lb
		Fluencia	pulg

Fuente: Elaboración propia

1.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La estadística descriptiva es la rama de las Matemáticas que recolecta, presenta y caracteriza un conjunto de datos (por ejemplo, edad de una población, altura de los estudiantes de una escuela, temperatura en los meses de verano, etc.) con el fin de describir apropiadamente las diversas características de ese conjunto. Al conjunto de los distintos valores numéricos que adopta un carácter cuantitativo se llama variable estadística.

Las variables pueden ser de dos tipos:

- Variables cualitativas o categóricas
- Variables cuantitativas

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 2. Muestras de mezcla asfáltica modificadas con fibras de poliolefina

Grupos de estudio		N ° de briquetas a realizar
Briquetas para determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico		15
Briquetas con fibras de poliolefina (%)	0.50	15
	1.00	15
	1.50	15
	2.00	15
	2.50	15
	3.00	15
Briquetas con el porcentaje óptimo de fibras de poliolefina		30
Total, de briquetas		135

Fuente: Elaboración propia

1.7.1 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 fórmula:

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

Donde:

\bar{x} = Media aritmética de una muestra

x_i = Valores del conjunto de muestra

n = Tamaño de la muestra

1.7.2 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

1.7.3 Varianza

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

1.8 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Para la presente investigación se realizará los ensayos para la caracterización de los agregados y del cemento asfáltico, bajo la normativa de la ABC del “Manual de ensayos de suelos y materiales-asfaltos”. El diseño de la mezcla asfáltica convencional se realizará con agregados que cumplan las especificaciones de peso específico, desgaste de los ángeles y equivalente de arena como también para el cemento asfáltico los ensayos de peso específico, ductilidad, penetración, punto de inflamación y punto de ablandamiento. La granulometría formada por los agregados será la que se ajuste y adecúe más a los agregados que se tiene, bajo la norma ASTM.

Se elaborará un grupo de 15 briquetas para encontrar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, el cual se lo estudiará con los ensayos del método Marshall; posteriormente se realizará el diseño de una mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina con la cual se elaborará 90 briquetas, para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico para cada porcentaje de fibras de poliolefina el cual será estudiado con los ensayos del método Marshall.

Una vez encontrado el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y fibras de poliolefina se procederá a realizar el diseño de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina con un total de 30 briquetas, para poder realizar un análisis estadístico y evaluar sus propiedades mecánicas, también se realizará el análisis de los precios unitarios tanto de la mezcla asfáltica convencional como de la mezcla asfáltica modificada con fibras de poliolefina.

Realizado el análisis estadístico y precios unitarios se procederá a realizar la comparación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional con la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina donde se evaluará las densidades, vacíos, estabilidad y fluencia. Para finalizar la presente investigación, se dará a conocer las conclusiones y recomendaciones que se pudieron obtener de la investigación realizada.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE FALLAS Y REFUERZOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

CAPÍTULO II
ASPECTOS GENERALES SOBRE FALLAS Y REFUERZO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS

2.1 PAVIMENTOS

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permita una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

El pavimento como estructura de vías de comunicación terrestre, formada por una o más capas de materiales, 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 Clasificación de los pavimentos

En nuestro medio los pavimentos se clasifican en:

- Pavimentos rígidos
- Semi-rígidos
- Pavimentos flexibles

2.1.1.1 Pavimentos rígidos

Aunque este tipo de pavimentos guarda básicamente la misma estructura de un pavimento flexible, una de sus capas se encuentra rigidizada artificialmente con un aditivo que puede ser: asfalto, emulsión, cemento, cal y químicos. El empleo de estos aditivos tiene la finalidad básica de corregir o modificar las propiedades mecánicas de los materiales locales que no son aptos para la construcción de las capas del pavimento, teniendo en cuenta que los adecuados se encuentran a distancias tales que encarecerían notablemente los costos de construcción.

2.1.1.2 Pavimentos semirrígidos

Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado la cual se denomina subbase del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además, como el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento.

2.1.1.3 Pavimentos flexibles

Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y subbase. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiente de las necesidades particulares de cada obra.

Figura 1. Estructura del pavimento flexible



Fuente: Instructivo del proceso constructivo de una vía en pavimento flexible (Angie Ortiz 2017)

2.1.1.3.1 Funciones de las capas de un pavimento flexible

La subbase granular

- Función económica. Una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos

en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia, puede ser construido con materiales de alta calidad; sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad la cual es frecuentemente la más barata. Esta solución puede traer consigo un aumento en el espesor total del pavimento y, no obstante, resultar más económica.

- Capa de transición. La sub base bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y, por otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad.
- Disminución de las deformaciones. Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones) o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse con la capa subbase impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.
- Resistencia. La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidos a un nivel adecuado a la subrasante.
- Drenaje. En muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar.

La base granular

- Resistencia. La función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.
- Función económica. Respecto a la carpeta asfáltica, la base tiene una función económica análoga a la que tiene la subbase respecto a la base.

Carpeta

- Superficie de rodamiento. La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.
- Impermeabilidad. Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.
- Resistencia. Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.¹

2.1.1.3.2 Características de los pavimentos

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

- Resistencia estructural.
- Deformabilidad.
- Durabilidad.
- Costo.
- Requerimientos de conservación.
- Comodidad.

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, la teoría 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 isotropos; la heterogeneidad de la estructura de los pavimentos flexibles,

¹ Montejo, Alfonso. *Ingeniería de pavimentos para carreteras*, Colombia, Stella Valbuena de Fierro, 2002

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.

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.

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.

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.

Requerimientos de conservación

Los factores climáticos influyen de gran manera en la vida de un pavimento. Otro factor es la intensidad del tránsito, por lo 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.

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

2.2 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.

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 tráfico pesados intensos.

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

2.2.1 Clasificación de las Mezclas Asfálticas

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

2.2.1.1 Por fracciones de agregado pétreo empleado

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

² Chavarry Koosi Julio Cesar, Correa Zeña Andy Wilfredo, Cruz Alvis Michael Edu, Cubas Rojas Jesús Ángel. Universidad Señor de Sipán. Pavimentos rígidos y flexibles. (2020)

- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

2.2.1.2 Por la temperatura de puesta en obra

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

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

2.2.1.3 Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

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

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

2.2.1.4 Por el tamaño máximo del agregado pétreo

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

2.2.1.5 Por la estructura del agregado pétreo

- **Mezclas con esqueleto mineral:** Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debido al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- **Mezclas sin esqueleto mineral:** No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debido exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

2.2.1.6 Por la granulometría

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

Tabla 3. Clasificaciones de mezclas asfálticas

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

Fuente: Capítulo 3. Mezclas asfálticas. Alejandro Padilla Rodríguez

2.2.2 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 (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior al 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 3% al 6% de asfalto en volumen de agregados pétreos.

2.2.2.1 Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente

The Hubbard-Field (1920's). Método de diseño de mezclas asfálticas fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.

Método Marshall (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.

Método Hveem (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial.

Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials. WASHTO (1984). Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los

requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia a las roderas. Con FHWA.

Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987). La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida; tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura. Con NCHRP.

Método SUPERPAVE (1993) El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000.³

Nota: Para la realización de la presente investigación se usará el método Marshall

2.2.2.2 Características y comportamiento 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.

³ Alejandro Padilla Rodríguez. *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista.* (2004)

Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla.
- Vacíos de aire o simplemente vacíos.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto.

2.2.2.2.1 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.

2.2.2.2.2 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 a donde 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 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.

2.2.2.2.3 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 durable será la mezcla.

2.2.2.2.4 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.

2.2.2.3 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimento posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber qué significa una de estas propiedades, cómo es evaluada y qué representa en términos de rendimiento del pavimento.

2.2.2.3.1 Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

2.2.2.3.2 Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y

oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas, estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

2.2.2.3.3 Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así cómo gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

2.2.2.3.4 Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar

agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modifica cumpla con los otros criterios, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

2.2.2.3.5 Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada y bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

2.2.2.3.6 Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

2.2.2.3.7 Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidro planeo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo o asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.⁴

2.2.2.4 Componentes de la mezcla asfáltica

- Asfalto de petróleo.
- Agregados pétreos.

2.2.2.4.1 Asfalto de petróleo

El asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. 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. Casi todo el asfalto usado en los Estados Unidos es producido por refinerías modernas de petróleo y es llamado asfalto de petróleo. El grado de control permitido por los equipos modernos de refinería permite la producción de asfaltos con características distintas, que se prestan para usos específicos. Como resultado, se producen asfaltos para pavimentación, techado y

⁴ Asphalt institute MS-22. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

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

2.2.2.4.1.1 Origen y naturaleza del asfalto

A veces hay confusión acerca del origen del asfalto, de cómo es refinado, y cómo se clasifica en sus diferentes grados. Esto se debe a que el asfalto es usado para muchos propósitos. Existe una confusión similar respecto a ciertos términos relacionados con las propiedades del asfalto.

Tabla 4. Historia del asfalto

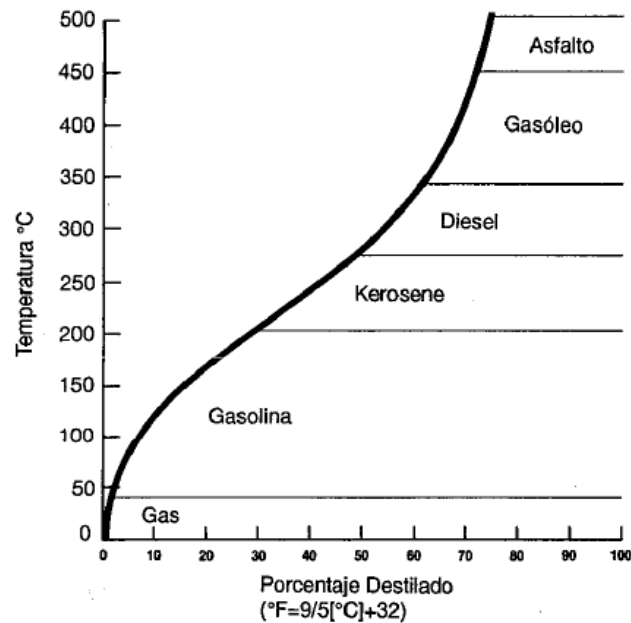
AÑO	USO
6000 a.C.	En Sumeria, se utilizaba en la industria de navegación. La torre de Babel es una de las tantas construcciones donde se utilizó como m En Sumeria, se utilizaba en la industria de navegación.
3200 - 2600 a.C	Utilizado por los egipcios para impermeabilizar.
2600 - 540 a.C	Excavaciones arqueológicas recientes indican el amplio uso del asfalto en Mesopotamia y el Valle de Indo como aglomerante para albañilería y construcción de carreteras y para capas de impermeabilización en estanques y depósitos de agua.
300 a.C.	Se emplea ampliamente en Egipto para embalsamamientos.
1802 d.C.	En Francia se emplea roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras.
1838 d.C.	En Filadelfia se emplea roca asfáltica importada en la construcción de aceras.
1870 d.C.	Construcción del primer pavimento asfáltico en Newark, Nueva Jersey por el profesor E. J. DeSmedt, químico belga.
1876 d.C.	Construcción del primer pavimento de tipo sheet asphalt en Washington D. C. con asfalto de lago importado.
1902 d.C.	En Estados Unidos se obtienen de la destilación del petróleo aproximadamente 120,000 barriles al año.

Fuente: Esquema Actual y Futuro de Producción de Asfaltos en PEMEX Refinación. Ing.: Jorge Rodríguez Villar. 2000

2.2.2.4.1.2 Refinación de petróleo

El crudo de petróleo es refinado por destilación. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento, en etapas, de la temperatura. Las diferentes fracciones se separan a diferentes temperaturas. Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. El asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480°C (900°F). Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo de petróleo que se esté refinando o del grado de asfalto que se esté produciendo.

Figura 2. Productos y temperaturas típicas de destilación



Fuente: Principios de construcción de pavimientos de mezclas asfáltica en caliente
Asphalt institute

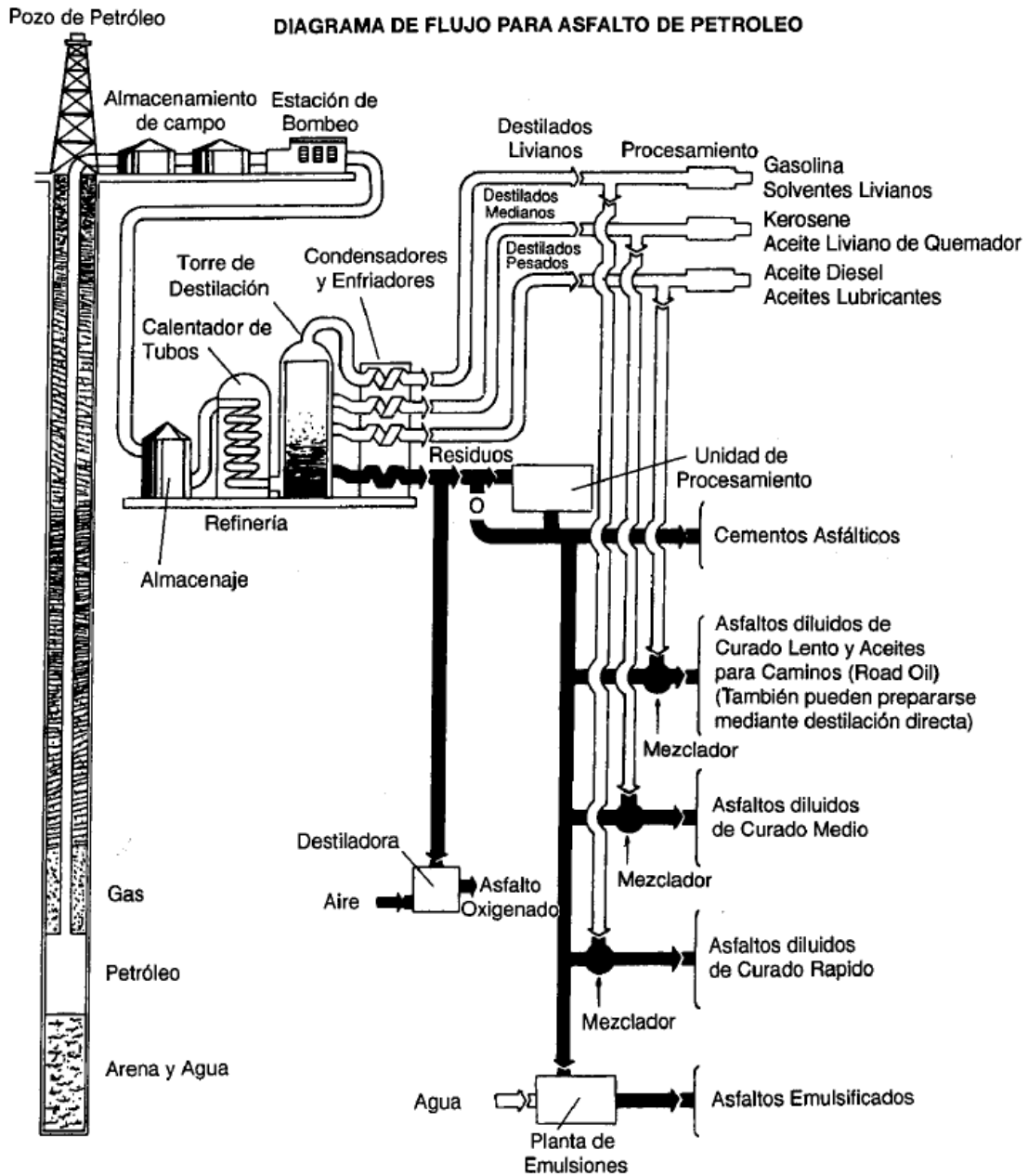
2.2.2.4.1.3 Refinación del asfalto

Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfalto. Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen, para que estos cumplan ciertos requisitos. Esto se logra, usualmente, mezclando varios tipos de crudos de petróleo antes de procesarlos. El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

existen dos procesos por los cuales puede ser producido un asfalto después de que se han combinado los crudos de petróleo: destilación al vacío y extracción con solventes. Como se discutió anteriormente, la destilación por vacío consiste en separar el asfalto del crudo mediante la aplicación de calor y vacío. En el proceso de extracción con solvente, se remueven más gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual. Una vez que los asfaltos han sido procesados estos pueden ser mezclados entre sí en ciertas proporciones para producir grados intermedios de asfalto. Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia. En

resumen, para producir asfaltos con características específicas, se usa el crudo de petróleo o mezclas de crudos de petróleo. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de destilación por vacío o extracción con solventes.⁵

Figura 3. Proceso de flujo para asfalto de petróleo



Fuente: Principios de construcción de mezclas asfálticas en caliente del Asphalt institute

⁵ Asphalt institute MS-22. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

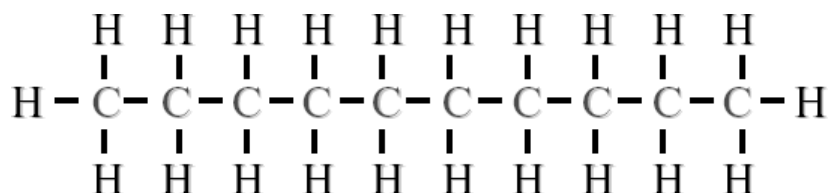
2.2.2.4.1.4 Composición del asfalto

El asfalto es un compuesto constituido fundamentalmente por la mezcla de un gran número de hidrocarburos de diversos tipos, asociados en proporciones también muy variables.

La mayoría de estos hidrocarburos están presentes en el petróleo crudo, pero el proceso de destilación origina ciertas transformaciones químicas y hace que se eliminen los hidrocarburos ligeros, quedando en el asfalto sólo hidrocarburos pesados.

En los hidrocarburos constituyentes del asfalto los átomos de carbono se unen entre sí mediante cadenas o enlaces sencillos, dobles o triples y cuyas valencias libres se saturan con átomos de hidrógeno.

Figura 4. Cadena de hidrocarburos, es la composición básica del Asfalto

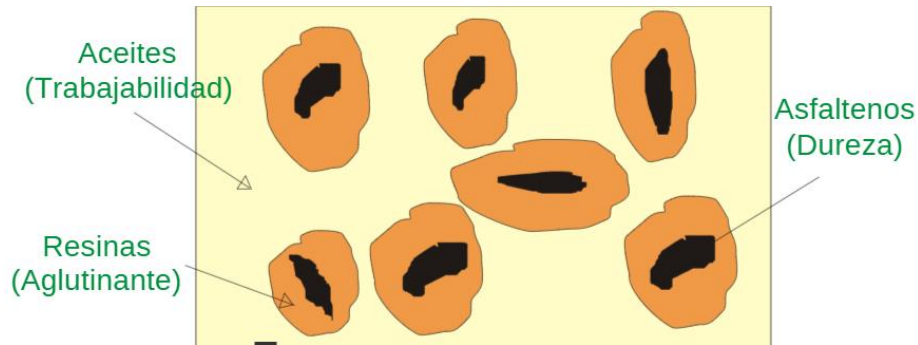


Fuente: www.repositorio.uniandes.edu.co

2.2.2.4.1.5 Composición química

El asfalto está compuesto por asfáltenos, resinas, aromáticos y saturados. Los asfáltenos proporcionan la dureza del asfalto, las resinas son las que aglutinan los asfáltenos, brindando la capacidad de liga. Los aromáticos y saturados son aceites, que le dan la consistencia para que sean trabajables.

Figura 5. Representación esquemática de los componentes del asfalto



Fuente: Asociación de Productores y Pavimentos Asfálticos de Colombia. Cartilla del pavimento asfáltico. (2004)

2.2.2.4.1.6 Clasificación de los asfaltos

Los asfaltos se agrupan en tres clases, principalmente:

Cementos asfálticos (AC)

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

Asfaltos líquidos

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

- SC: asfaltos rebajados de curado lento
- MC: asfaltos rebajados de curado medio
- RC: asfaltos rebajados de curado rápido

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

Emulsiones asfálticas

Se componen de dos elementos: agua y cemento asfáltico. Se utilizan en tratamientos superficiales, riegos de adherencia, mezclas abiertas, estabilización de suelos y lechadas asfálticas. Dependiendo de la carga eléctrica de los glóbulos de asfalto pueden ser catiónicas (C, carga +) o aniónicas (A, carga -). Dependiendo de la velocidad del rompimiento de la emulsión se clasifican en rompimiento rápido (RR), medio (RM) o lento (RL).

2.2.2.4.1.7 Propiedades del asfalto

Las propiedades físicas más importantes del cemento asfáltico que son tenidas en cuenta en el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, son:

Durabilidad

Indica qué tanto permanecen en un cemento asfáltico sus características cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

Adhesión y cohesión.

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

Susceptibilidad a la temperatura.

Esta es una de las propiedades más importantes del asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

2.2.2.4.2 Agregados pétreos

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

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

Figura 6. Agregados pétreos



Fuente: Elaboración propia

2.2.2.4.2.1 Clasificación de agregados

Los agregados pueden ser naturales o procesados. De acuerdo con su tamaño, se dividen en gravas, arenas y relleno mineral (llenante mineral o filler). Los materiales pueden ser producidos en canteras abiertas o tomados de la ribera de los ríos (cantera de río). En este último caso son agregados pétreos aluviales.

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. La roca se tritura para volver angular la forma de la partícula y para mejorar la distribución (gradación) de los tamaños de las partículas.⁶

2.2.2.4.2.2 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

⁶ Asociación de Productores y Pavimentos Asfálticos de Colombia. *Cartilla del pavimento asfáltico*. (2004)

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 hidrofóbicos (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.

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 conformará 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.⁷

2.3 TIPOS DE FALLAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Hoy en día es de suma importancia conocer los tipos de fallas que pueden presentarse en una mezcla asfáltica en caliente durante su vida útil al estar expuesta a las cargas del tránsito y al medio ambiente, sin embargo, debido a las limitaciones de presupuesto en

⁷ <https://pavimentoencarreteras.com/materiales-2/>

Guatemala, no se ha logrado desarrollar la investigación en muchas áreas de la ingeniería vial como lo han hecho otros países como Chile, Colombia, México y especialmente Estados Unidos.

Estos estudios coinciden en dividir en tres los grupos básicos de deterioro que presentan las mezclas asfálticas en caliente los cuales están directamente relacionados con las propiedades individuales o en conjunto de los materiales que las forman.

2.3.1 Deformación permanente

Se trata de firmes construidos con materiales de menor resistencia a la necesaria o con materiales de buena calidad, pero con espesores insuficientes. En términos generales ésta es la falla que se produce cuando las combinaciones de la resistencia al esfuerzo cortante de cada capa y sus respectivos espesores no son suficientes para establecer un mecanismo de resistencia adecuado que soporte las cargas a las que serán sometidos.

En nuestro medio es ampliamente conocida como ahuellamiento y es irrecuperable; por lo regular es una manifestación de un déficit estructural del pavimento debido a que la deformación se da en todas las capas de la estructura de pavimento incluyendo a la subrasante, originado por la repetición de cargas de tránsito.

Existe otro tipo de ahuellamiento donde la deformación se da únicamente en la carpeta asfáltica, este es originado por la baja resistencia al corte que presenta la mezcla asfáltica y por lo tanto no es capaz de soportar las cargas del tránsito; está asociado a altas temperaturas de trabajo de la mezcla asfáltica en caliente.

De acuerdo con el manual de pavimentos para mezclas asfálticas en caliente del Departamento del Transporte y la Administración de Carreteras de los Estados Unidos, entre las principales causas de la deformación permanente o ahuellamiento están:

- Baja cantidad de vacíos de aire (menos del 4%).
- Exceso de vacíos de aire (más del 8%).
- Cemento asfáltico de baja viscosidad.
- Mayor consolidación de las capas inferior a la carpeta de rodadura.

- Mayor exposición de la carpeta de rodadura a velocidades bajas o cargas de larga duración.
- Utilización de arena natural, poca cantidad de polvo mineral y la utilización de agregados redondeados.

Figura 7. Deformación permanente a nivel de carpeta asfáltica



Fuente: Instituto Nacional de Vías. Guía Metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras.

2.3.2 Agrietamiento por fatiga

Es el resultado de un esfuerzo de tensión mayor a la resistencia a la tensión de la mezcla asfáltica en caliente; en un inicio se manifiesta por fisuras longitudinales intermitentes dentro de la huella; generalmente es asociado con la repetición y magnitud de las cargas del tránsito.

El problema se hace más grave cuando existe un drenaje deficiente en el pavimento lo cual contribuye a que las capas inferiores se saturen y pierdan resistencia; otra causa del agrietamiento por fatiga es el reiterado paso de camiones sobrecargados y/o por espesores de pavimento no adecuados; en su estado más avanzado se representa por medio de baches y desprendimientos de la carpeta asfáltica; en general, se considera que el agrietamiento por fatiga es más un problema estructural que de materiales.

Figura 8. Agrietamiento por fatiga



Fuente: Instituto Nacional de Vías. Guía Metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras.

2.3.3 Fisuración por baja temperatura

Es atribuible a la deformación por tensión inducida en la mezcla asfáltica en caliente a medida que la temperatura baja; este tipo de deterioro es atribuible más a los efectos del medio ambiente que a la acción de las cargas de tránsito; se representa por medio de fisuras transversales intermitentes perpendiculares a la dirección del flujo de tránsito.

Las fisuras por baja temperatura se forman por contracciones en la carpeta asfáltica que por lo regular están en servicio en climas fríos; cuando la carpeta se contrae se originan deformaciones de tensión en su interior, cuando estos esfuerzos exceden la resistencia a la tensión de la mezcla asfáltica, esta se fisura; entre algunas de las causas que pueden originar este tipo de deterioro están: la utilización de asfaltos duros en climas fríos, ligantes asfálticos oxidados y mezclas con un alto porcentaje de vacíos.⁸

⁸ Instituto Nacional de Vías. *Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras.* (2008)

Figura 9. Fisuración por baja temperatura



Fuente: Instituto Nacional de Vías. Guía Metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras.

2.4 MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Un asfalto modificado es un asfalto común al cual se le adicionan productos tales como látex, polietileno, cal, cemento, azufre, asfáltenos naturales, hule molido de neumáticos, aceites, resinas, fibras, vidrio o asbesto, entre otros, con el fin de modificar y mejorar algunas de sus características mecánicas y reológicas.

Una mezcla asfáltica modificada es la combinación de material pétreo, ligante asfáltico y un aditivo que busca mejorar algunas de sus propiedades mecánicas con el fin de elevar la vida útil del pavimento y su resistencia. Se ha comprobado que las mezclas convencionales satisfacen algunas de las necesidades del mercado colombiano, como la adhesión, en distintas condiciones de carga e incremento del tránsito, pero la necesidad de optimizar los costos de las vías nacionales, cuando en su uso se requieren mayores capacidades y comportamientos, resultan insuficientes. Por ejemplo, en los asfaltos convencionales es difícil eliminar el problema del ahuellamiento a costo razonable especialmente cuando se tienen condiciones de altas temperaturas. El objetivo de mejorar una mezcla asfáltica es lograr el cambio de alguna de las propiedades de la misma, tales como:

- Resistencia a la fisuración y susceptibilidad térmica.
- Resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento).
- Adherencia entre los agregados pétreos.

- Adherencia entre la carpeta de rodamiento y la base o subbase.
- Cohesividad.
- Resistencia al envejecimiento.
- Resistencia a la fatiga.⁹

2.4.1 Metodología para la modificación de mezclas asfálticas

La modificación de las mezclas asfálticas se puede dar por dos métodos llamados procesos húmedos y procesos secos.

- Proceso por vía húmeda
- Proceso por vía seca

Proceso por vía húmeda

En este proceso húmedo el plástico es mezclado con el cemento asfáltico para obtener la mezcla modificada asfalto-plástico la cual será usada al igual que un ligante modificado.

La modificación de un asfalto ligante depende de varios factores entre ellos; el tamaño, tipo, textura y proporción de plástico, tipo de asfalto, temperatura, tiempo durante el mezclado.

Proceso por vía seca

Es cualquier método donde el material a adicionar se le adiciona mezclándolo con los agregados antes de adicionar el cemento asfáltico.

Cuando el material se quiere adicionar como un agregado más en la mezcla asfáltica por lo general constituyendo una parte del agregado fino lo cual puede estar entre el 1 y 3 % del peso total de los agregados de la mezcla. Por ello este método no necesita de un equipo especial, solo una forma de adicionar la cantidad necesaria en el momento adecuado para que se mezcle con el agregado cuando estos llegan a alcanzar una temperatura determinada antes de añadirle el ligante.

⁹ Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PEAD) y poliestireno (PS). (2007).

En general, la literatura de referencia reporta que por vía húmeda las desventajas, entre otras, son el mayor costo inicial de la mezcla (se requiere nuevos equipos en planta como la unidad de mezclado y almacenamiento del asfalto-aditivo, cambio de bombas y tuberías) y el aumento de la temperatura de mezclado. Por vía seca el tiempo de compactación de la mezcla es mayor y demanda mayor cantidad de ligante asfáltico.¹⁰

2.4.2 Metodología para la inclusión de las fibras de poliolefina en la mezcla asfáltica por vía seca

Se escoge el proceso por vía seca como inclusión de las fibras de poliolefina a la mezcla por dos razones: la primera tal y como expone Velar (1997) citado por (Rondon Quintana & Reyes Lizcano) en Concreto Asfáltico, (2015); “Por vía seca el tiempo de compactación de la mezcla es mayor y demanda mayor cantidad de ligante asfáltico. Sin embargo, el proceso seco es más económico que el húmedo.” El proyecto tiene el claro objetivo de lograr una investigación precisa que aporte al conocimiento utilizando de la mejor manera el presupuesto para su ejecución.

2.4.3 Dosificaciones para modificar mezclas asfálticas

Los polímeros usados para la modificación de asfalto son poliolefinas termoplásticas (plastómeros) y las poliolefinas elastoméricas (elastómeros) y además (un poco por las causas ambientales) se ha fomentado el uso de materiales de desecho, como el hule de llanta molido. Las proporciones de polímero están de acuerdo con su aplicación, por ejemplo, para pavimentos de 2 a 6% en peso mientras que para impermeabilizantes del 10 al 15% en peso; si se usa hule de llanta molido los porcentajes se elevan hasta un factor de 5 veces.¹¹

Autores que realizaron trabajos de modificaciones de mezclas asfálticas:

Bejarano, C., Caicedo, C. Análisis del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica tipo MDC.19 con fibra natural de caña de azúcar (2017). Porcentaje de bagazo de caña de azúcar de 0.25%, 0.50%, 1.00% y 3.00%.

¹⁰ Silvestre Velásquez Deyvis Fausto. *Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales y reforzadas con plástico reciclado.* (2017)

¹¹ G, Hernández-Padrón. Caracterización morfológica de asfalto modificado con diferentes copolímeros a altas concentraciones. (2011)

Moderá, E. Comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica densa en caliente con adición de polipropileno. (2018). Adición de Poli sombra al 0.50%, 1.00%, 1,50% y 2.00%.

Gómez, C.A estudio de una mezcla asfáltica MDC.19 modificada con adición de polipropileno de baja densidad (PBD) por vía seca. (2018). La incorporación de 1%, 2% y 3% de PBD en la mezcla asfáltica respectivamente por vía seca.

Bach, M., Bach, K. Evaluación del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente mejorada con fibra acrílica respecto a la mezcla asfáltica convencional. (2019). Dosificaciones de fibra acrílica entre el 0.10%, 0.15% y 0.20%.

Velásquez, T. Modificación de mezclas asfálticas con fibras de polipropileno. (2007). Las proporciones de fibras de polipropileno fueron 0.50%, 0.20% y 1.00% del peso de las muestras fabricadas.

Butonal NX 1129 (SBR)

El producto Butonal NX 11 29 es una dispersión de polímero de látex diseñado para ser mezclado con el cemento asfáltico y producir un aglutinante altamente elástico y estable. Esta modificación se realiza mediante la adición del polímero SBR (Butonal NX 1129) a 1%, 2% y 3%; fue agitado a una temperatura constante de 175 °C durante 15 minutos. Se utilizaron 500 g de Asfalto AC-30. Este asfalto corresponde a la clasificación Tipo II.

Muestra A1 (terpolímero)

La muestra A1 es un terpolímero etileno – éster acrílico – glicedil metacrilato, el cual es nuevo en el mercado y no se cuenta con estudios anteriores ni utilización del mismo. Esta modificación se realiza mediante la adición del polímero A1 (pellets) a 0.50%, 1.00%, 1.50% y 2.00%; agitando a una temperatura constante de 175 °C por 10 minutos. Se utilizaron 250 g de Asfalto AC-30. Luego de algunos minutos de agitación se le agrega la cantidad estipulada de ácido poli fosfórico que se emplea como catalizador que reacciona desarrollando un encadenamiento químico entre el polímero y el asfalto. Se agita por otros 5 minutos.¹²

¹² Kaa, B., Mogoruzá, R. Anguizola, I. *Análisis de propiedades de mezclas.*

El porcentaje de fibras que se usará en la dosificación de la mezcla asfáltica modificada con porcentajes de fibras de poliolefina en 0.5, 1.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, y 3.0 % descritos en la tabla 1.2 fueron determinados en base a consultas de investigaciones realizadas en varios países con distintos tipos de modificadores de mezclas asfálticas y en algunos casos materiales similares a las fibras de poliolefina descritos en el subtítulo 2.4.3.

2.5 LAS FIBRAS

Hay muchos tipos de fibras disponibles para incorporar en mezclas de asfalto para pavimentación. La celulosa y las fibras minerales se usan comúnmente en mezclas asfálticas de matriz pétreo de grado cerrado y mezclas porosas o de grado abierto. Las fibras de polipropileno y poliéster se usaban anteriormente en mezclas densas.

Figura 10. Fibras poliméricas



Fuente: Elaboración propia

El uso de fibras en mezclas asfálticas se remonta a muchas décadas. El primer uso de fibras en el asfalto fue el uso de paja en las especificaciones de construcción del antiguo Egipto. En los Estados Unidos las fibras de asbesto se utilizaron ya en la década de 1920, y este uso continuó hasta la década de 1960, cuando las preocupaciones ambientales y de salud pusieron fin. Las fibras de algodón se usaban en la década de 1930, pero tendían a degradarse con el tiempo. Desde entonces, se han utilizado muchos tipos de fibras en diversas aplicaciones y en diferentes partes del mundo. Según los informes, las fibras se utilizaron para proporcionar los siguientes beneficios:

- Mayor resistencia a la tracción que resulta en un aumento resistencia al agrietamiento.
- Severidad reducida del agrietamiento.
- Mayor resistencia a la fatiga.
- Mayor resistencia a la formación de surcos como resultado de la restricción lateral dentro de la mezcla.
- Mayor resistencia a la abrasión.
- Posibles costos de ciclo de vida más bajos derivados de una vida útil más larga.

2.5.1 Fibras poliméricas sintéticas

Las más utilizadas, las fibras poliméricas son poliéster, polipropileno, aramida y combinaciones de polímeros. Otras fibras incluyen nailon, polipara-fenileneftalida, y otros menos comúnmente materiales usados. Diferentes polímeros tienen diferentes puntos de fusión, que deben tenerse en cuenta al agregar a la mezcla asfáltica en caliente. La producción de fibras sintéticas generalmente implica estirar un polímero se derrite a través de pequeños agujeros. Las fibras se pueden agrupar juntos en hilo (aunque el hilo no se usa típicamente hoy en día en hormigón asfáltico). Según se informa, las fibras de aramida se contraen a altas temperaturas, lo que ayuda a resistir deformación del pavimento.¹³

¹³ Programa cooperativo nacional de investigación de carreteras. *Aditivos de fibras en mezclas de asfalto*. (2015).

Tabla 5. Beneficios y desventajas de los tipos de fibras comunes

Tipo de fibra	Ventajas reportadas	Desventajas reportadas
Celulosa	<ul style="list-style-type: none"> • Estabiliza el aglutinante en yeso de clasificación abierta y con huecos matriz mezclas asfálticas (SMA). • Absorbe el aglutinante, lo que permite un alto contenido de aglutinante para una mezcla más duradera. • Relativamente barato. • Puede estar hecho de una variedad de materiales vegetales. • Ampliamente disponible. • Puede ser de materiales reciclados como papel periódico. 	<ul style="list-style-type: none"> • La alta absorción de aglutinante aumenta el costo del aglutinante. • No es fuerte en modo de tracción.
Mineral	<ul style="list-style-type: none"> • Estabiliza el aglomerante en SMA de grado abierto. • No tan absorbente como la celulosa. • Las fibras conductoras de electricidad se han utilizado para el calentamiento inductivo con fines de descongelación o para promover la curación de grietas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Algunos pueden corroerse o degradarse debido a las condiciones de humedad. • Puede crear mezclas ásperas que son difíciles de compactar y pueden ser agresivas, causando daño a los neumáticos si se usa en superficies.
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> • Resiste el agrietamiento, la formación de surcos y baches. • Aumenta la fuerza y la estabilidad de la mezcla. • Punto de fusión más alto que el polipropileno. • Alta resistencia a la tracción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Una gravedad específica más alta significa que se agregan menos fibras por unidad de peso. • Rentabilidad no comprobada/varía. • Más bajo punto de fusión que algunos otros materiales de fibra requiere el control de las temperaturas de producción.
Poliiolefina y Aramida	<ul style="list-style-type: none"> • Controla la formación de surcos, grietas. • Rentabilidad no probada/varía. • Combina los beneficios de los tipos de fibra de aramida y poliolefina (polipropileno). 	<ul style="list-style-type: none"> • Comienza a acortarse a 300°F. • Rentabilidad no comprobada/varía.
Aramida	<ul style="list-style-type: none"> • Resiste el agrietamiento, la formación de surcos y baches. • Aumenta la fuerza y la estabilidad de la mezcla. • Alta resistencia a la tracción. • Puede contraerse a temperaturas más altas, lo que puede ayudar a resistir la formación de baches. 	
Fibras de vidrio	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo alargamiento. • Alta recuperación elástica. • Alto punto de reblandecimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Quebradizo. • Las fibras pueden romperse donde se cruzan entre sí. • Puede romperse durante el mezclado y la compactación. • Rentabilidad no comprobada/varía.

Fuente: Programa cooperativo nacional de investigación de carreteras. Aditivos de fibras en mezclas de asfalto. (2015)

2.5.2 Fibra de poliolefina

Se denomina poliolefina a las fibras sintéticas hecha de una poliolefina tal como polipropileno (estructura de tres dimensiones con una columna vertebral de átomos de carbono) o polietileno (estructura lineal con unidades que se repiten).

Estas fibras (también llamadas olefinas) pertenecen a un tipo de hidrocarburos insaturados que se podrían definir como alcanos que han perdido un par de átomos de hidrogeno. En lugar de estos átomos de hidrógeno las olefinas emplearon un doble enlace entre dos carbonos.

Figura 11. Fibras de poliolefina sintéticas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Ventajas y desventajas del uso de fibras de poliolefina

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Mayor Resistencia contra la Propagación de fisuras.• Mayor vida.• Mayor Fuerza (150%).• Mayor Resistencia a la ruptura.• Mayor Energía de Fractura antes de una falla.• Mayor Resiliencia.• Reducción de las fisuras de origen térmico.	<ul style="list-style-type: none">• Comienza a acortarse a 300°F.• Rentabilidad no comprobada/varía.

Fuente: Elaboración propia

Características generales

- Mayor densidad que el agua
- Insolubles en agua
- Son incoloras
- Presentan un doble enlace carbono-carbono
- Su isometría es geométrica o cis-trns

Desde el punto de vista textil, existen tres fibras de poliolefinas:

- Polietileno
- Polipropileno
- Elastómeros

2.5.2.1 Polietileno (PE)

Es cristalino en más de un 90%; tiene un punto de fusión de 135 °C lo que le hace resistente al agua en ebullición; debido a su alta densidad es opaco, aunque no es tan fuerte o rígido como un plástico de ingeniería. Es propenso a agrietarse bajo las tensiones del ambiente. Más de la mitad de su uso es para la fabricación de recipientes, tapas y cierres; otro gran volumen se moldea para utensilios domésticos y juguetes; un uso también importante que tiene es para tuberías y conductos. Tiene dos Tg, una a -30 °C y otra a -80 °C.

Propiedades físicas

- Absorción del agua
- Densidad (gr/cm³) 0.90-0.91
- Inflamabilidad
- Resistencia a la radiación
- Resistencia a los rayos ultravioletas

Propiedades químicas

- Ácidos-concentrados buena. Aceptable
- Ácidos-Diluidos buena
- Alcalis buena

- Alcoholes buena
- Cetonas buenas-aceptable
- Grasas y aceites buena-aceptable
- Halógenos aceptable-buena

Según las propiedades fisicoquímicas del producto, se pueden distinguir tres tipos distintos de polietileno. Cada uno de ellos requiere un proceso de producción distinto y la diferencia principal es la densidad del producto final.

- Polietileno de baja densidad (LDPE).
- Polietileno de media densidad (MDPE).
- Polietileno de alta densidad (HDPE).

2.5.2.2 Polipropileno (PP)

Es el más nuevo de los plásticos que se fabrican en gran volumen, también es el más ligero y el más cristalino. Su Tg es de -10 °C. Su fuerza tensil, dureza y rigidez son mayores que las de los polietilenos, pero su resistencia al impacto es baja. Tiene una desventaja importante: es susceptible a la degradación por luz, calor y oxígeno; debido a esto, es necesario añadirle un antioxidante y un estabilizador a la luz ultravioleta lo que encarece su costo. Se utiliza principalmente en la formación de un copolímero junto con el HDPE.

Se obtienen por fusión del polipropileno isotáctico, esto es posible debido a su ordenamiento que hace que se puedan orientar. La forma sindiotáctica no existe en el mercado. Estas fibras son difíciles de teñir y una mala percepción al tacto, sin embargo, son baratas ya que su densidad es baja. Son poco propensas a la electricidad estática, no son inflamables y son poco reactivas químicamente. Como propiedades negativas tienen bajo punto de fusión, baja Tg y son poco estables a la luz. Sus usos son para bajo alfombras, telas y cuerdas para muelles ya que flotan.

Características

- La fibra encoge a partir de los 70°C
- Funde a los 160°C
- Su grado de aislamiento térmico es el más bajo de las fibras textiles

- Es menos estable a la luz solar que el polietileno
- Es muy resistente

Propiedades físicas

- Densidad entre 0.92 y 0.93 (gr/cm³)
- Una carga de 25.5 kg/cm² aplicada durante 24 horas no produce deformación
- Apreciable a temperatura ambiente
- Posee una gran capacidad de recuperación elástica
- Es un material fácil de reciclar
- Posee una alta resistencia al impacto

Propiedades químicas

- Posee una gran resistencia a agentes químicos
- Presenta poca absorción del agua, por lo tanto, no presenta mucha humedad
- Tiene gran resistencia a soluciones de detergentes
- Buena resistencia química
- Resistencia débil a los rayos ultra violeta
- Punto de ebullición de 160°C
- Punto de fusión más de 160°C

2.5.2.3 Elastómeros

Los elastómeros también denominados cauchos o hules tienen un comportamiento térmico que puede variar de termoplástico a termorrígido según su estructura sea lineal o reticulada. La clasificación se realiza en base a su comportamiento mecánico: se trata de materiales poliméricos que tienen la capacidad de deformarse mucho más que el 300% en forma elástica, esto es, cuando se remueve la fuerza aplicada para estirarlos recuperan sus dimensiones originales. Esto se debe a que las largas cadenas poliméricas se encuentran enrolladas e idealmente podemos decir que cuando se aplica un esfuerzo para estirar la muestra las cadenas lineales se desenredan. Cuando se libera el esfuerzo las cadenas vuelven a enrollarse y el polímero regresa a su forma y tamaño originales. Sin embargo, esta es solo una idealización del comportamiento de las macromoléculas ya que las

cadenas no solo se desenrollan, sino que también deslizan unas sobre otras de modo que al eliminar el esfuerzo aplicado desaparece la deformación elástica (instantánea y reversible) pero puede quedar una deformación remanente (deformación plástica, debida al deslizamiento).¹⁴

Características

- No se pueden derretir
- Son flexibles y elásticos
- Generalmente insoluble.

¹⁴ Hermida, É. Guía didáctica. *Capítulo 9 polímeros*. (2011)

CAPÍTULO III

**ANÁLISIS MECANÍSTICO Y BENEFICIOS
ECONÓMICOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
REFORZADAS CON FIBRAS DE
POLIOLEFINA**

CAPÍTULO III
ANÁLISIS MECANÍSTICO Y BENEFICIOS ECONÓMICOS DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS REFORZADAS CON FIBRAS DE POLIOLEFINA

3.1 ELECCIÓN DE MATERIALES

3.1.1 Materiales pétreos

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales pétreos para la realización de mezclas asfálticas; para la elección del banco de material disponible fue la chancadora Garzón por la disponibilidad de los agregados.

Ubicación geográfica

Las coordenadas geográficas de la entrada de la chancadora Garzón son:

Latitud: 21°28'14.70" S.

Longitud: 64°45'2.37" O.

Figura 12. Ubicación de la planta trituradora de agregados Garzón



Fuente: Google earth

3.1.2 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico a usar fue provisionado de la planta asfáltica de la Posta de la Alcaldía. El cemento asfáltico es de procedencia H.AM La Pintada - Oleoderivados C.I.S.A.S. – Colombia.

Ubicación geográfica

Las coordenadas geográficas de la planta asfáltica de la Posta son:

Latitud: 21°31'34.46" S.

Longitud: 64°44'28.98" O.

Figura 13. Ubicación de la planta de asfaltos de la Posta



Fuente: Google earth

Especificaciones técnicas del cemento asfáltico 85-100 brindadas por el fabricante Oleoderivados C.I.S.A.S.



CERTIFICADO DE CALIDAD

Tabla 7. Producto Asfalto 85-100

Análisis	Método		Especificaciones	Resultados
	AASHTO	ASTM		
Penetración 25°C	T-49	D-5	85-100	90.4
Vaso abierto cleveland, punto de inflamación °c	T-48	D-92	> a 232°C	276
Viscosidad 60°C	T-316	D-4402	Informar	1560
Soldabilidad en tricloroetileno %	T-44	D-2042	> a 99.00 %	99.98
Ductilidad 25°C	T-55	D-113	> a 100 cm	> 100
Ensayo de la mancha heptano-xilol, (25% máximo xilol)	T-102	-	(-) negativo	(-) negativo
Ensayo en horno película delgada				
1. Penetración del residuo, % de la penetración original	T-49	D-5	Min. 50	50.4
2. Pérdida por calentamiento	T-240	D-2872	Max. 1	0.445
3. Viscosidad 60°C	T-316	D-4402	Informar	5800
4. Ductilidad del residuo, 25°C, 5 cm/min	T-51	D-113	Min. 100	> 100
Penetración del residuo de pérdida, x calentamiento % original	T-49	DVI-5	> a 50	55
% De h2o	T-55	-	Max. 0.2	0

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Fibras de poliolefina

Tabla 8. Especificaciones técnicas de las fibras de poliolefina brindadas por el fabricante Roka Ltda.

Características	Especificación
	ASTM
Área sección transversal	0.1 mm ²
Espesor de la fibra	0.21 mm
Gravedad específica	0.92
Punto de fusión	> 400 °C
Resistencia a la Tensión	>500 Mpa
Módulo de Tensión	5 Gpa
Absorción del agua	0%

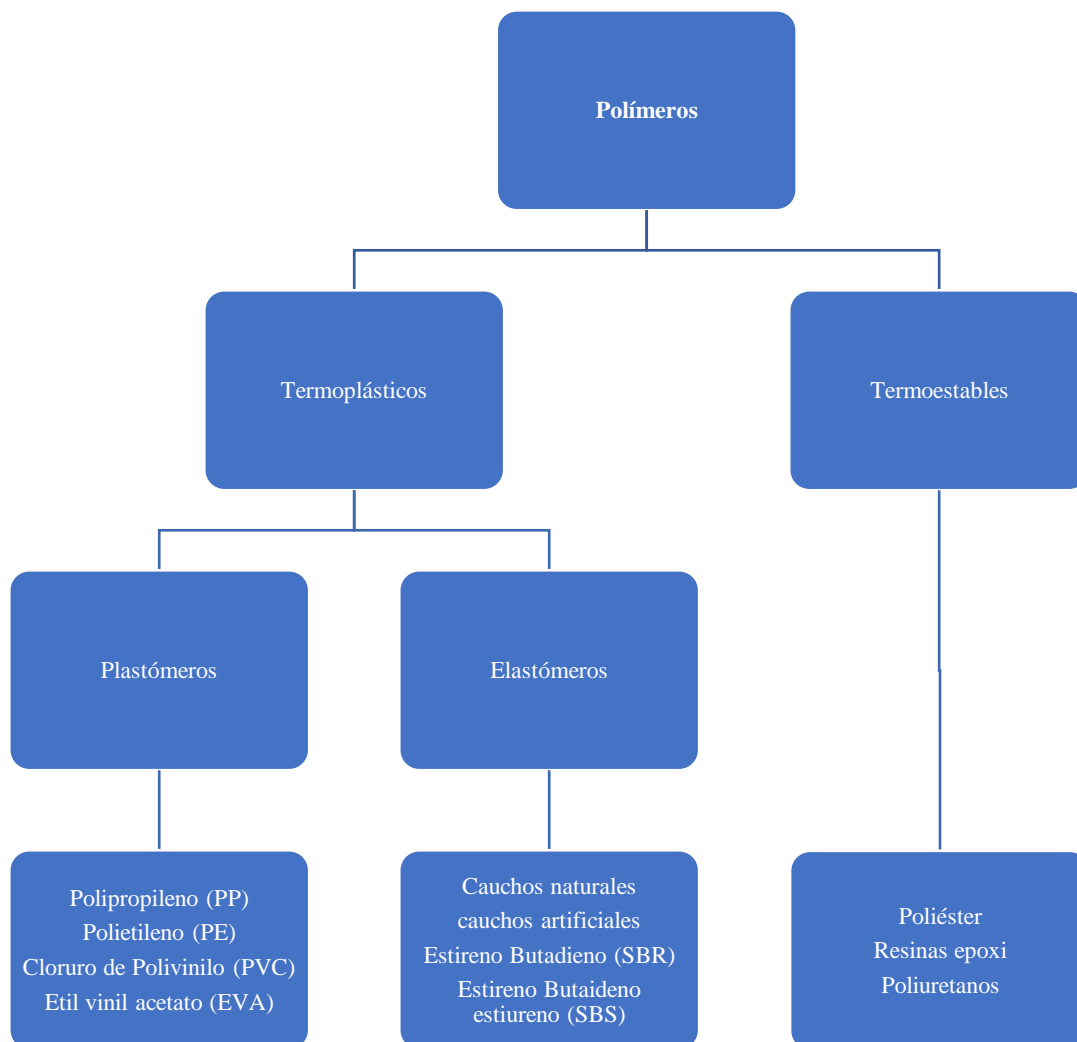
Fuente: Elaboración propia

El material modificador de la mezcla asfáltica modificada serán las fibras de poliolefina por las ventajas que pueden ofrecer según investigaciones ya realizadas en otros países por distintas universidades, así como también por empresas (Forta-Fi) donde denotan ventajas como:

- Mayor Resistencia contra la Propagación de fisuras
- Mayor vida
- Mayor Fuerza (150%)
- Mayor Resistencia a la ruptura
- Mayor Energía de Fractura antes de una falla
- Mayor Resiliencia
- Reducción de las fisuras de origen térmico

3.1.4 Clasificación del tipo de modificador que se usará en la presente investigación

Gráfico 1. Clasificación de los polímeros



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Tipos y propiedades de fibras poliméricas

Propiedades de fibras sintéticas							
Tipo de fibras	Diámetro equivalente (um)	Densidad relativa	Resistencia a tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento último (%)	Temperatura de ignición (°C)	Absorción del agua según ASTM D570 (%)
Acrílico	13-104	1.16-1.18	270-1000	14-19	7.5-50.0	220-235	1.0-2.5
Aramida I	12	1.44	2900	60	4.4	480	4.3
Aramida II+	10	1.44	2350	115	2.5	480	1.2
Carbón PAN HM	8	1.6-1.7	2500-3000	380	0.5-0.7	400	-
Carbón PAN HT	9	1.6-1.7	3450-4000	230	1.0-1.5	400	-
Carbón brea GP	10-13	1.6-1.7	480-790	27-35	2.0-2.4	400	3-7
Carbón brea HP	9-18	1.8-2.15	1500-3100	150-480	0.5-1.1	500	-
Nylon	23	1.14	970	5	20	200-220	2.8-5.0
Poliéster	20	1.34-1.39	230-1100	17	12-150	260	0.4
Polietileno	25-1000	0.90-0.91	75-590	3.5-4.8	3-80	130	-
Polipropileno	-	0.92-0.93	140-700	5	15	165	-

Fuente: Problemas, causas y soluciones. Concreto reforzado con fibras

La clasificación de las fibras de poliolefina respecto al grupo de polímeros que pertenece, la densidad relativa, resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y absorción del agua

Densidad relativa de las fibras de poliolefina empleadas en la investigación= 0.92.

Resistencia a la tensión de las fibras de poliolefina empleadas en la investigación= >500 (MPa).

Módulo de elasticidad de las fibras de poliolefina empleadas en la investigación= 5 (GPa).

Absorción del agua de las fibras de poliolefina empleadas en la investigación= (0) %.

Respecto a las propiedades de las fibras de poliolefina empleadas en la investigación y su clasificación dentro del grupo de polímeros podemos observar que pertenecen al grupo de los plásticos clasificados como un polipropileno (PP).

Las fibras de poliolefina actúan como microenlaces entre las partículas del agregado de la mezcla asfáltica para mejorar significativamente los problemas de estabilidad que se producen en los pavimentos.

Figura 14. Fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

3.2.1 Granulometría (ASTM E-40)

Granulometría de un árido. Distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido, determinada de acuerdo con el A0506.

Procedimiento

Seleccione un juego de tamices de acuerdo con la especificación correspondiente al material por ensayar. Dispóngalos según aberturas decrecientes, montados sobre el depósito receptor y provisto de su tapa. Todos estos elementos deben estar limpios y secos.

Figura 15. Muestra del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Muestra del agregado intermedio



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Muestra del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Juego de tamices para la granulometría



Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Tamizado de los agregados



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Muestra 1, granulometría del agregado grueso para el tamiz de 3/4"

Peso retenido acumulado:

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

$$\text{Retenido acumulado} = 89.40 \text{ g}_{(3/4'')} + 0.00 \text{ g}_{(1'')}$$

$$\text{Retenido acumulado} = 89.40 \text{ g}$$

Porcentaje retenido:

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

$$\% \text{Retenido} = \frac{89.40 \text{ g}}{3000 \text{ g}} * 100$$

$$\% \text{Retenido} = 2.98 \%$$

Porcentaje que pasa del total:

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

$$\% \text{Que pasa del total} = 100\% - 2.98\%$$

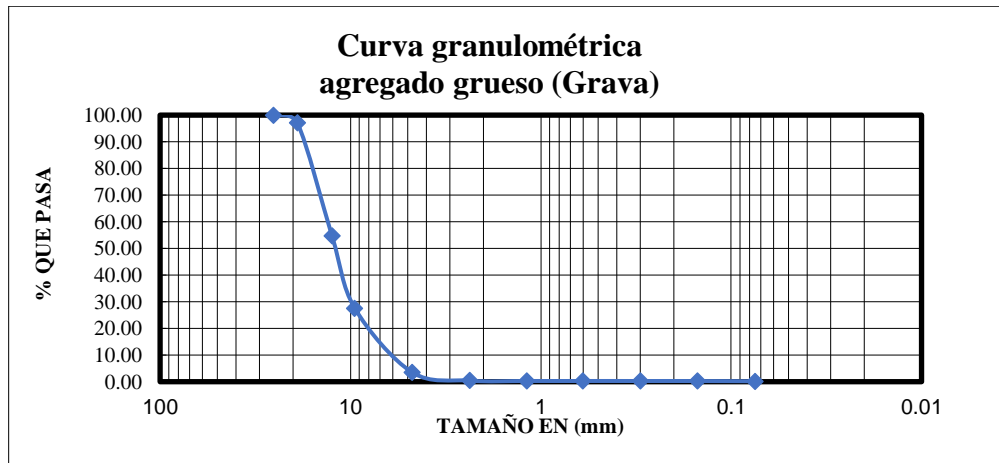
$$\% \text{Que pasa del total} = 97.02\%$$

Tabla 10. Tabla de resultados de la granulometría del agregado grueso (Grava)

Peso total (gr.)			3000		
Tamices	Tamaño	Peso ret.	Retenido acumulado		% Que pasa del total
	(mm)	(gr.)	(gr.)	(%)	
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	89.40	89.40	2.98	97.02
1/2"	12.5	1271.30	1360.70	45.36	54.64
3/8"	9.50	811.50	2172.20	72.41	27.59
Nº4	4.75	721.80	2894.00	96.47	3.53
Nº8	2.36	94.30	2988.30	99.61	0.39
Nº16	1.18	3.60	2991.90	99.73	0.27
Nº30	0.60	0.10	2992.00	99.73	0.27
Nº50	0.30	0.20	2992.20	99.74	0.26
Nº100	0.15	0.30	2992.50	99.75	0.25
Nº200	0.075	2.40	2994.90	99.83	0.17
Base	-	5.10	3000.00		0.00
	Suma	3000.00			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2. Curva granulométrica del agregado grueso (Grava)



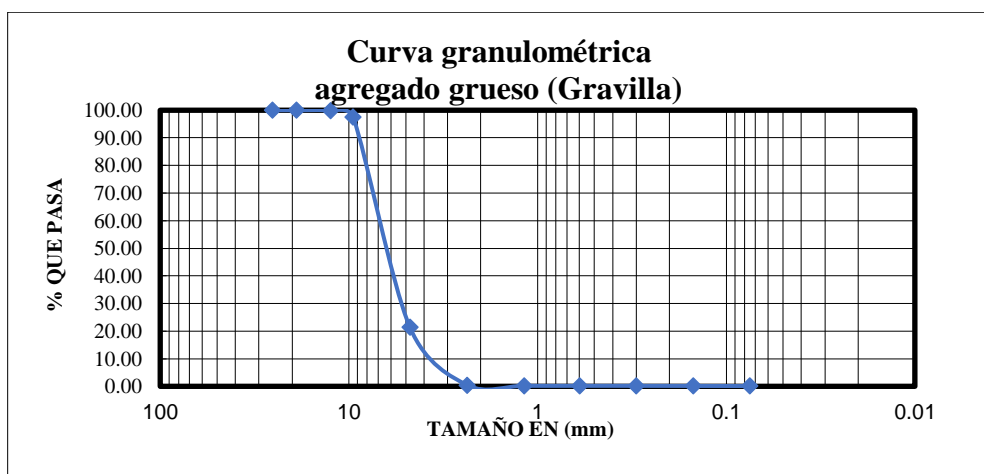
Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Resultados de la granulometría del agregado intermedio (Gravilla)

Peso total (gr.)			3000		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr.)	Retenido acumulado (gr.)	(%)	% 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	4.30	4.30	0.14	99.86
3/8"	9.50	68.90	73.20	2.44	97.56
Nº4	4.75	2285.10	2358.30	78.61	21.39
Nº8	2.36	628.30	2986.60	99.55	0.45
Nº16	1.18	7.90	2994.50	99.82	0.18
Nº30	0.60	0.20	2994.70	99.82	0.18
Nº50	0.30	0.40	2995.10	99.84	0.16
Nº100	0.15	0.80	2995.90	99.86	0.14
Nº200	0.08	1.10	2997.00	99.90	0.10
Base	-	2.70	2999.70		0.00
	Suma	2999.70			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. Curva granulométrica del agregado intermedio (Gravilla)



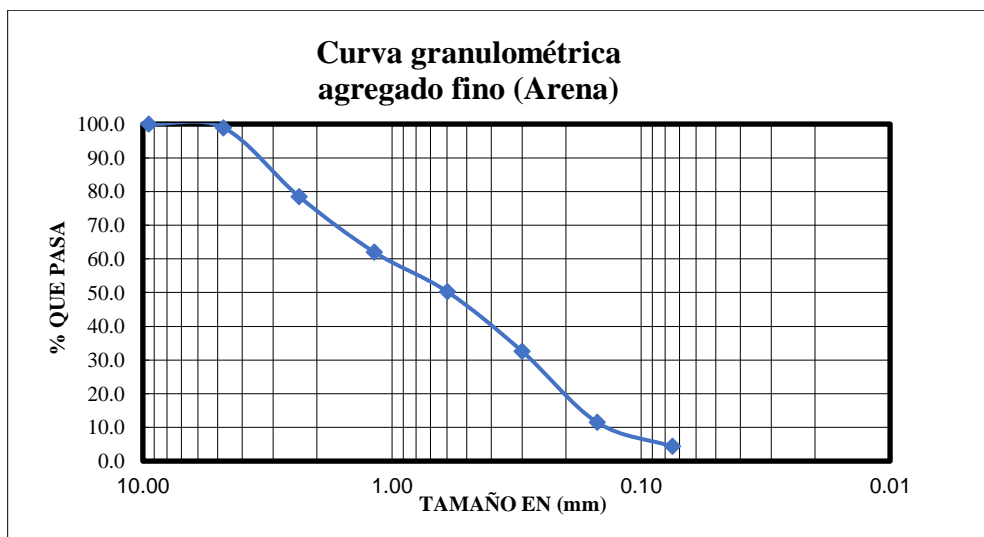
Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Resultados de la granulometría del agregado fino (Arena)

Peso total (gr.)			3000		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr.)	Retenido acumulado (gr.)	(%)	% Que pasa del total
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.0
Nº4	4.75	32.60	32.60	1.09	98.91
Nº8	2.36	612.50	645.10	21.50	78.50
Nº16	1.18	493.40	1138.50	37.95	62.05
Nº30	0.60	352.90	1491.40	49.71	50.29
Nº50	0.30	531.80	2023.20	67.44	32.56
Nº100	0.15	631.70	2654.90	88.50	11.56
Nº200	0.08	214.50	2869.40	95.65	4.35
Base		130.00	2999.40	100.00	0.00
	Suma	2999.40			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4. 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)

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 2 y 3 gr/cm³, 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 gr/cm³.

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, secar 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 tomar 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 gr. Registrar 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 0.1gr, registrar su valor como “A”

Figura 20. Agregado pétreo en reposo por 24 horas



Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Secado superficial del agregado pétreo saturado



Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Muestra sumergida



Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Muestras secas al horno por 24 horas



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

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

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

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

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

$$\% \text{ de absorcion} = \frac{B - A}{A}$$

Donde:

P.E.= Peso específico "(gr/" cm³ ")"

A= Masa del agregado seco (gr).

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

C= Masa de agregado sumergido (gr)

(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:

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

$$\text{P. E. a granel} = \frac{2957.70}{3000 - 1853}$$

$$\text{P. E. a granel} = 2.58 \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

Peso específico del agregado pétreo saturado superficialmente:

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

$$\text{P. E. saturado sup. seco} = \frac{3000}{3000 - 1853}$$

$$P. E. \text{ saturado sup. seco} = 2.62 \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$$

Peso específico aparente:

$$P. E. \text{ aparente} = \frac{2957.70}{2957.70 - 1853}$$

$$P. E. \text{ aparente} = 2.68 \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$$

Porcentaje de absorción:

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

$$\% \text{ de absorción} = \frac{3000 - 2957.70}{2957.70}$$

$$\% \text{ de absorción} = 1.43 \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$$

Tabla 13. Datos de las muestras de agregado grueso (Grava)

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	2957.70	3000.00	1853.00
2	2954.50	3000.00	1857.00
3	2954.20	3000.00	1853.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Resultados de peso específico agregado grueso (Grava)

Peso específico a granel (gr/cm³)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm³)	Peso específico aparente (gr/cm³)	% De absorción
2.58	2.62	2.68	1.43
2.58	2.62	2.69	1.54
2.58	2.62	2.68	1.55
2.58	2.62	2.68	1.51

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Datos de las muestras de agregado intermedio (Gravilla)

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	2931.00	3000.00	1854.00
2	2930.30	3000.00	1853.00
3	2932.20	3000.00	1856.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Resultados de peso específico agregado intermedio (Gravilla)

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% De absorción
2.56	2.62	2.72	2.35
2.55	2.62	2.72	2.38
2.56	2.62	2.72	2.31
2.56	2.62	2.72	2.35

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2 Peso específico a granel, saturado con superficie seca, peso específico aparente y la absorción de agua en agregados finos (ASTM E-128)

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 y 3 gr/cm³ 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 gr, saturar por 24 horas.

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

Tomar 500gr 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 al horno entre 100-110°C, por 24 horas dejar enfriar a temperatura ambiente y pesar.

Figura 24. Secado superficial del agregado fino (Arena)



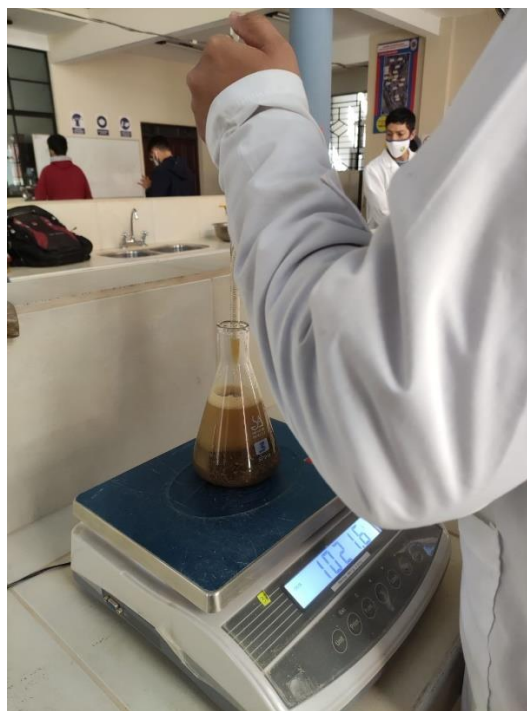
Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Calibración del matraz



Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Peso del agregado fino más el matraz y agua



Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Peso del agregado fino secado en el horno por 24 horas



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:

$$\text{P. E. a granel} = \frac{A}{V - W}$$

$$\text{P. E. a granel} = \frac{493.70}{500 - 310.60}$$

$$\text{P. E. a granel} = 2.61 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$

Peso específico del agregado fino saturado superficialmente:

$$\text{P. E. saturado sup. seco} = \frac{500}{V - W}$$

$$\text{P. E. saturado sup. seco} = \frac{500}{500 - 310.60}$$

P. E. saturado sup. seco = 2.64 (gr/cm³)

Peso específico aparente:

$$P. E. \text{ aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

$$P. E. \text{ aparente} = \frac{493.70}{(500 - 310.60) - (500 - 493.70)}$$

P. E. aparente = 2.70 (gr/cm³)

Porcentaje de absorción:

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

$$\% \text{ De absorción} = \frac{500 - 493.70}{500} * 100$$

% De absorción = 1.26 (gr/cm³)

Donde:

P.E.= Peso específico "(gr/" cm³ ")"

A= Masa del agregado fino seco (gr).

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

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

Tabla 17. Datos de las muestras de agregado fino (Arena)

Muestra N°	Peso muestra (gr)	Peso de matraz (gr)	Muestra + matraz + agua (gr)	Peso del agua agregado al matraz "W" (ml) ó (gr)	Peso muestra secada "A" (gr)	Volumen del matraz "V" (ml)
1	500	171.7	982.3	310.60	493.70	500.00
2	500	172.5	986.5	314.00	492.80	500.00
3	500	177.2	979.6	302.40	493.30	500.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Resultados de peso específico agregado fino (Arena)

	P. E. A granel (Gr/cm ³)	P. E. Saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	P. E. Aparente (gr/cm ³)	% De absorción
	2.61	2.64	2.70	1.26
	2.65	2.69	2.76	1.44
	2.50	2.53	2.58	1.34
Promedio	2.58	2.62	2.68	1.35

Fuente: Elaboración propia

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

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los agregados mayores a 2.36 mm, de densidad neta entre 2 y 3 gr/cm³, mediante la máquina de los ángeles.

Procedimiento

Pesar los tamaños de las fracciones correspondientes al grado elegido, registrar la masa total de material por ensayar como masa inicial de muestra (mi), aproximado a 0.1gr. 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.

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 (mf).

Tabla 19. Pesos de agregado grueso y número de esferas para el ensayo del desgaste de los ángeles

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

Fuente: Tabla ASTM C-131

Figura 28. Muestra de agregado grueso (Grava) lavado y tamizado



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Muestra de agregado intermedio (Gravilla) lavado y tamizado



Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Muestra preparada del agregado grueso e intermedio para realizar el ensayo en la máquina de los ángeles a 500 revoluciones



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Muestras del agregado grueso e intermedio ensayado en la máquina de desgaste de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Tamizado y lavado de las muestras de agregado



Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Peso final de los agregados ensayados en la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Muestra 1, agregado grueso gradación B

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

$$P = \frac{(5000.70 \text{ gr} - 3927.60 \text{ gr})}{5000.70 \text{ gr}} * 100$$

$$P = 21.46 \%$$

Donde:

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

m_i = Masa inicial de la muestra (gr).

m_f = Masa final de la muestra (gr).

Tabla 20. Datos para el desgaste de los ángeles agregado grueso (Grava)

Datos de laboratorio		
Gradación "B"		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
1"	3/4"	2500
3/4"	1/2"	2500

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Resultados del desgaste de los ángeles agregado grueso (Grava)

Gradación	Peso inicial	Peso final	% De desgaste	Especificación ASTM
B	5000.70	3927.60	21.46	35% MÁX

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Datos para el desgaste de los ángeles agregado intermedio (Gravilla)

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

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Resultados del desgaste de los ángeles agregado intermedio (Gravilla)

Gradación	Peso inicial	Peso final	% De desgaste	Especificación ASTM
C	5000.10	3884.80	22.31	35% Máx.

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 gr 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

Figura 34. Probetas con agregado fino (Arena)



Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Sedimentación del agregado fino (Arena)



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Muestra 1, equivalente de arena

$$\text{Eq. arena} = \frac{H_1}{H_2} * 100$$

$$\text{Eq. arena} = \frac{H_1}{H_2} * 100$$

$$\text{Eq. arena} = \frac{H_1}{H_2} * 100$$

Donde:

Eq= Equivalente de arena (%)

H1= Nivel de arena (cm)

H2= Nivel total arena (cm)

Tabla 24. Datos y resultados para el ensayo de equivalente de arena

N ° de muestra	H1	H2	Equivalente de arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	10.40	11.10	93.69
2	10.60	11.30	93.81
3	10.50	11.30	92.92
		Promedio	93.47

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Resultados de caracterización de los agregados y comparación con la normativa ASTM

Ensayos	Especificación		Resultado	Verificación	Norma
	Mínimo	Máximo			
Peso específico de agregado grueso 3/4" (gr/cm ³)	2	3	2.58	Cumple	ASTM E-127
Peso específico de agregado intermedio 3/8" (gr/cm ³)	2	3	2.56	Cumple	ASTM E-127
Peso específico de agregado fino (gr/cm ³)	2	3	2.58	Cumple	ASTM E-128
Absorción de agregado grueso 3/4" (%)	---		1.51	---	ASTM E-127
Absorción de agregado intermedio 3/8" (%)	---		2.35	---	ASTM E-127
Absorción de agregado fino (%)	---		1.35	---	ASTM E-128
Desgaste de los ángeles agregado grueso 3/4" (%)	-	35	21.46	Cumple	ASTM E-131
Desgaste de los ángeles agregado intermedio 3/8" (%)	-	35	22.31	Cumple	ASTM E-131
Equivalente de arena (%)	50	-	93.47	Cumple	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 esté 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 décimas de milímetros, que haya penetrado la muestra.

Figura 36. Ensayo de penetración del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Promedio de la muestra 1:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Lec1} + \text{Lec2} + \text{Lec3}}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{95 + 91 + 93}{3}$$

$$\text{Promedio} = 93 \text{ (x}10^{-1}\text{mm)}$$

Promedio de las tres muestras:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{prom. 1} + \text{prom. 2} + \text{prom. 3}}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{93 + 90 + 91}{3}$$

$$\text{Promedio} = 91.1 \text{ (x}10^{-1}\text{mm)}$$

Tabla 26. Datos y resultados del ensayo de penetración

Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) ASTM D-5	Lectura N°1	mm.	95	90	93	Promedio
	Lectura N°2	mm.	91	91	89	
	Lectura N°3	mm.	93	88	90	
	Promedio	mm.	93	90	91	91.1

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Ensayo de peso específico (ASTM D-71-94)

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 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 gr, 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.

Figura 37. Ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Muestra1, peso específico del cemento asfáltico:

$$\text{P. E. de cemento asfáltico} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)} * 0.997077$$

$$\text{P. E. de cemento asfáltico} = \frac{(58.60 - 32.80)}{(78.60 - 32.80) - (78.20 - 58.60)} * 0.997077$$

$$\text{P. E. de cemento asfáltico} = 0.98 \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{P. E. promedio} = \frac{\text{P. E. Muestra1} + \text{P. E. Muestra2} + \text{P. E. Muestra3}}{3}$$

$$\text{P. E. promedio} = \frac{0.98 + 1.06 + 0.97}{3}$$

$$\text{P. E. promedio} = 1.0041 \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

Donde:

A= Peso del matraz vacío (gr)

B= Peso del matraz más agua (gr)

C= Peso del matraz más cemento asfáltico (gr)

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

P.E.= Peso específico del cemento asfáltico (gr/cm³)

Tabla 27. Datos y resultados de ensayo peso específico

Peso Picnómetro	gr.	32.80	33.60	33.10	Promedio
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr.	78.60	79.30	81.30	
Peso Picnómetro + Muestra	gr.	58.60	56.80	57.60	
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr.	78.20	80.60	80.70	
Peso Específico	gr./cm ³	0.98	1.06	0.97	1.0041

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 cm/min $\pm 5\%$.

Procedimiento

El material se calienta cuidadosamente hasta que esté lo suficientemente fluido 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 los separar a la velocidad uniforme especificada hasta la ruptura de la briqueta, leer 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.

Figura 38. Acondicionamiento de las muestras a temperatura ambiente a 25°C, para realizar la ductilidad



Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Proceso de elongación de las muestras ensayadas



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Promedio de las muestras:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Ensayo1} + \text{Ensayo2} + \text{Ensayo3}}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{91 + 112 + 132}{3}$$

$$\text{Promedio} = 111.70 \text{ (cm)}$$

Tabla 28. Resultados del ensayo de ductilidad

Ductilidad a 25°C ASTM D-113	cm.	91	112	132	111.70
------------------------------	-----	----	-----	-----	---------------

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Ensayo de punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01)

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 esté por debajo del punto de llama esperado, disminuir el calor y empezará a pasar un fósforo 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.

Figura 40. Ensayo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Promedio de muestras:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Ensayo1} + \text{Ensayo2} + \text{Ensayo3}}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{261 + 255 + 252}{3}$$

$$\text{Promedio} = 256 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Tabla 29. Resultados del ensayo punto de inflamación

Punto de Inflamación ASTM D1310-01	°C	>261	>255	>252	>256
---------------------------------------	----	------	------	------	------

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.

Figura 41. Ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Promedio de muestras:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Ensayo1} + \text{Ensayo2} + \text{Ensayo3}}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{46 + 44 + 43}{3}$$

$$\text{Promedio} = 44.3 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Tabla 30. Resultados del ensayo de punto de ablandamiento

Punto de ablandamiento	°C	46.0	44.0	43.0	44.3
------------------------	----	------	------	------	------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Resultados de la caracterización del cemento asfáltico y comparación con la normativa ASTM

Ensayos	Especificación		Resultado	Verificación	Norma
	Mínimo	Máximo			
Penetración a 25 °C, 100 gr, 5 s. (1/10mm)	85	100	91.10	Cumple	ASTM D-5
Peso específico (gr/m ³)	1	1.05	1.0041	Cumple	ASTM D-71-94
Ductilidad (cm)	100	--	111.70	Cumple	ASTM D-113
Punto de inflamación (°C)	232	--	256	Cumple	ASTM D1310-01
Punto de ablandamiento (°C)	42	--	44.30	Cumple	ASTM D-36

Fuente: Elaboración propia

Realizada la caracterización del cemento asfáltico podemos concluir que el cemento asfáltico brindado por la Alcaldía de acuerdo a las especificaciones técnicas de la tabla 1.6 cumple las especificaciones de un asfalto 85-100 para el diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall

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

El equipo necesario para realizar las briquetas se describe a continuación:

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 semicilindros 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 el agregado y asfalto de 5000gr de capacidad y sensibilidad de un 001gr para pesar probetas de 1200 gr.

3.4.1 Granulometría de la mezcla

Tabla 32. Pesos de los agregados retenidos a diferentes porcentajes

Tamices	Tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena
		Peso ret. a 3000 gr	Peso ret. a 3000 gr	Peso ret. a 3000 gr	al 0.42	al 0.12	al 0.46
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.0	89.40	0.00	0.00	37.55	0.00	0.00
1/2"	12.5	1271.30	4.30	0.00	533.95	0.52	0.00
3/8"	9.50	811.50	68.90	0.00	340.83	8.27	0.00
N°4	4.75	721.80	2285.10	32.60	303.16	274.21	15.00
N°8	2.36	94.30	628.30	612.50	39.61	75.40	281.75
N°16	1.18	3.60	7.90	493.40	1.51	0.95	226.96
N°30	0.60	0.10	0.20	352.90	0.04	0.02	162.33
N°50	0.30	0.20	0.40	531.80	0.08	0.05	244.63
N°100	0.15	0.30	0.80	631.70	0.13	0.10	290.58
N°200	0.075	2.40	1.10	214.50	1.01	0.13	98.67
Base	-	5.10	2.70	130.00	2.14	0.32	59.80
Suma		3000.00	2999.70	2999.40	1260.00	359.96	1379.72

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño de las briquetas 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 42% de agregado grueso de 3/4", 12% de agregado intermedio de 3/8", y 46% de agregado fino.

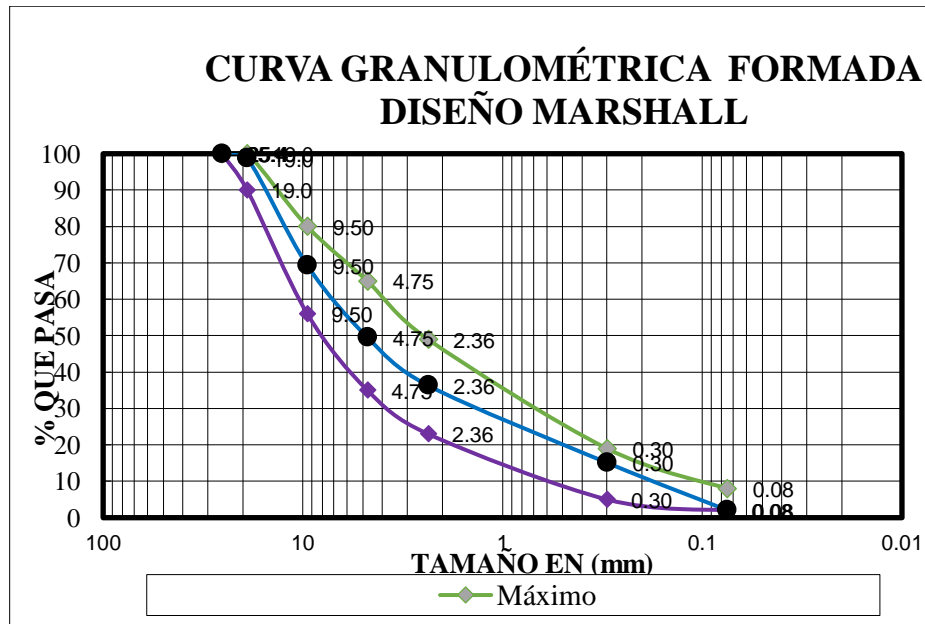
A continuación, se muestra la granulometría formada y sus rangos según especificaciones:

Tabla 33. Granulometría formada y especificaciones

Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret.	Ret. acum.	% Ret.	% que pasa del total	Especificaciones	
		1.00				Mínimo	Máximo
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.0	37.55	37.55	1.25	98.75	90	100
1/2"	12.5	534.46	572.01	19.07	80.93	-	-
3/8"	9.50	349.10	921.11	30.71	69.29	56	80
Nº4	4.75	592.36	1513.47	50.45	49.55	35	65
Nº8	2.36	396.75	1910.22	63.68	36.32	23	49
Nº16	1.18	229.42	2139.65	71.33	28.67	-	-
Nº30	0.60	162.40	2302.05	76.74	23.26	-	-
Nº50	0.30	244.76	2546.81	84.90	15.10	5	19
Nº100	0.15	290.80	2837.61	94.60	5.40	-	-
Nº200	0.075	99.81	2937.42	97.92	2.08	2	8
Base	-	62.27	2999.69	100.00	0.00	-	-
	Suma	2999.69					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5. Granulometría formada



Fuente: Elaboración propia

3.4.2 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.

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

Cálculo de F y de %A:

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

$$F = (0.42 * 1.51) + (0.12 * 2.35) + (0.46 * 1.35)$$

$$F = 1.5372$$

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

$$\%A = 0.020 * 63.68 + 0.035 * 48.37 + 0.20 * 2.08 + 1.5372$$

$$\%A = 4.98 \% \approx 5.00 \%$$

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%

3.4.3 Preparación de las probetas

Para la dosificación se utilizó la granulometría ya calculada anteriormente en el subtítulo 3.4.1.

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 varió con el incremento de ± 0.5 % de un grupo a otro.

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

Tabla 34. Grupo de briquetas para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico por el método Marshall

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 35. Pesos de los agregados y cemento asfáltico

	Porcentaje de cemento asfáltico				
	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%	6.50%
Porcentaje del agregado (%)	95.50%	95.00%	94.50%	94.00%	93.50%
Peso del cemento asfáltico (gr)	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de grava (gr)	481.32	478.80	476.28	473.76	471.24
Peso de gravilla (gr)	137.52	136.80	136.08	135.36	134.64
Peso de arena (gr)	527.16	524.40	521.64	518.88	516.12
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 1.35 se muestra las cantidades de agregado y cemento asfáltico a utilizar para realizar las briquetas y obtener los diferentes puntos y de esta manera, mediante las gráficas de las curvas Marshall, encontrar un porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño de la mezcla asfáltica.

3.4.4 Desarrollo de las briquetas

Se pesa en fuentes los distintos tipos de los agregados calculados para una briqueta de 1200 gr; por otro lado, se calienta el cemento asfáltico a una temperatura superior a 100 °C, hasta que esté 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 140-160°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.

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

Figura 42. Preparación del peso de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Figura 43. Mezclado y vaciado de la mezcla asfáltica en los moldes



Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Compactado de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Figura 45. Briquetas elaboradas



Fuente: Elaboración propia

3.4.5 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”.

Figura 46. Ensayo para determinar la densidad de la mezcla



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Briqueta 1,2,3 al 4.5 %

Densidad real:

$$\text{Densidad} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Densidad} = \frac{1169.40}{1171.20 - 652}$$

$$\text{Densidad} = 2.25 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$

Donde:

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

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

C= Masa de la probeta sumergida (gr).

Densidad promedio

$$\text{Densidad promedio} = \frac{2.25 + 2.21 + 2.28}{3}$$

$$\text{Densidad promedio} = 2.25 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$

Tabla 36. Resultados de la densidad de la mezcla asfáltica convencional

N° de briqueta	% de Asfalto		altura promedio	Peso Briqueta			Volumen briqueta	Densidad Briqueta	
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio
	%	%		cm	grs.	grs.		grs.	cm ³
1	4.50	4.71	6.82	1169.40	1171.20	652.00	519.20	2.25	2.25
2			6.74	1175.80	1176.30	645.00	531.30	2.21	
3			6.53	1169.40	1170.30	658.00	512.30	2.28	
4	5.00	5.26	6.78	1179.60	1181.20	659.00	522.20	2.26	2.27
5			6.74	1181.00	1182.60	655.00	527.60	2.24	
6			6.59	1182.60	1187.10	675.00	512.10	2.31	
7	5.50	5.82	6.72	1182.60	1185.20	661.00	524.20	2.26	2.28
8			6.59	1176.20	1181.30	668.00	513.30	2.29	
9			6.68	1175.60	1178.90	663.00	515.90	2.28	
10	6.00	6.38	6.63	1158.60	1159.80	665.00	494.80	2.34	2.27
11			6.63	1174.30	1178.40	652.00	526.40	2.23	
12			6.57	1168.20	1178.40	659.00	519.40	2.25	
13	6.50	6.95	6.84	1173.40	1178.50	659.00	519.50	2.26	2.26
14			6.48	1181.20	1185.60	663.00	522.60	2.26	
15			6.56	1181.60	1182.30	662.00	520.30	2.27	

Fuente: Elaboración propia

3.4.6 Ensayos para determinar los porcentajes de vacíos de la mezcla

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

Cálculos

Briquetas 1,2,3 al 4.5 %

Densidad máxima teórica:

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

$$\text{Densidad max. teo.} = \frac{100}{\frac{4.50}{1.004} + \left(\frac{100 - 4.50}{2.58}\right)}$$

$$\text{Densidad max. teo.} = 2.40 \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right)$$

Porcentaje de vacíos:

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

$$\% \text{Vacíos} = \frac{2.40 - 2.25}{2.40} * 100$$

$$\% \text{Vacíos} = 6.30 (\%)$$

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

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

$$V.A.M. = 6.30 + \frac{2.25 * 4.50}{1.0041}$$

$$V.A.M. = 16.38 (\%)$$

Relación betumen vacíos (R.B.V.):

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

$$R.B.V. = \frac{16.38 - 6.30}{16.38} * 100$$

$$R.B.V. = 61.55 (\%)$$

Tabla 37. Resultados del porcentaje de vacíos y relación de betumen vacíos de la mezcla asfáltica convencional

N ° de briqueta	% de Asfalto		Densidad Briqueta			% de Vacíos		
	base Mezcla	base Agregados	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos)	R.B.V. (relación)
	%	%	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%
1	4.50	4.71	2.25	2.25	2.40	6.30	16.38	61.55
2			2.21					
3			2.28					
4	5.00	5.26	2.26	2.27	2.38	4.72	16.02	70.52
5			2.24					
6			2.31					
7	5.50	5.82	2.26	2.28	2.36	3.68	16.14	77.21
8			2.29					
9			2.28					
10	6.00	6.38	2.34	2.27	2.34	2.97	16.55	82.08
11			2.23					
12			2.25					
13	6.50	6.95	2.26	2.26	2.32	2.63	17.28	84.77
14			2.26					
15			2.27					

Fuente: Elaboración propia

3.4.7 Ensayos de estabilidad y fluencia

Una vez que se haya obtenido los valores para calcular la densidad se debe medir las alturas con un vernier en 4 puntos de la briqueta, 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 25-30 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 $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ se anota como el valor de “Estabilidad Marshall”.

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 (pulg).

Figura 47. Ensayo Marshall



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Briquetas 1,2,3 para un porcentaje de cemento asfáltico de 4.5 %:

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

$$\text{Carga} = (0.012 * 936 - 0.0812) * 102 * 2.20$$

$$\text{Carga} = 2502.24 \text{ (lb)}$$

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

$$\text{Carga corregida} = 2502.24 * 0.89$$

$$\text{Carga corregida} = 2233.25 \text{ (lb)}$$

Después se realiza un promedio de las 3 briquetas corregidas:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{briqueta}_1 + \text{briqueta}_2 + \text{briqueta}_3}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{2233.25 + 2381.58 + 2506.20}{3}$$

Promedio = 2373.68 (lb)

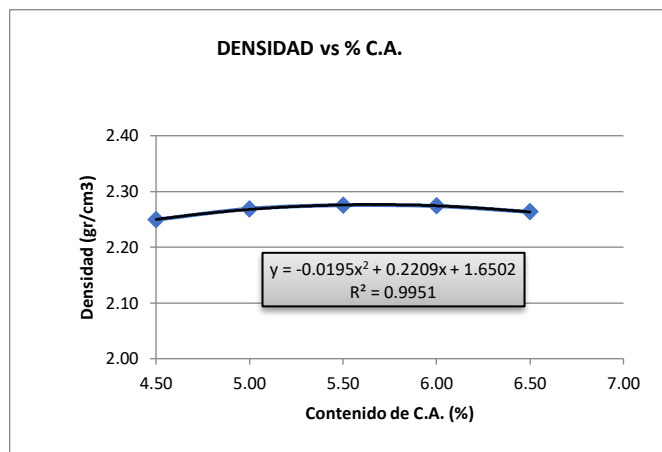
Tabla 38. Resultados de la estabilidad y la fluencia de la mezcla convencional

N ° de briqueta	% de Asfalto		altura promedio	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de corrección de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		cm	mm	libras	-	libras	libras	-
1	4.50	4.71	6.82	936	2502.24	0.89	2233.25	2373.68	12	10.33
2			6.74	976	2609.95	0.91	2381.58		10	
3			6.53	980	2620.72	0.96	2506.20		9	
4	5.00	5.26	6.78	986	2636.88	0.90	2379.78	2585.55	11	11.00
5			6.74	1068	2857.69	0.91	2607.64		12	
6			6.59	1095	2930.39	0.95	2769.22		10	
7	5.50	5.82	6.72	1084	2900.77	0.92	2661.46	2560.09	12	11.33
8			6.59	1014	2712.28	0.95	2563.10		12	
9			6.68	990	2647.65	0.93	2455.70		10	
10	6.00	6.38	6.63	994	2658.42	0.94	2492.54	2523.24	12	12.33
11			6.63	960	2566.87	0.94	2406.69		13	
12			6.57	1052	2814.6	0.95	2670.50		12	
13	6.50	6.95	6.84	986	2636.88	0.89	2341.81	2374.65	13	13.33
14			6.48	942	2518.4	0.97	2436.55		12	
15			6.56	923	2467.23	0.95	2345.60		15	

Fuente: Elaboración propia

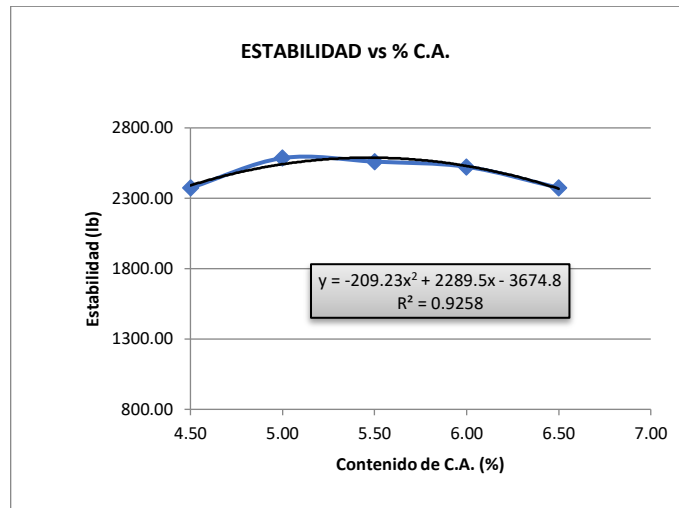
Gráficos de las curvas del diseño de la mezcla asfáltica método Marshall para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico

Gráfico 6. Contenido de cemento asfáltico vs densidad



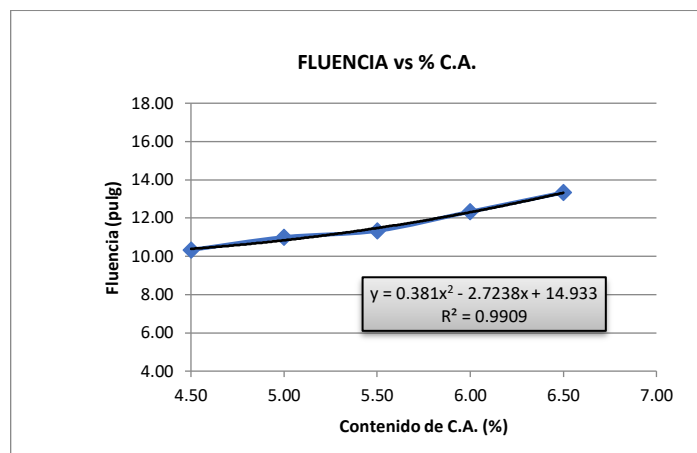
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 7. Contenido de cemento asfáltico vs estabilidad



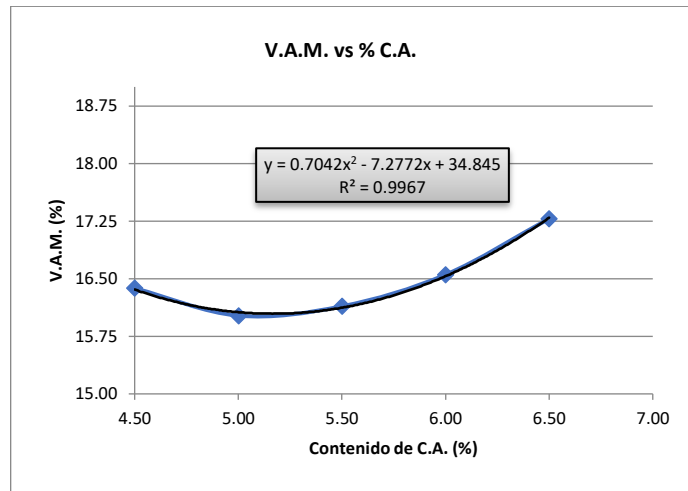
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 8. Contenido de cemento asfáltico vs fluencia



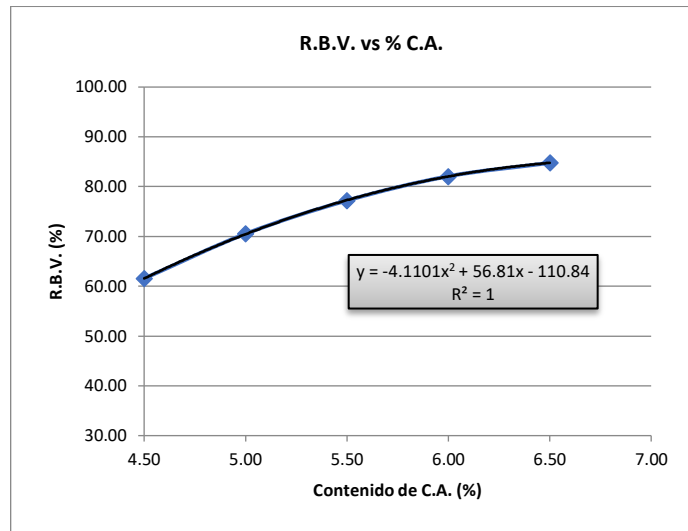
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 9. Contenido de cemento asfáltico vs V.M.A.



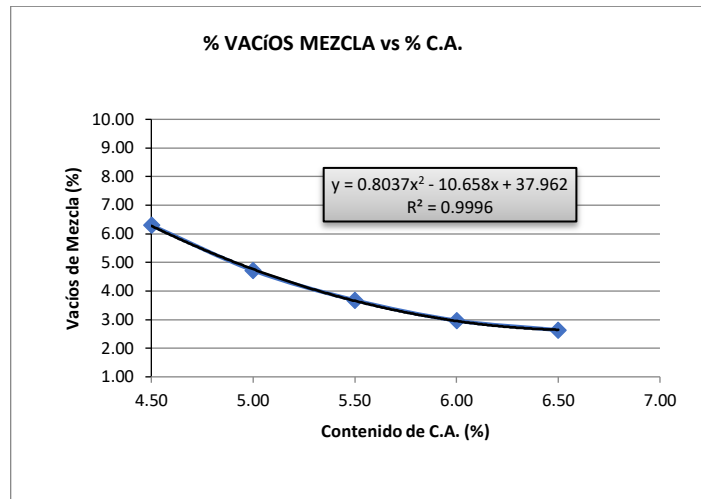
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 10. Contenido de cemento asfáltico vs R.B.V.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 11. Contenido de cemento asfáltico vs % vacíos mezcla



Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Resultados de los ensayos para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla asfáltica convencional

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2588.42	5.47
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.28	5.66
	Vacíos de la mezcla (%)	4.00	5.32
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.49

Fuente: Elaboración propia

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

$$C. O. de C. A. = \frac{C. O. \text{Esta.máx.} + C. O. \text{Den.máx.} + C. O. \% \text{Vacíos}}{3}$$

$$C. O. de C. A. = \frac{5.47 + 5.66 + 5.32}{3}$$

$$C. O. de C. A. = 5.49 (\%)$$

Donde:

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

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

C. O._{Est.máx.} = Contenido óptimo de cemento asfáltico para 4 % vacíos.

C. O._{%Vacíos} = Contenido óptimo de cemento asfáltico para estabilidad máxima.

3.5 ELABORACIÓN DE LAS BRIQUETAS CON MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON LAS FIBRAS DE POLIOLEFINA

3.5.1 Preparación de las probetas

Para la dosificación se utilizó la granulometría ya calculada anteriormente en el subtítulo 3.4.1.

Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico y contenido óptimo de fibras de poliolefina presentes en la mezcla asfáltica se prepara 6 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 y un porcentaje de fibras de poliolefina determinado en referencia con valores de 0.50 %, 1.00 %, 1.50 %, 2.00 %, 2.50 % y 3.00 %. Este contenido varió 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 y la proporción de fibras de poliolefina.

Tabla 40. Grupos de briquetas para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico y el contenido óptimo de fibras de poliolefina

Grupos de briquetas	Cemento asfáltico (%)	Fibras de poliolefina (%)	N ° de muestras
Grupo N°1	4.50	0.50	3
	5.00	0.50	3
	5.50	0.50	3
	6.00	0.50	3
	6.50	0.50	3
Grupo N°2	4.50	1.00	3
	5.00	1.00	3
	5.50	1.00	3
	6.00	1.00	3
	6.50	1.00	3
Grupo N°3	4.50	1.50	3
	5.00	1.50	3
	5.50	1.50	3
	6.00	1.50	3
	6.50	1.50	3
Grupo N°4	4.50	2.00	3
	5.00	2.00	3
	5.50	2.00	3
	6.00	2.00	3
	6.50	2.00	3
Grupo N°5	4.50	2.50	3
	5.00	2.50	3
	5.50	2.50	3
	6.00	2.50	3
	6.50	2.50	3
Grupo N°6	4.50	3.00	3
	5.00	3.00	3
	5.50	3.00	3
	6.00	3.00	3
	6.50	3.00	3
Total			90

Fuente: Elaboración propia

Primeramente, para la elaboración de las briquetas con la inclusión de las fibras de poliolefina se deberá tener previamente pesados los agregados pétreos con cada dosificación respectiva de cada grupo que se elaborará.

Luego, una vez que se tiene los pesos de los agregados para cada dosificación, se incorpora las fibras de poliolefina para proceder al mezclado de los agregados con las fibras de poliolefina lo más uniforme posible en la bandeja.

Una vez mezclado el agregado y las fibras de poliolefina colocamos la bandeja en la hornilla de la cocina industrial para incorporar el cemento asfáltico previamente calentado, para realizar el mezclado respectivo lo más uniformemente posible a una temperatura de 140-160°C y posteriormente someterlo a la compactación.

En la siguiente tabla se muestra las cantidades del agregado, cemento asfáltico y fibras de poliolefina que se utilizarán para realizar las briquetas de la mezcla asfáltica modificada, para el grupo N °1.

Tabla 41. Pesos de los agregados de la mezcla modificada

	Porcentaje de cemento asfáltico				
	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%	6.50%
Porcentaje del agregado (%)	95.00%	94.50%	94.00%	93.50%	93.00%
Porcentaje fibras (%)	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%
Peso del cemento asfáltico (gr)	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de grava (gr)	478.80	476.28	473.76	471.24	468.72
Peso de gravilla (gr)	136.80	136.08	135.36	134.64	133.92
Peso de arena (gr)	524.40	521.64	518.88	516.12	513.36
Peso de fibras (gr)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
Peso total de la briketa (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 48. Distribución de los pesos de las muestras de agregados, cementó asfáltico y fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

Figura 49. Mezclado de los agregados con las fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Mezclado de los agregados con el cemento asfáltico y las fibras de poliolefina para la elaboración de la mezcla asfáltica modificada



Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Mezcla asfáltica modificada con las fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

Figura 52. Compactación de las briquetas con la mezcla asfáltica modificada



Fuente: Elaboración propia

Figura 53. Briquetas elaboradas con 0.50 %, 1.00 %, 1.50 %, 2.00 %, 2.50 % y 3.00 % de fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Ensayos de densidad de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina

El procedimiento para realizar los cálculos y encontrar la densidad de la mezcla asfáltica modificada están descritos en el subtítulo 3.4.5 respectivamente, la diferencia es que en las siguientes tablas se trabaja con un determinado contenido de fibras de poliolefina y se varía el porcentaje de cemento asfáltico de acuerdo al subtítulo 3.4.2.

Tabla 42. Resultados de la densidad de la mezcla asfáltica modificada con 0.5 % de fibras de poliolefina

N ° de briqueta	fibras de poliolefina	% de Asfalto		altura promedio	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta	
		base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		briqueta	densidad real
		%	%		%	cm	grs.	grs.	grs.	cm3
1	0.50	4.50	4.71	6.61	1192.70	1196.80	670.00	526.80	2.26	2.26
2				6.65	1190.40	1195.10	668.00	527.10	2.26	
3				6.69	1182.00	1186.70	665.00	521.70	2.27	
4	0.50	5.00	5.26	6.57	1194.20	1199.30	674.00	525.30	2.27	2.27
5				6.68	1191.60	1196.80	668.00	528.80	2.25	
6				6.71	1194.80	1199.90	675.00	524.90	2.28	
7	0.50	5.50	5.82	6.66	1192.40	1196.60	669.00	527.60	2.26	2.29
8				6.64	1189.30	1193.80	677.00	516.80	2.30	
9				6.72	1193.30	1198.10	678.00	520.10	2.29	
10	0.50	6.00	6.38	6.59	1194.40	1198.10	671.00	527.10	2.27	2.28
11				6.67	1192.30	1196.70	678.00	518.70	2.30	
12				6.74	1189.20	1194.20	673.00	521.20	2.28	
13	0.50	6.50	6.95	6.57	1194.00	1196.30	672.00	524.30	2.28	2.26
14				6.58	1192.30	1195.90	671.00	524.90	2.27	
15				6.52	1193.60	1196.10	664.00	532.10	2.24	

Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Ensayos para determinar los porcentajes de vacíos de la mezcla asfáltica modificada con fibras de poliolefina

El procedimiento para realizar los cálculos y encontrar el 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, están descritos en el subtítulo 3.4.6.

Tabla 43. Resultados del porcentaje de vacíos y relación betumen vacíos de la mezcla asfáltica modificada con 0.5 % de fibras de poliolefina

N° de briqueta	fibras de poliolefina	% de Asfalto		Densidad Briqueta			% de Vacíos		
		base Mezcla	base Agregados	densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos)	R.B.V. (relación)
		%	%	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%
1	0.50	4.50	4.71	2.26	2.26	2.40	5.74	15.88	63.86
2				2.26					
3				2.27					
4	0.50	5.00	5.26	2.27	2.27	2.38	4.77	16.06	70.29
5				2.25					
6				2.28					
7	0.50	5.50	5.82	2.26	2.29	2.36	3.26	15.78	79.33
8				2.30					
9				2.29					
10	0.50	6.00	6.38	2.27	2.28	2.34	2.61	16.25	83.92
11				2.30					
12				2.28					
13	0.50	6.50	6.95	2.28	2.26	2.32	2.60	17.26	84.92
14				2.27					
15				2.24					

Fuente: elaboración propia

3.5.4 Ensayo de estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica modificada con fibras de poliolefina

El procedimiento para determinar la estabilidad y fluencia de la mezcla convencional y modificada con fibras de poliolefina; se debe seguir el procedimiento y cálculos descrito en el subtítulo 3.4.7.

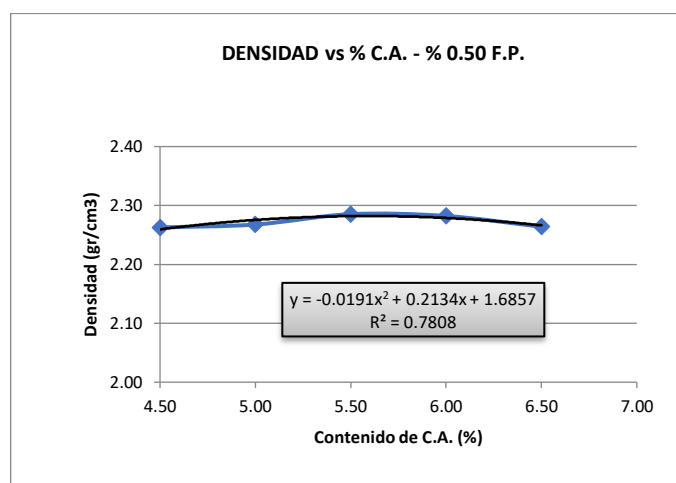
Tabla 44. Resultados de la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica modificada con 0.5 % de fibras de poliolefina

N° de briqueeta	fibras de poliolefina	% de Asfalto		altura promedio	Estabilidad Marshall					Fluencia		
		base Mezcla	base Agregados		altura promedio	lectura del dial	carga	factor de corrección de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	0.50	4.50	4.71	6.61	1082	2895.39	0.94	2725.43	2770.78	10	9.00	
2				6.65	1112	2976.17	0.93	2779.15		9		
3				6.69	1134	3035.41	0.93	2807.76		8		
4	0.50	5.00	5.26	6.57	1155	3091.96	0.95	2933.65	2799.23	11	9.33	
5				6.68	1124	3008.49	0.93	2790.37		9		
6				6.71	1086	2906.16	0.92	2673.67		8		
7	0.50	5.50	5.82	6.66	1068	2857.69	0.93	2663.08	2830.54	12	10.00	
8				6.64	1098	2938.47	0.94	2749.53		9		
9				6.72	1253	3355.86	0.92	3079.00		9		
10	0.50	6.00	6.38	6.59	1175	3145.82	0.95	2972.80	2613.11	10	10.33	
11				6.67	1053	2817.3	0.93	2620.09		12		
12				6.74	921	2461.85	0.91	2246.44		9		
13	0.50	6.50	6.95	6.57	1085	2903.47	0.95	2754.81	2601.19	12	11.00	
14				6.58	996	2663.81	0.95	2522.36		10		
15				6.52	986	2636.88	0.96	2526.39		11		

Fuente: Elaboración propia

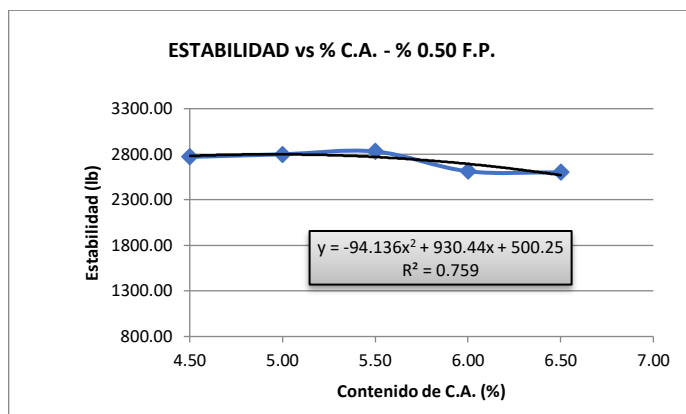
Gráficos de las curvas del diseño de la mezcla asfáltica modificada por el método Marshall para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico con un porcentaje de fibras de poliolefina

Gráfico 12. Contenido de cemento asfáltico vs densidad



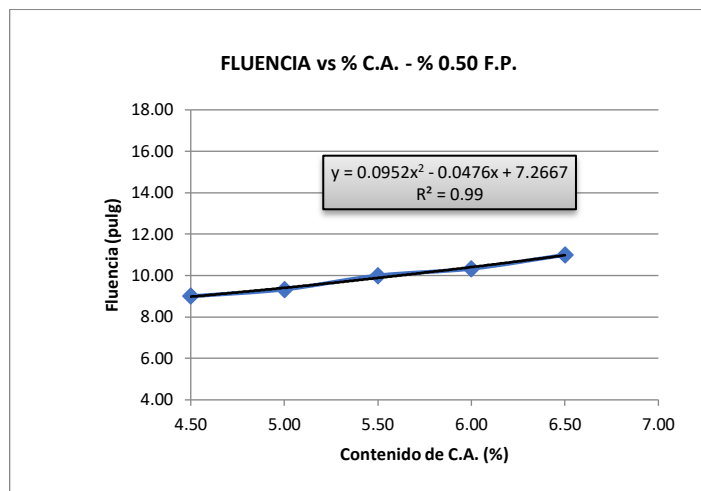
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 13. Contenido de cemento asfáltico vs estabilidad



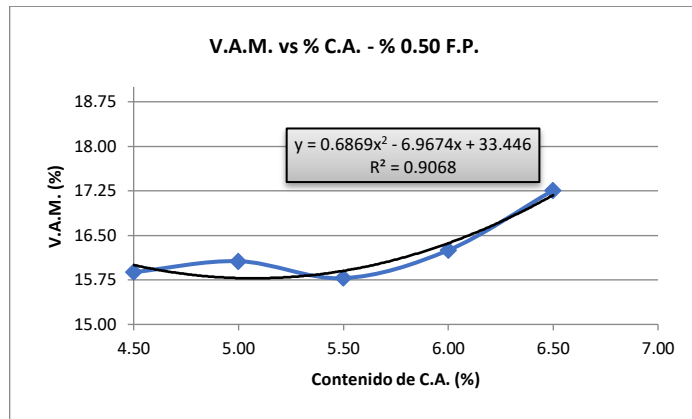
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 14. Contenido de cemento asfáltico vs fluencia



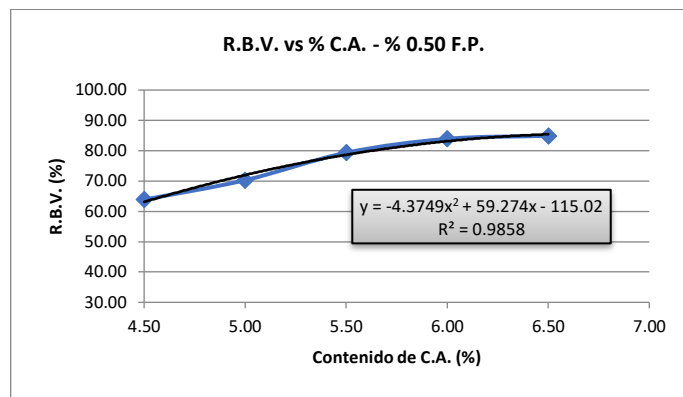
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 15. Contenido de cemento asfáltico vs V.M.A.



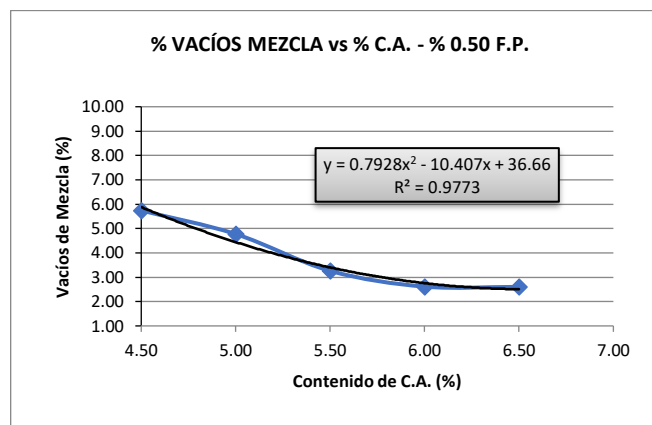
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 16. Contenido de cemento asfáltico vs R.B.V.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 17. Contenido de cemento asfáltico vs % vacíos mezcla



Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Resultados de los ensayos para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla modificada con fibras de poliolefina

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2799.37	4.94
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.28	5.59
	Vacíos de la mezcla (%)	4.00	5.19
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.24

Fuente: Elaboración propia

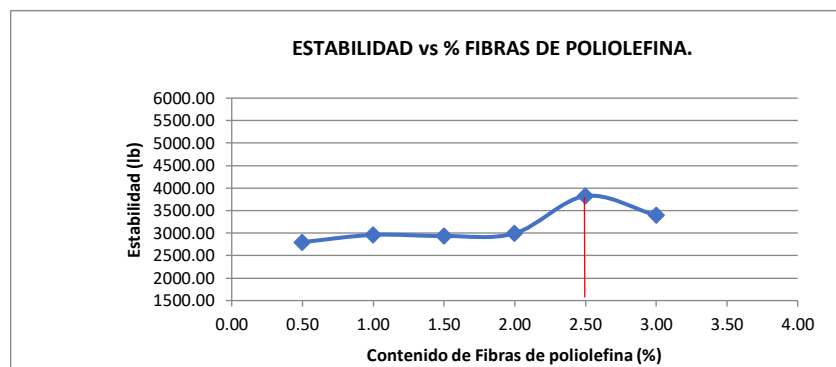
Para encontrar los demás porcentajes de cemento asfáltico en relación al porcentaje de fibras de poliolefina, se realiza el mismo procedimiento mencionado en el subtítulo 3.5.1. A continuación se muestra una tabla de resultados de cada porcentaje de cemento asfáltico en relación a un porcentaje de fibras de poliolefina.

Tabla 46. Porcentajes óptimos de cementos asfáltico en relación a la inclusión de las fibras de poliolefina

Optimo C.A. (%)	Optimo F.P. (%)	Estabilidad (lb)	Densidad (gr/cm ³)	Vacíos (%)	Fluencia (pulg)
5.24	0.50	2799.37	2.28	3.99	10
5.54	1.00	2960.16	2.28	3.99	11
5.38	1.50	2935.46	2.27	3.99	11
5.71	2.00	2994.75	2.27	3.99	12
5.74	2.50	3823.86	2.26	4.00	13
6.15	3.00	3393.99	2.23	3.99	15

Fuente: Elaboración propia

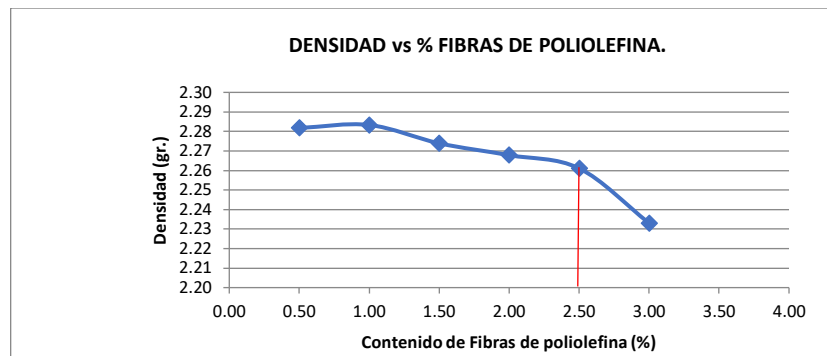
Gráfico 18. Estabilidad vs porcentajes óptimos de fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2.18 podemos observar que la estabilidad máxima presentada respecto a los demás valores de estabilidad fue con el porcentaje de fibras de poliolefina de 2.50 % respecto a los demás valores con los que se trabajaron para la modificación de la mezcla asfáltica.

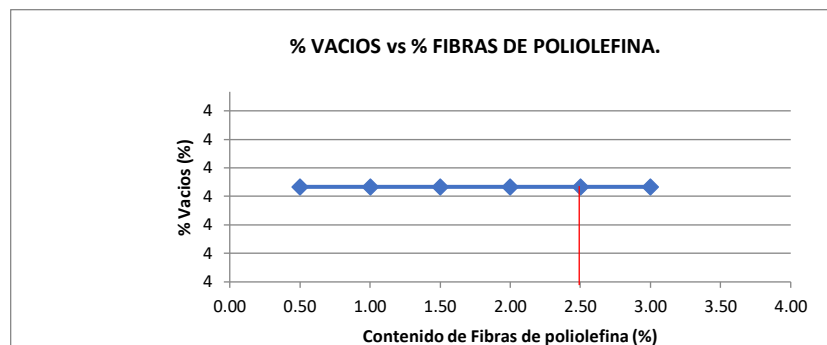
Gráfico 19. Densidad vs porcentajes óptimos de fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2.19 de las densidades, podemos observar que la densidad de la mezcla con el aumento de los porcentajes de fibras de poliolefina empieza a disminuir, esto sucede porque a mayores porcentajes de vacíos menores serán las densidades, como también podemos observar que para un porcentaje de fibras de poliolefina, de 2.50 % obtenemos una densidad de 2.26 gr/cm³, este valor es cercano al valor promedio entre el valor más alto y más bajo que se pudo obtener de la investigación realizada.

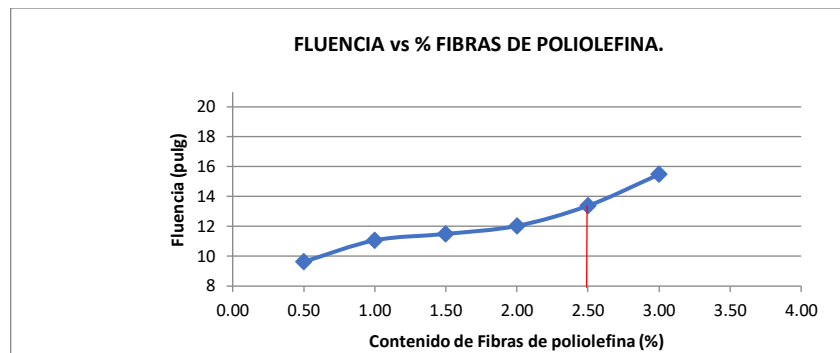
Gráfico 20. Vacíos vs porcentajes óptimos de fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2.20 de los vacíos podemos observar que los porcentajes de vacíos respecto a los distintos porcentajes de fibras de poliolefina se mantienen dentro del rango promedio de 3-5 % de vacíos, así como para un porcentaje de fibras de 2.5 % obtenemos un valor de 4.00 %.

Gráfico 21. Fluencia vs porcentajes óptimos de fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2.21 de la fluencia, podemos observar un comportamiento ascendente al aumentar los porcentajes de las fibras de poliolefina, para un valor de 2.50 % de fibras de poliolefina obtenemos un valor de fluencia de 13 pulg.

Realizando un análisis comparativo de cada gráfica analizada, podemos observar que para un porcentaje de 2.50 % de fibras de poliolefina y el porcentaje de 5.74 % de cemento asfáltico la mezcla modificada presenta mejoras en la estabilidad en relación a los demás porcentajes; por otro lado, respecto a los vacíos y el flujo de la mezcla asfáltica modificada cumple con las especificaciones de la normativa de la ABC. Por lo que podemos concluir que el porcentaje óptimo de fibras de poliolefina de la mezcla asfáltica modificada es de 2.50 %.

3.6 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA

Tabla 47. Dosificación para encontrar el contenido óptimo cemento asfáltico y el contenido óptimo fibras de poliolefina

Porcentaje de cemento asfáltico	5.79%
Porcentaje de fibras de poliolefina	2.50%
Porcentaje del agregado (%)	91.71%
Peso de las fibras de poliolefina (gr)	30.00
Peso del cemento asfáltico (gr)	69.48
Peso de grava (gr)	462.22
Peso de gravilla (gr)	132.06
Peso de arena (gr)	506.24
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00

Fuente: Elaboración propia

Una vez encontrado el porcentaje óptimo de fibras de poliolefina y el porcentaje óptimo cemento asfáltico se procedió a realizar 30 briquetas para el diseño de la mezcla asfáltica modificada, para luego someterla a los ensayos correspondientes de densidad, porcentaje de vacíos, estabilidad y flujo.

Figura 54. Briquetas elaboradas con el porcentaje óptimo de 2.50 % de fibras de poliolefina y el porcentaje óptimo de 5.74 % de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Valores obtenidos del diseño de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de las fibras de poliolefina en un porcentaje de 2.50%

Tabla 48. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica modificada

Resumen de resultados del diseño de la mezcla asfáltica reforzada con fibras de poliolefina								
N °	C.A. Óptimo (%)	F.P. Óptimo (%)	Densidad (gr/cm3)	% Vacíos de la mezcla total (%)	Vacíos del agregado mineral (%)	Relación betumen vacíos (%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (pulg)
1	5.74	2.50	2.26	3.84	16.77	77.12	4442.40	12
2	5.74	2.50	2.26	3.94	16.86	76.64	4454.92	11
3	5.74	2.50	2.25	4.27	17.15	75.09	4469.36	13
4	5.74	2.50	2.26	3.97	16.89	76.48	4470.55	12
5	5.74	2.50	2.26	4.04	16.95	76.17	4408.77	13
6	5.74	2.50	2.24	4.65	17.48	73.39	4528.59	14
7	5.74	2.50	2.26	3.89	16.82	76.89	4504.10	12
8	5.74	2.50	2.25	4.22	17.10	75.34	4477.67	13
9	5.74	2.50	2.25	4.39	17.25	74.54	4420.69	12
10	5.74	2.50	2.26	4.03	16.94	76.23	4381.78	13
11	5.74	2.50	2.25	4.28	17.16	75.03	4413.80	12
12	5.74	2.50	2.26	3.84	16.78	77.11	4474.80	13
13	5.74	2.50	2.24	4.67	17.49	73.32	4498.45	12
14	5.74	2.50	2.26	4.01	16.92	76.32	4487.39	12
15	5.74	2.50	2.25	4.23	17.11	75.28	4508.11	13
16	5.74	2.50	2.26	4.17	17.06	75.57	4518.49	13
17	5.74	2.50	2.25	4.36	17.23	74.69	4498.23	12
18	5.74	2.50	2.26	3.79	16.73	77.36	4490.47	12
19	5.74	2.50	2.26	3.98	16.90	76.44	4468.78	12
20	5.74	2.50	2.25	4.38	17.24	74.61	4562.21	13
21	5.74	2.50	2.26	3.97	16.88	76.51	4507.27	13
22	5.74	2.50	2.24	4.63	17.46	73.49	4657.07	12
23	5.74	2.50	2.25	4.18	17.07	75.53	4579.88	13
24	5.74	2.50	2.26	4.10	17.00	75.86	4504.40	12
25	5.74	2.50	2.26	4.15	17.04	75.66	4470.02	11
26	5.74	2.50	2.24	4.60	17.44	73.59	4572.85	12
27	5.74	2.50	2.26	3.98	16.90	76.44	4570.42	13
28	5.74	2.50	2.25	4.23	17.11	75.30	4621.42	11
29	5.74	2.50	2.26	4.01	16.92	76.30	3993.37	12
30	5.74	2.50	2.26	4.15	17.04	75.66	3549.14	13
Media			2.26	4.16	17.06	75.60	4450.18	12.37
Especificaciones	Mínimo		-	3	-	75.00	1500	8
	Máximo		-	5	-	82.00	-	16

Fuente: Elaboración propia

3.7 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

Para el análisis del tratamiento estadístico se debe seguir una secuencia de pasos que nos llevarán a la confiabilidad de los resultados obtenidos del diseño de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina.

Los pasos a seguir son los siguientes:

Paso 1: Desviación estándar

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

$$S = \sqrt{\frac{1194035.51}{30-1}}$$

$$S = 199.50 \text{ (lb)}$$

Tabla 49. Desviación de los resultados para el diseño

N°	$(x_i - \bar{x})^2$
1	60.52
2	22.44
3	367.86
4	414.82
5	1714.57
6	6147.69
7	2907.64
8	755.48
9	869.78
10	4678.69
11	1323.78
12	606.17
13	2329.67
14	1384.67
15	3356.35
16	4666.69
17	2309.12
18	1623.43
19	346.07
20	12551.71
21	3259.34
22	42804.13
23	16822.91
24	2939.90
25	393.56
26	15047.31
27	14457.62
28	29321.87
29	208674.53
30	811877.23
Total	1194035.51

Fuente: Elaboración propia

Paso 2: Varianza

$$S^2 = \sigma^2$$

$$\sigma^2 = 39800.18 \text{ (lb)}$$

Paso 3: Error de la media

$$E_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$E_{\bar{x}} = \frac{199.50}{\sqrt{30}}$$

$$E_{\bar{x}} = 36.42 \text{ (lb)}$$

Paso 4: Error probable

$$E_p = Z * E_{\bar{x}}$$

Para la presente investigación se trabaja con un nivel de confianza de 95 %.

NC= 95 % \rightarrow Z= 1.96 (De la tabla de, distribución normal)

$$E_p = 1.96 * 36.42$$

$$E_p = 71.39 \text{ (lb)}$$

Paso 5: Intervalo de confianza

\bar{X} = (Media aritmética) = 4450.18 (lb)

$$Va = \bar{X} \pm E_p$$

$$Va = 4450.18 + 71.39$$

$$Va = 4450.18 + 71.39$$

$$Va = 4521.57 \text{ (lb)} \rightarrow \text{Valor Máximo}$$

$$Va = 4450.18 - 71.39$$

$$Va = 4378.79 \text{ (lb)} \rightarrow \text{Valor Mínimo}$$

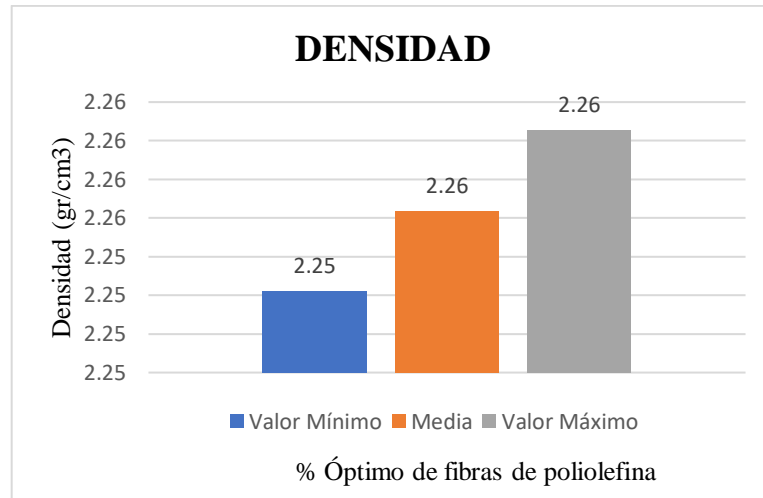
Tabla 50. Tratamiento estadístico para el diseño de una mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina

Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica reforzada con fibras de poliolefina						
N °	Densidad (gr/cm3)	% Vacíos de la mezcla total (%)	Vacíos del agregado mineral (%)	Relación betumen vacíos (%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (pulg)
1	2.26	3.84	16.77	77.12	4442.40	12
2	2.26	3.94	16.86	76.64	4454.92	11
3	2.25	4.27	17.15	75.09	4469.36	13
4	2.26	3.97	16.89	76.48	4470.55	12
5	2.26	4.04	16.95	76.17	4408.77	13
6	2.24	4.65	17.48	73.39	4528.59	14
7	2.26	3.89	16.82	76.89	4504.10	12
8	2.25	4.22	17.10	75.34	4477.67	13
9	2.25	4.39	17.25	74.54	4420.69	12
10	2.26	4.03	16.94	76.23	4381.78	13
11	2.25	4.28	17.16	75.03	4413.80	12
12	2.26	3.84	16.78	77.11	4474.80	13
13	2.24	4.67	17.49	73.32	4498.45	12
14	2.26	4.01	16.92	76.32	4487.39	12
15	2.25	4.23	17.11	75.28	4508.11	13
16	2.26	4.17	17.06	75.57	4518.49	13
17	2.25	4.36	17.23	74.69	4498.23	12
18	2.26	3.79	16.73	77.36	4490.47	12
19	2.26	3.98	16.90	76.44	4468.78	12
20	2.25	4.38	17.24	74.61	4562.21	13
21	2.26	3.97	16.88	76.51	4507.27	13
22	2.24	4.63	17.46	73.49	4657.07	12
23	2.25	4.18	17.07	75.53	4579.88	13
24	2.26	4.10	17.00	75.86	4504.40	12
25	2.26	4.15	17.04	75.66	4470.02	11
26	2.24	4.60	17.44	73.59	4572.85	12
27	2.26	3.98	16.90	76.44	4570.42	13
28	2.25	4.23	17.11	75.30	4621.42	11
29	2.26	4.01	16.92	76.30	3993.37	12
30	2.26	4.15	17.04	75.66	3549.14	13
Media (\bar{x})	2.26	4.16	17.06	75.60	4450.18	12.37
Desviación estándar (S)	0.01	0.25	0.21	1.14	202.91	0.72
Varianza (S = σ)	0.00	0.06	0.05	1.30	41173.64	0.52
Error medio de la media (EX)	0.00	0.05	0.04	0.21	37.05	0.13
Error probable (Ep)	0.00	0.09	0.08	0.41	72.61	0.26
Límite superior (M+Ep)	2.26	4.25	17.13	76.01	4522.79	12.62
Límite inferior (M-Ep)	2.25	4.08	16.98	75.19	4377.57	12.11

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detalla un análisis de los resultados obtenidos por el tratamiento estadístico.

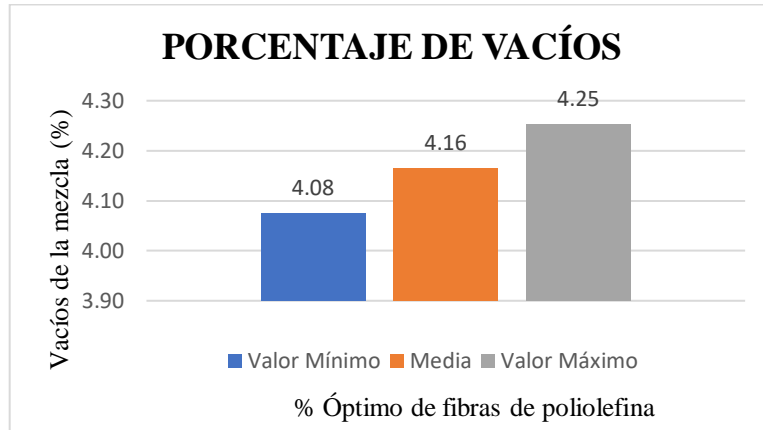
Gráfico 22. Histogramas de la densidad de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de 2.50 % de fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2.22 de las densidades podemos observar que el valor de la media aritmética de la densidad se encuentra dentro del intervalo de confianza dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina.

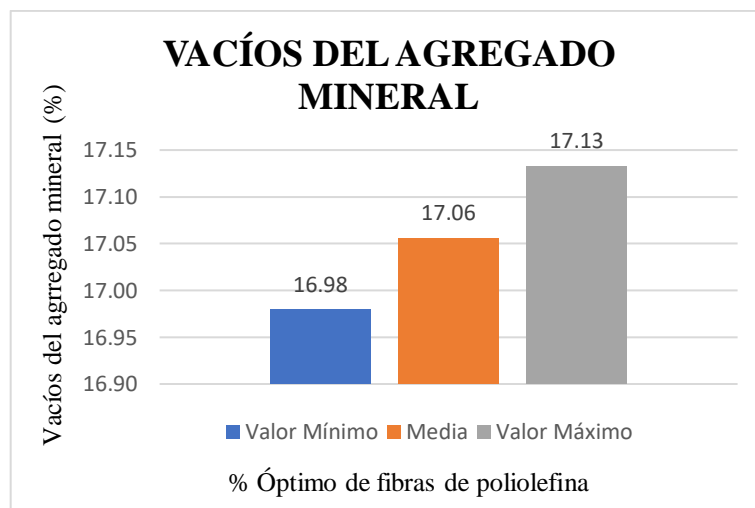
Gráfico 23. Histogramas del porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de 2.50 % de fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2.23 del porcentaje de vacíos podemos observar que el valor de la media aritmética del porcentaje de vacíos se encuentra dentro del intervalo de confianza dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina.

Gráfico 24. Histogramas de los vacíos del agregado mineral de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de 2.50 % de fibras de poliolefina

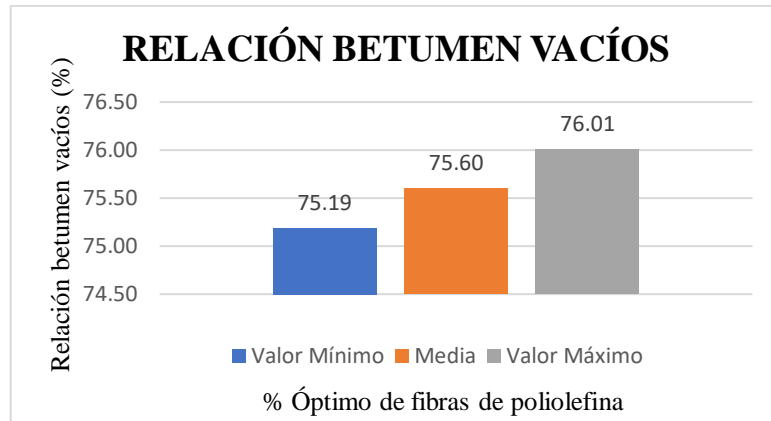


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2.24 de los vacíos del agregado mineral podemos observar que el valor de la media aritmética del porcentaje de vacíos del agregado mineral, se encuentra dentro del

intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina.

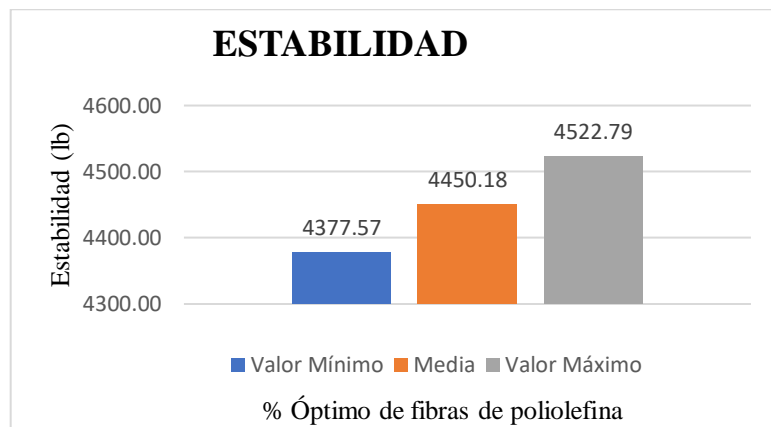
Gráfico 25. Histogramas de la relación betumen vacíos de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de 2.50 % de fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2.25 podemos observar que el valor de la media aritmética de la relación betumen vacíos se encuentra aún dentro del intervalo de confianza dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina.

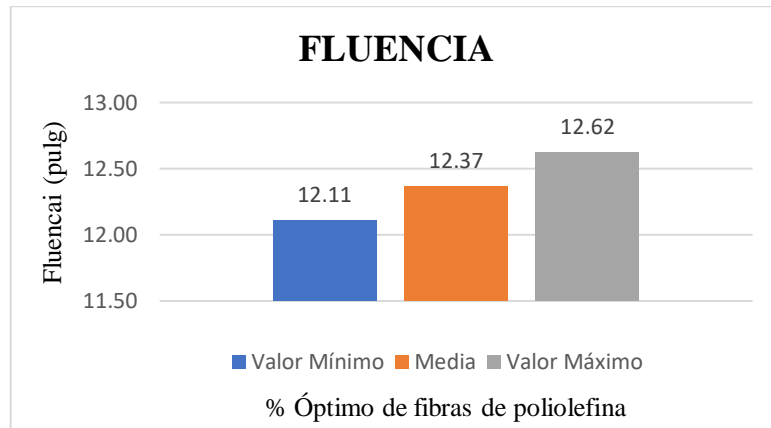
Gráfico 26. Histogramas de estabilidad de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de 2.50 % de fibras de poliolefina de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2.26 podemos observar que el valor de la media aritmética de la estabilidad, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina.

Gráfico 27. Histogramas de fluencia de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de 2.50 % de fibras de poliolefina



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2.27 podemos observar que el valor de la media aritmética de la fluencia se encuentra aún dentro del intervalo de confianza dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño de la mezcla asfáltica modificada con la inclusión de fibras de poliolefina.

3.7.1 Prueba de hipótesis para la estabilidad

Para la prueba de hipótesis se debe seguir una secuencia de pasos que se detallan a continuación.

Paso 1:

Datos:

$n = N^\circ$ de briquetas de diseño = 30

\bar{X} = Media aritmética = 4450.18 (lb)

S = Desviación estándar = 199.50 (lb)

μ =Media poblacional = 1500 (lb)

Paso 2:

Generando las hipótesis

Tabla 51. Tipos de relación en función a la hipótesis

H₀	H₁
=	≠
≤	>
≥	<

H₀ = Hipótesis nula, **H₁** = Hipótesis alternativa

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 4.3 podemos hacer la siguiente relación en función de la hipótesis

$$H_0 : \bar{X} \leq \mu$$

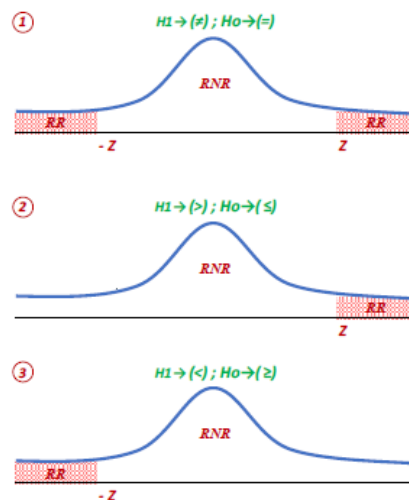
$$H_1 : \bar{X} > \mu$$

Remplazando tenemos

$$H_0 : 4450.18 \leq 1500$$

$$H_1 : 4450.18 > 1500$$

Figura 55. Tipos de regiones según el tipo de relación a la hipótesis



Fuente: Elaboración propia

Paso 3:

Determinar el nivel de significancia (α)

$$NC + \alpha = 1$$

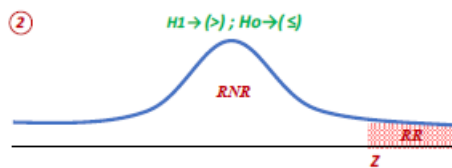
NC = Nivel de confianza = 95.00 % = 0.95

$\alpha = 1.00 - 0.95 = 0.05$ (Tabla distribución normal)

Z = 1.96 (De la tabla de distribución normal)

De la gráfica 3. obtenemos el tipo de región el cual es el 2 con una zona de rechazo a la derecha

Figura 56. Región 2. con zona de rechazo a la derecha



Fuente: Elaboración propia

Paso 4:

Calcular el Zc.

$$Zc = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$$

$$\sigma = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Calculado:

$$\sigma = \frac{199.50}{\sqrt{30}}$$

$$\sigma = 36.42 \text{ (lb)}$$

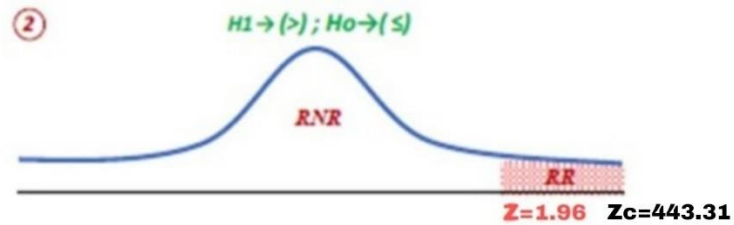
$$Z_c = \frac{4450.18 - 1500}{36.42/\sqrt{30}}$$

$$Z_c = 443.31 \text{ (lb)}$$

Paso 5:

Verificar con el Z_c en qué zona se encuentra dicho valor.

Figura 57. Región 2, con valores calculados



Fuente: Elaboración propia

Observando la imagen 4.44 podemos indicar que está en la zona de rechazo (RR) y con cola hacia la derecha.

Paso 6:

La hipótesis nula es rechazada, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

Al terminar la prueba de hipótesis, se puede verificar que la hipótesis planteada es válida por lo que con el porcentaje óptimo de fibras de poliolefina de 2.50 % sí se obtiene mejoras en la estabilidad.

3.8 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PRECIOS UNITARIOS DE LA MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA

La evaluación de los precios unitarios por metro cubico serán analizados para la ejecución y transporte de una carpeta asfáltica que comprenda los costos de los materiales, mano de obras, equipo y herramientas, gastos generales e impuestos de la mezcla convencional y la mezcla modificada con la inclusión de las fibras de poliolefina.

Tabla 52. Análisis del precio unitario de una mezcla convencional

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
1. Materiales				
Grava triturada (42%)	m3	0.38	110.00	41.80
Gravilla triturada (12%)	m3	0.10	115.00	11.50
Arena (46%)	m3	0.36	125.00	45.00
Cemento asfáltico convencional 85-100	kg	117.00	9.50	1111.50
Diesel	l	10.00	3.74	37.40
Total, de materiales				1247.20
2. Mano de obras				
Ayudante de operador	Hr.	0.03	12.07	0.36
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	1.23
Operador de planta	Hr.	0.09	23.19	2.09
Obrero A	Hr.	0.07	12.07	0.84
Chofer A	Hr.	0.00	15.37	0.02
Sub total de mano de obra				51.57
Cargas sociales (71,18% de Sub total de mano de obra)				36.71
Impuestos IVA (14,94% de Sub total de mano de obra + Cargas sociales)				13.19
Total, mano de obra				101.47
3. Equipo, Maquinaria y Herramientas				
Compactador rodillo liso	Hr.	0.04	303.85	10.63
Distribuidor de agregados autop.	Hr.	0.03	455.03	12.74
Escoba mecánica autop.	Hr.	0.03	71.55	2.00
Planta de calentamiento de asfalto	Hr.	0.09	965.23	86.87
Compactador de rodillo neumático tsp 1000	Hr.	0.08	332.81	27.96
Terminadora de asfalto	Hr.	0.08	669.06	50.18
Cargador frontal de ruedas>=950m3	Hr.	0.00	421.29	0.04
Volquete>=12m3	Hr.	0.00	227.87	0.27
Herramientas (5% de Total mano de obra)				5.07
Total, equipo, maquinaria y herramientas				195.77
4. Gastos generales y administrativos				
Gastos generales (11% de 1+2+3)				154.44
Total, gastos generales y administrativos				154.44
5. Utilidad				
Utilidad (0% de 1+2+3+4)				0.00
Total, utilidad				0.00
6. Impuestos				
Impuestos IT (3,09% de 1+2+3+4+5)				52.50
Total, impuestos				52.50
Total, precio adoptado				1751.38

Fuente: Elaboración propia

Tabla 53. Análisis del precio unitario de una mezcla con fibras de poliolefina en un porcentaje de 2.50 %

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
1. Materiales				
Grava triturada (42%)	m3	0.38	110.00	41.69
Gravilla triturada (12%)	m3	0.10	115.00	11.39
Arena (46%)	m3	0.35	125.00	43.75
Cemento asfáltico convencional 85-100	kg	122.16	9.50	1160.52
Diesel	l	10.00	3.74	37.40
Fibras de poliolefina (2.50%)	kg	56.25	21.67	1218.94
Total, de materiales				2513.68
2. Mano de obras				
Ayudante de operador	Hr.	0.03	12.07	0.36
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	1.23
Operador de planta	Hr.	0.09	23.19	2.09
Obrero A	Hr.	0.07	12.07	0.84
Chofer A	Hr.	0.00	15.37	0.02
Sub total de mano de obra				51.57
Cargas sociales (71,18% de Sub total de mano de obra)				36.71
Impuestos IVA (14,94% de Sub total de mano de obra + Cargas sociales)				13.19
Total, mano de obra				101.47
3. Equipo, Maquinaria y Herramientas				
Compactador rodillo liso	Hr.	0.04	303.85	10.63
Distribuidor de agregados autop.	Hr.	0.03	455.03	12.74
Escoba mecánica autop.	Hr.	0.03	71.55	2.00
Planta de calentamiento de asfalto	Hr.	0.09	965.23	86.87
Compactador de rodillo neumático tsp 1000	Hr.	0.08	332.81	27.96
Terminadora de asfalto	Hr.	0.08	669.06	50.18
Cargador frontal de ruedas >=950m3	Hr.	0.00	421.29	0.04
Volquete >=12m3	Hr.	0.00	227.87	0.27
Herramientas (5% de Total mano de obra)				5.07
Total, equipo, maquinaria y herramientas				195.77
4. Gastos generales y administrativos				
Gastos generales (11% de 1+2+3)				281.09
Total, gastos generales y administrativos				281.09
5. Utilidad				
Utilidad (7% de 1+2+3+4)				0.00
Total, utilidad				0.00
6. Impuestos				
Impuestos IT (3,09% de 1+2+3+4+5)				95.54
Total, impuestos				95.54
Total, precio adoptado				3187.56

Fuente: Elaboración propia

Tabla 54. Comparación de los precios unitarios de la mezcla convencional y modificada con 2.50 % de fibras de poliolefina

Actividad	Precio unitario por m ³ (Bs)	Relación de gastos	Porcentaje de gastos (%)	Porcentaje de gasto adicional (%)
Preparación, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica convencional	1751.38	1.00	100.00	0.00
Preparación, ejecución y transporte de una carpeta asfáltica modificada con fibras de poliolefina al 2.50 %	3187.56	1.82	182.00	82.00

Fuente: Elaboración propia

3.8.1 Ventajas y desventajas del uso de fibras de poliolefina para la modificación de mezclas asfálticas.

Tabla 55. Comparación de las ventajas y desventajas

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento considerable de la estabilidad en la mezcla asfáltica. • Disminución de fisuras cuando se somete la mezcla modificada al equipo Marshall. • Mayor susceptibilidad a la temperatura por la presencia de las fibras en la mezcla asfáltica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad de la compactación de las briquetas cuando se incorpora fibras de poliolefina en un % > 4%. • Aumento del porcentaje de vacíos cuando se incorpora fibras de poliolefina > 3%. • Aumento del contenido óptimo de cemento asfáltico cuando se incorporan fibras de poliolefina mayor al 4%.

Fuente: Elaboración propia

3.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el análisis de resultados se tomará los valores de la media de cada una de las variables a analizar: Estabilidad, densidad, fluencia y vacíos de la mezcla asfáltica.

Se realiza también una comparación de una mezcla convencional con la mezcla modificada con fibras de poliolefina; los gráficos muestran la diferencia entre un valor óptimo de una mezcla asfáltica modificada y una mezcla convencional.

Tabla 56. Comparación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica modificada y convencional

Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional y modificada con un porcentaje de 2.50 % de fibras de poliolefina						
Grupo	Densidad (gr/cm³)	% Vacíos de la mezcla total (%)	Vacíos del agregado mineral (%)	Relación betumen vacíos (%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (pulg)
Mezcla asfáltica convencional	2.28	3.50	15.96	78.10	2911.46	11.67
Mezcla asfáltica modificada	2.26	4.16	17.06	75.60	4450.18	12.37
Aumento o reducción de valores debido a la inclusión de fibras de poliolefina (%)	1.09	19.13	6.85	3.20	52.85	6.00

Fuente: Elaboración propia

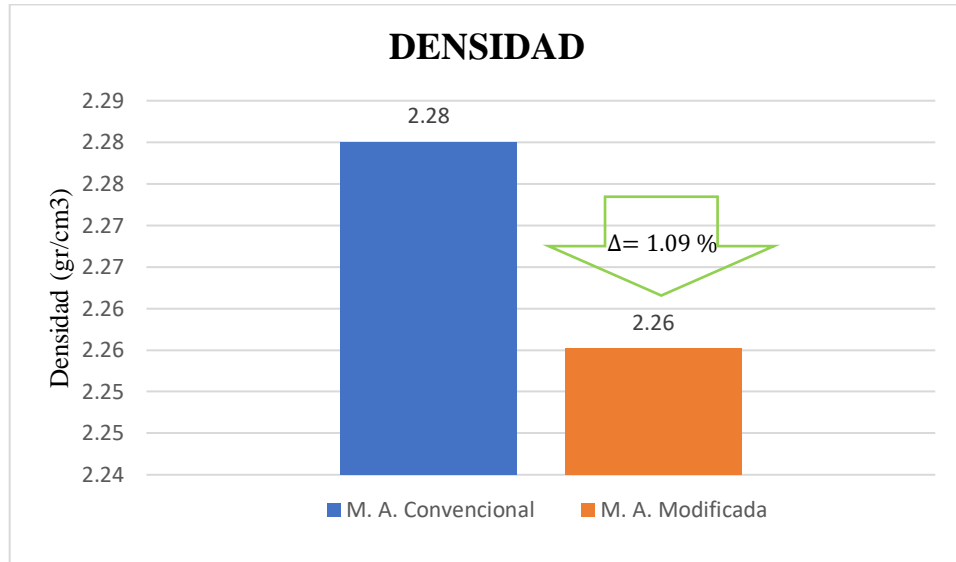
Normativa de la ABC Manual de especificaciones técnicas generales de construcción

Tabla 57. Parámetros del ensayo Marshall dentro de los límites estipulados a seguir para la evaluación de calidad de la mezcla asfáltica

Límites estipulados a seguir para la dosificación y evaluación de la calidad de la mezcla asfáltica	
Porcentaje de vacíos	3 a 5
Relación bitumen-vacíos	75 – 82
Estabilidad mínima	1500 lb. (75 golpes)
Fluencia 1/100”	8 – 16
Resistencia remanente, min.	85 %

Fuente: Manual de especificaciones técnicas generales de construcción “ABC”

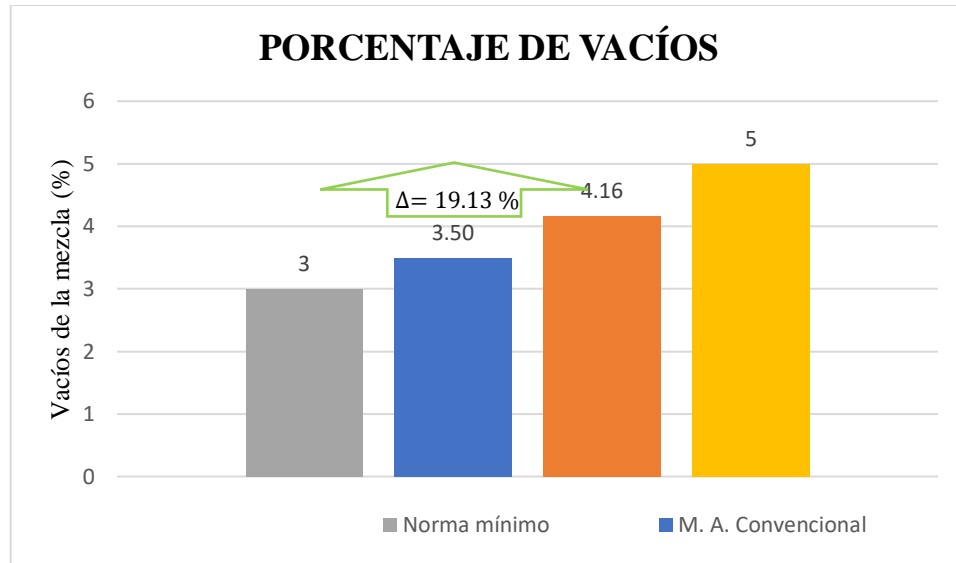
Gráfico 28. Densidad de la mezcla asfáltica convencional y modificada con un porcentaje de fibras de poliolefina de 2.50 %



Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de la densidad podemos observar que la densidad obtenida con la mezcla convencional fue de 2.28 gr/cm³ y podemos observar que hubo una reducción de la densidad en 1.09 % con la inclusión de las fibras de poliolefina en un porcentaje de 2.50 % dando como resultado una densidad de 2,26 gr/cm³ para el diseño de una mezcla asfáltica modificada por el método Marshall.

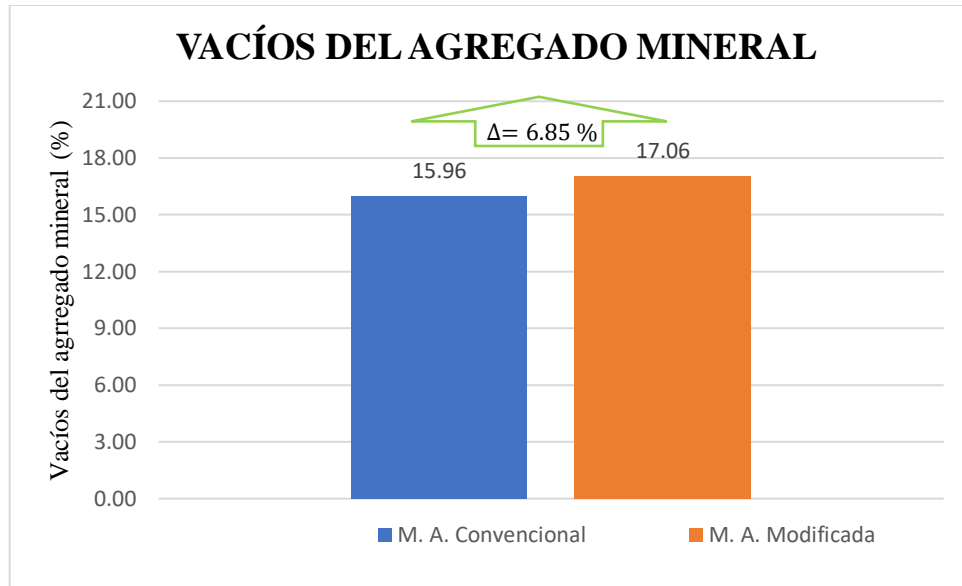
Gráfico 29. Porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica convencional y modificada con un porcentaje de fibras de poliolefina de 2.50 %



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la normativa de la ABC respecto a los valores mínimo y máximo de 3 a 5 % para el porcentaje de vacíos, en el gráfico 2.29 podemos observar que el porcentaje de vacíos obtenido con la mezcla convencional fue de 3.50 % y el valor obtenido con la mezcla modificada fue de 4.16 %, dando a observar que se produjo un aumento de 19.13 % con la inclusión de las fibras de poliolefina, por lo que podemos concluir que el porcentaje de vacíos de la mezcla modificada se encuentra dentro de los valores permitidos por la norma de la ABC descritos en la tabla 1.55. Por lo que podemos señalar que el porcentaje de vacíos de la mezcla modificada es un valor satisfactorio para el diseño de una mezcla asfáltica modificada por el método Marshall.

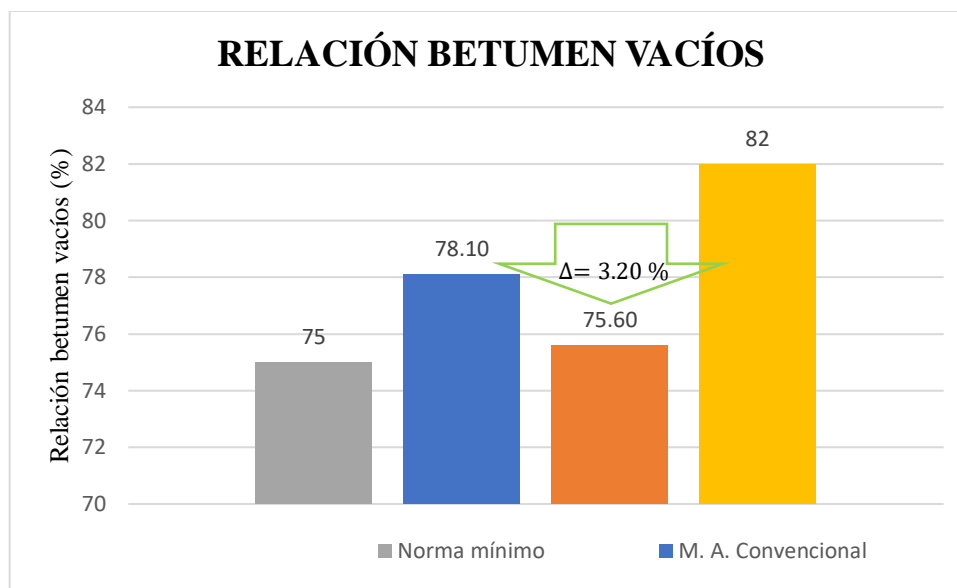
Gráfico 30. Vacíos del agregado mineral de la mezcla asfáltica convencional y modificada con un porcentaje de fibras de poliolefina de 2.50 %



Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de los vacíos del agregado mineral podemos observar que los vacíos del agregado mineral obtenido con la mezcla convencional fueron de 15.96 % y podemos observar que hubo una reducción de la densidad en 6.85 % con la inclusión de las fibras de poliolefina en un porcentaje de 2.50 % dando como resultados vacíos del agregado mineral en 17.06 % para el diseño de una mezcla asfáltica modificada por el método Marshall.

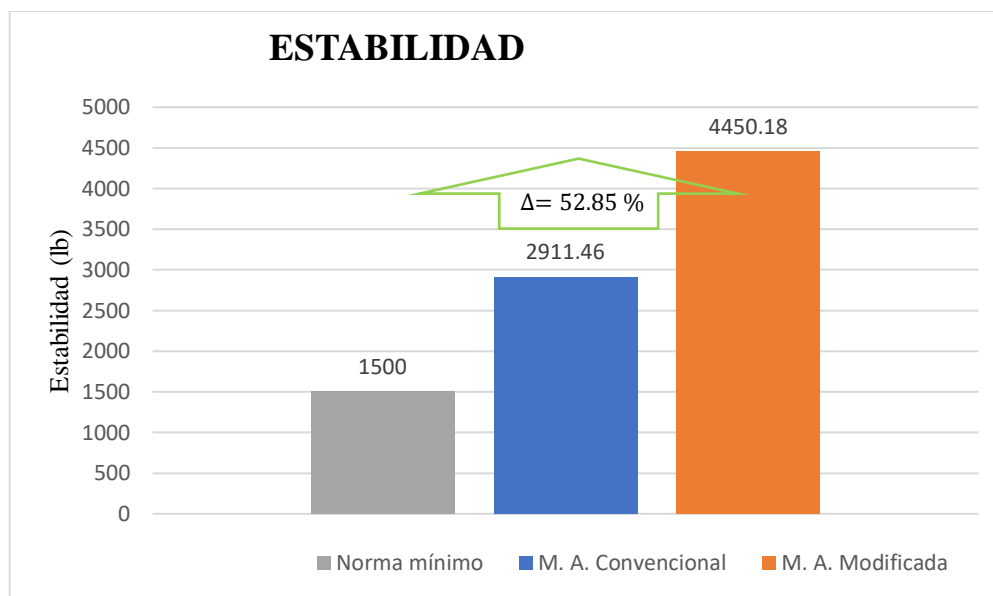
Gráfico 31. Relación de betumen vacíos de la mezcla asfáltica convencional y modificada con un porcentaje de fibras de poliolefina de 2.50 %



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la normativa de la ABC. Respecto a los valores mínimo y máximo de 75 a 82 % para la relación betumen vacíos, en el gráfico 2.31 podemos observar que la relación betumen vacíos obtenida con la mezcla convencional fue de 78.10 % y el valor obtenido con la mezcla modificada fue de 75.60 %, dando a observar que se produjo una reducción de 3.20 % con la inclusión de las fibras de poliolefina, por lo que podemos concluir que la relación betumen vacíos de la mezcla modificada se encuentra dentro de los valores permitidos por la norma de la ABC descritos en la tabla 1.55. Por lo que podemos señalar que la relación betumen vacíos de la mezcla modificada es un valor satisfactorio para el diseño de una mezcla asfáltica modificada por el método Marshall.

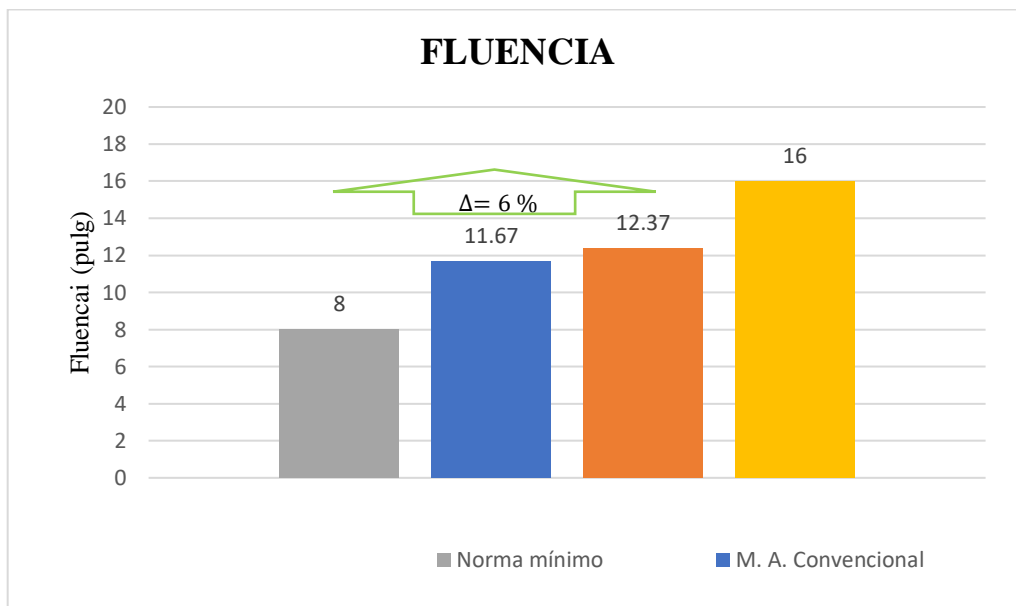
Gráfico 32. Estabilidad de la mezcla asfáltica convencional y modificada con un porcentaje de fibras de poliolefina de 2.50 %



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la normativa de la ABC respecto al valor mínimo de 1500 lb para la estabilidad, en el gráfico 2.32 podemos observar que la estabilidad de la mezcla convencional fue de 2911.46 lb y el valor obtenido con la mezcla modificada fue de 4450.18 lb, dando a observar que se produjo un aumento de 52.85 % con la inclusión de las fibras de poliolefina, por lo que podemos concluir que la estabilidad de la mezcla modificada se encuentra por encima del valor mínimo permitido por la norma de la ABC descritas en la tabla 1.55. Por lo que podemos señalar que la estabilidad de la mezcla modificada es un valor satisfactorio para el diseño de una mezcla asfáltica modificada por el método Marshall.

Gráfico 33. Fluencia de la mezcla asfáltica convencional y modificada con un porcentaje de fibras de poliolefina de 2.50 %



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la normativa de la ABC respecto a los valores mínimo y máximo de 8 a 16 pulg para la fluencia, en el gráfico 2.33 podemos observar que la fluencia de la mezcla convencional fue de 11.67 pulg y el valor obtenido con la mezcla modificada fue de 12.37 pulg, dando a observar que se produjo un aumento de 6 % con la inclusión de las fibras de poliolefina, por lo que podemos concluir que la fluencia de la mezcla modificada se encuentra dentro de los valores permitidos por la norma de la ABC descritos en la tabla 1.55. Por lo que podemos señalar que la fluencia de la mezcla modificada es un valor satisfactorio para el diseño de una mezcla asfáltica modificada por el método Marshall.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Se realizó los ensayos de la caracterización de los agregados grueso, intermedio y fino, así también se realizó los ensayos de la caracterización del cemento asfáltico dando como conclusión que el agregado y el cemento asfáltico cumplen con las especificaciones técnicas para el diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.
- Se efectuó la dosificación de la mezcla asfáltica convencional y su compactación de las briquetas para encontrar el porcentaje del contenido óptimo de cemento asfáltico dando como resultado 5.49 %, para la mezcla convencional.
- Se evaluó 90 briquetas realizadas con distintos porcentajes de fibras de poliolefina y cemento asfáltico con el método Marshall, que permitió determinar el porcentaje óptimo de fibras de poliolefina de 2.50 % con su respectivo porcentaje óptimo de cemento asfáltico de 5.74 %.
- Realizando un análisis comparativo de la densidad, porcentaje de vacíos, flujo y estabilidad de una mezcla asfáltica convencional y modificada, podemos concluir que la densidad, los vacíos y el flujo se mantienen dentro de los rangos aceptables de la normativa de la ABC para el diseño de mezclas asfálticas; respecto a la estabilidad podemos ver un incremento de la estabilidad de 52.85 % para un porcentaje de fibras de 2.50 % con un porcentaje de cemento asfáltico de 5.74 %.
- Realizado el análisis de los precios unitarios se concluye que el costo por m³ de la carpeta asfáltica modificada tiene un costo adicional de 82.00 %, para un porcentaje de 2.50 % de fibras de poliolefina, esto debido al costo de las fibras de poliolefina.
- Realizada la presente investigación propuesta podemos concluir que se puede mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica modificada hasta cierto porcentaje de fibras que en nuestro caso fue del 2.50 % porque también pudimos observar que cuando las fibras sobrepasan dicho porcentaje empezaron a presentar

propiedades contraproducentes a la mezcla asfáltica, así como la estabilidad empezó a disminuir, el porcentaje de vacíos aumentó produciendo una disminución de la densidad de la mezcla asfáltica saliendo de los rangos propuestos por la normativa de la ABC.

4.2 RECOMENDACIONES

- Realizar los ensayos de la caracterización de los materiales con el mayor cuidado posible para evitar obtener datos erróneos que puedan perjudicar los cálculos y por ende los resultados que se espera alcanzar.
- Utilizar guantes, barbijo, bata de laboratorio al momento de estar en contacto con equipos como la cocina, el horno, los equipos inflamables, y al preparar las briquetas por lo que la mezcla se debe calentar a altas temperaturas donde se generarán temperaturas muy altas para la manipulación y gases perjudiciales para la salud.
- No sobrecalentar demasiadas veces el cemento asfáltico debido a que esto puede generar que sus propiedades cambien y esto estropee los resultados que se espera obtener.
- Para poder optimizar el tiempo al momento de realizar la compactación es preferible tener todos los materiales debidamente pesados respecto a la dosificación determinada para así poder realizar una cantidad mayor de briquetas.
- Al momento de vaciar la mezcla asfáltica en los moldes tomar en cuenta que no se quede agregado, cemento asfáltico o fibras impregnados en la cuchara con la que se mezcla los materiales al momento de preparar la mezcla asfáltica.
- Cuando se realiza la compactación tener en cuenta que el martillo compactador genere un ángulo de 90° con el piso donde se compactará para garantizar que las alturas de las briquetas tengan una altura constante y también realizar la compactación a una velocidad y altura constantes por lo que el método Marshall es una práctica pulcra y un error nos puede hacer fallar los resultados.
- Para realizar el desmolde de las briquetas esperar un tiempo de 15 minutos para evitar que al momento de extraer la briqueta del molde esta se desmorone debido a la alta temperatura a la que son compactadas.

- Para realizar la rotura de las briquetas con el equipo Marshall se recomienda realizar una tabulación de los tiempos de ingreso y salida de las muestras que estarán sumergidas, calentar agua constantemente para evitar que la temperatura no descienda y poder tener las briquetas sumergidas a 60°C.
- Al momento de tomar las lecturas en el equipo Marshall se recomienda hacer que la lectura sea lo más exacta posible del dial de la fluencia por lo que cuando se presenta la rotura de la biqueta el dial de la estabilidad se detiene, pero el dial de la fluencia continúa avanzando, por ello la lectura debe ser instantánea para evitar obtener datos inexactos que perjudiquen los resultados de la investigación propuesta.