

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO

1.1 Introducción

El autor de este trabajo de investigación pretende realizar la comparación de una mezcla asfáltica densa caliente frente a una mezcla asfáltica densa tibia con el fin de establecer cuál de estas mezclas asfálticas generan mejores resultados de una manera más optima, además de poder determinar qué mezcla asfáltica es la más beneficiosa para ser utilizada en nuestro medio.

Las mezclas asfálticas densa caliente son las mezclas más usadas comúnmente, pero estas utilizan temperaturas de producción muy elevadas frente a las mezclas asfálticas densa tibia que busca reducir su temperatura, lo cual permite disminuir considerablemente la emisión de gases al medio ambiente.

Realizar la comparación de la optimización de mezclas asfálticas densa caliente y tibia trabajando con diferentes temperaturas de producción en mezclas condicionadas por temperatura y para ambas mezclas asfálticas aplicando la metodología Marshall.

Aplicar una nueva tecnología de diseño de mezcla asfáltica, favorece en gran manera a nuestro medio dado que no requiere modificaciones e inversiones en su preparación además de generar una mejor trabajabilidad, durante el proceso de mezclado, compactado y colocado. De manera que el presente proyecto podrá ser de utilidad para alguna futura investigación que englobe todo el desarrollo estudiado acerca de estas mezclas asfálticas.

1.2 Antecedentes

En las décadas de los setenta las mezclas asfálticas utilizadas en la capa de rodadura eran específicamente diseños de mezclas asfálticas en caliente cuyos diseños y especificaciones aún se siguen utilizando a día de hoy.

Con el avance de nuevas tecnologías en el diseño de mezclas asfálticas se dio el surgimiento de las mezclas asfálticas tibias, las cuales se elaboran a temperaturas de producción más bajas que las mezclas asfálticas en caliente.

Estas mezclas asfálticas tibias si bien no son muy conocidas en nuestro medio, aplicar esta nueva tecnología favorece en gran manera dado que no requiere modificaciones en su preparación además de generar una mejor trabajabilidad.

La Ing. Andrea Ulloa Calderón realizó un estudio de investigación acerca de las mezclas asfálticas tibias mencionando las aplicaciones, el uso de aditivos químicos, las limitaciones, etc.

Es de tal manera que surge la idea de realizar la presente investigación para conocer cómo varían las propiedades mecánicas de estabilidad y fluencia de una mezcla asfáltica densa tibia frente a una mezcla asfáltica densa caliente, así de esta manera determinando cual es la mezcla asfáltica con mejores resultados.

La presente Investigación será realizada a nivel regional en los laboratorios de la UAJMS.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación académica

Bolivia es un país en desarrollo en el diseño de mezclas asfálticas. Teniendo en cuenta que existen nuevas tendencias que proponen el diseño de contenido óptimo de asfalto de mezclas asfálticas en forma analítica, realizando ajustes de mezcla, la cual permite desarrollar mejores criterios para la obtención del contenido óptimo de asfalto en la etapa de diseño en laboratorio por tal motivo representa una optimización de recursos y tiempo, que pueden ser de mucha ayuda en nuestro medio como alternativa las metodologías convencionales metodología de optimización a utilizar en el diseño de mezclas asfálticas. Las teorías científicas que respaldarán el trabajo están basadas en asfaltos, dosificaciones y metodología Marshall.

1.3.2 Justificación técnica

Los equipos utilizados para obtener la optimización de dosificación de mezclas asfálticas densa tibia y caliente son los utilizados por el método Marshall, los cuales son factibles de realizar ya que se encuentra a disposición los equipos necesarios para la realización de la presente investigación en base a la comprobación y el procedimiento ASTM D-1559, además de la factibilidad de la obtención de los agregados pétreos y el cemento asfáltico que se requieren para realizar los ensayos necesarios para la presente investigación.

1.3.3 Justificación social

Las Mezclas asfálticas traen consigo innumerables beneficios a la sociedad, esta investigación podrá incrementar, mayor rendimiento financiero y vida útil, seguridad de realizar cada vez mejores trabajos, prolongar el tiempo de mantenimiento de mezclas asfálticas densas, son algunos de los beneficios que se podrán obtener con la optimización de este tipo de mezclas.

Pudiendo tener mejores prestaciones confort y tranquilidad a la sociedad en cuanto al servicio de transporte.

1.4 Planteamiento del problema

1.4.1 Situación problemática

La necesidad de obtener nuevos diseños de mezclas óptimas para prolongar la vida útil de los pavimentos logrando combatir las patologías provocadas por los cambios climáticos y el uso no adecuado, ha iniciado la búsqueda de nuevas mezclas asfálticas abriendo la puerta a metodologías de diseño que buscan optimizar energía, tiempo y costo.

Es por tal motivo que es necesario optimizar una metodología de diseño entre las mezclas asfálticas densa tibia y caliente.

La optimización de mezclas asfálticas es una investigación de laboratorio para el diseño de una mejor mezcla asfáltica por medio del análisis de sus propiedades Marshall. Una de las virtudes del método Marshall es la importancia que se asigna a las temperaturas del material asfáltico. La optimización fusiona racionalmente las especificaciones de diseño con los criterios de control en campo, mediante la representación gráfica de temperaturas se garantiza el cumplimiento de todas las especificaciones.

Si el diseño de mezclas asfálticas por la metodología Marshall no cumple los requisitos de calidad del agregado con diferentes contenidos de asfalto, al establecer el diseño final y al no cumplir los requerimientos de propiedades Marshall, se debe realizar ajustes o rediseñar la mezcla, entonces, Esta situación trae como consecuencia la pérdida de tiempo y un costo económico. Por esta razón es necesario realizar la optimización de nuevas alternativas para el diseño de mezclas asfálticas calientes densas y tibias con la metodología Marshall.

Existe la necesidad de realizar la comparación y optimación de estas mezclas para así poder aplicar el mejor diseño de mezcla asfáltica densa para distintos medios climáticos que existen en nuestro departamento aplicando las nuevas tendencias de mezclas asfálticas.

1.4.2 Delimitación del tiempo

Se encuentra en tiempo presente.

1.4.3 Delimitación del espacio

Área temática: asfaltos

Base de operaciones: laboratorio de asfaltos

1.4.4 Formulación del problema

¿Cuáles son las diferencias en su optimización de propiedades mecánicas en estabilidad y fluencia entre las mezclas asfálticas densa tibia y caliente?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Comparar las propiedades mecánicas entre la mezcla asfáltica densa tibia contra la mezcla asfáltica densa caliente; considerando los resultados del Marshall; de tal manera, se pueda establecer ventajas y desventajas para su mejor aplicación.

1.5.2 Objetivos específicos

- Recopilar información sobre la metodología Marshall.
- Establecer un número confiable de pruebas a realizar.
- Establecer la caracterización de los agregados y el cemento asfáltico.
- Determinar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.
- Determinar la optimización de mezclas asfálticas densas tibias y calientes.
- Realizar una comparación de mezclas mediante una prueba estadística.

1.6 Hipótesis

La mezcla asfáltica densa caliente tiene mejores características que la mezcla asfáltica densa tibia en sus propiedades mecánicas de estabilidad y fluencia en su optimización.

1.7 Identificación y conceptualización de las variables

1.7.1 Identificación de las variables

Variable independiente

- ❖ Mezclas asfálticas densa tibia y caliente.

Variable dependiente

- ❖ Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.

1.7.2 Conceptualización de las variables

Tabla 1. Variable independiente

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Mezclas asfálticas densa tibia y caliente	Método Marshall	M.C	(145-160) °C
		M.T	(110-140) °C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Variable dependiente

Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas	Método Marshall	Estabilidad	>1800 libras
		Fluencia	8 a 16 de 0,01”

Fuente: Elaboración propia

1.8 Alcance

La presente investigación cuenta con dos variables: una variable independiente que son las mezclas asfálticas densa tibia y caliente y una variable dependiente que son las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en tal sentido corresponde al nivel causal/explicativo por lo cual la variable independiente puede ser manipulada por el investigador lo que corresponde a un diseño experimental.

CAPÍTULO II

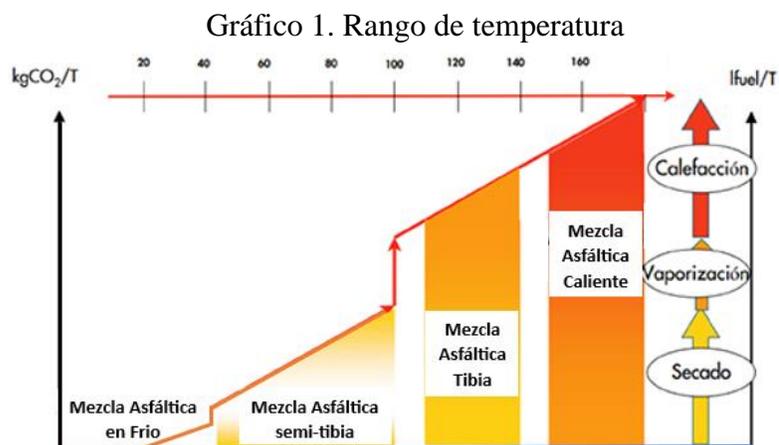
ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1 Mezclas asfálticas

La mezcla asfáltica se puede definir como una combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto.

Existen varias clasificaciones según el parámetro a considerar en las mezclas asfálticas, si la temperatura es considerada, tenemos mezclas en frío y mezclas en caliente.

Si el parámetro considerado es el porcentaje de vacíos de aire, las mezclas pueden ser densas o cerradas; semidensas o semicerradas; abiertas y porosas, dependiendo de si tienen menos del 6%, entre el 6 y el 12% de vacíos de aire, entre el 12 y el 18% o más del 20%, respectivamente. (Garnica Anguas,2005).



Fuente: Programa de Infraestructura del Transporte

2.1.1 Clasificación de las mezclas asfálticas

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

a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado

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

b) 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.

c) Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

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

- **Mezclas cerradas o densas:** 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 %.

d) Por el tamaño máximo del agregado pétreo

- **Mezclas gruesas:** Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.

- **Mezclas finas:** También llamadas 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.

e) Por la estructura del agregado pétreo

- **Mezclas con esqueleto mineral:** Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

- **Mezclas sin esqueleto mineral:** No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

f) Por la granulometría

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

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

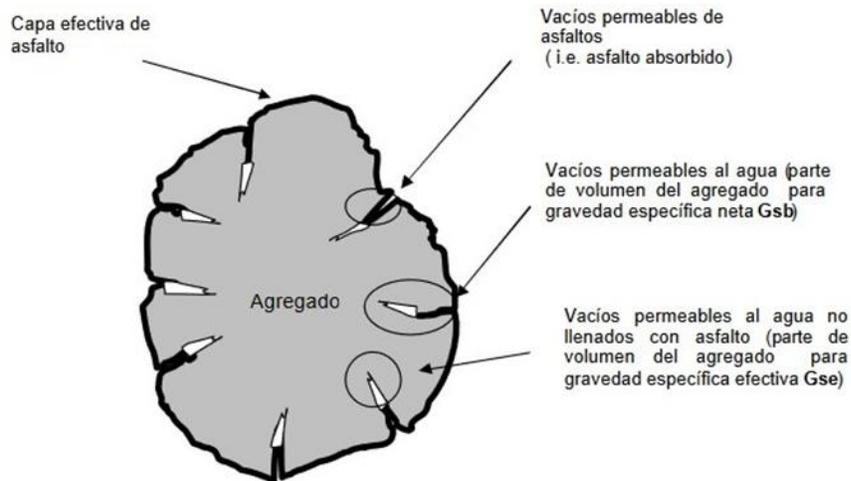
2.2 Parámetros volumétricos dentro de la mezcla asfáltica

2.2.1 Gravedad específica neta del agregado (Gsb)

Representa la relación, medida a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado y la masa de igual volumen de agua; incluye únicamente los poros permeables al agua, normado por ASTM C-127 o ASTM C-128 (Garnica et al., 2005).

Se considera las fracciones separadas de agregados que conforman la mezcla final, cada una con sus diferentes gravedades específicas.

Figura 1. Parámetros volumétricos de diseño



Fuente: Elaboración propia

Se calcula usando la siguiente ecuación.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$$

Donde:

Gsb= Gravedad específica neta de la combinación final de agregados.

P1, P2, PN= Porcentajes de cada fracción individual de las masas de los agregados.

G1, G2, GN=Gravedad específica neta de las fracciones individuales de los agregados.

2.2.2 Gravedad específica aparente del agregado (Gsa)

Representa la relación, medida a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado y la masa de igual volumen de agua; incluye únicamente el volumen del sólido del agregado, normado por ASTM C-127 o ASTM C-128 (Garnica et al., 2005).

Se considera las fracciones separadas de agregados que conforman la mezcla final, cada una con sus diferentes gravedades específicas, se determina con la misma expresión para obtener el Gsb, obviamente utilizando las gravedades específicas aparentes de cada componente.

2.2.3 Gravedad específica efectiva del agregado (Gse)

Representa la relación, medida a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado y la masa de igual volumen de agua; incluye únicamente el volumen de los poros permeables al agua no llenos con asfalto.(Garnica et al., 2005). Se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - CA}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{CA}{G_b}}$$

Donde:

Gse= Gravedad específica efectiva del agregado.

Gmm= Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

Pmm= Porcentaje del peso de la mezcla total suelta, igual a 100.

CA= Contenido de asfalto con respecto a la masa.

Gb= Gravedad específica del asfalto.

2.2.4 Gravedad específica máxima de las mezclas del agregado (G_{mm})

Representa la relación medida a una misma temperatura entre la masa de un volumen dado de mezcla asfáltica sin vacíos de aire y la masa de igual volumen de agua. (Garnica et al. 2005). Se determina para cada contenido de asfalto mediante ASTM-D-2041/ AASHTO T-209.

Para obtener la Gravedad específica máxima para cualquier otro contenido de asfalto que contenga la misma mezcla de agregados se utiliza la ecuación 3, la cual supone que la gravedad específica efectiva del agregado es constante; es válida puesto que la absorción del asfalto no varía apreciablemente con los cambios en el contenido de asfalto (Garnica Anguas et al., 2005).

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{CA}{G_b}}$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima.

P_{mm} = Porcentaje del peso de la mezcla total suelta igual a 100.

CA = Contenido de asfalto con respecto a la masa.

2.2.5 Asfalto absorbido (P_{ba})

Se determina mediante la siguiente ecuación.

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \times G_b$$

Donde:

P_{ba} = Asfalto absorbido, porcentaje por masa de agregado.

G_{sb} = Gravedad específica bruta de la combinación de agregados.

G_{se} = Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados.

G_b = Gravedad específica del asfalto.

2.2.6 Contenido de asfalto efectivo en la mezcla (Pbe)

Representa una porción del total del asfalto de la mezcla, y que recubre exteriormente el agregado. Influye de gran manera en el desempeño de la mezcla asfáltica. (Garnica Anguas et al., 2005). Se determina mediante la siguiente ecuación.

$$P_{be} = CA - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s$$

Donde:

Pbe= Contenido efectivo de asfalto, % del total de la masa de la mezcla.

Pba = Asfalto absorbido, % por masa de agregado.

CA = Contenido de asfalto con respecto a la masa.

Ps = Contenido del agregado, % del total de la masa de la mezcla asfáltica.

2.2.7 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla (VAM)

Representan el vacío intergranular entre las partículas del agregado pétreo, utilizado en la mezcla asfáltica compactada, se expresa como un porcentaje del volumen total e incluye el contenido de asfalto efectivo y los vacíos de aire. (Garnica Anguas et al., 2005).

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica, se utiliza para su determinación la siguiente ecuación.

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

2.2.8 Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada (Va)

Consiste en el volumen total de aire contenido entre las partículas de agregado ya cubiertas de asfalto dentro de la mezcla compactada, se expresa como el porcentaje del volumen neto de la mezcla. Se determina mediante la siguiente ecuación.

$$Va = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

Va = Vacíos de aire de la mezcla compactada, % del volumen total.

Gmm= Gravedad específica teórica máxima.

Gmb = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

2.2.9 Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto de la mezcla compactada (VFA)

Corresponde al porcentaje del volumen total de vacíos, que es ocupado por el asfalto efectivo, entre las partículas de agregado (Garnica Anguas et al., 2005).

Este parámetro no incluye el asfalto absorbido, se determina mediante la siguiente ecuación.

$$VFA = \frac{VAM - Va}{VAM} \times 100$$

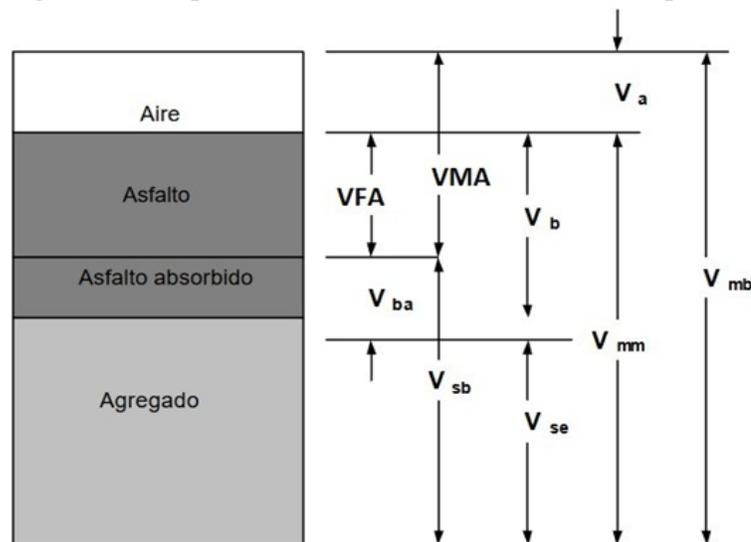
Donde:

VFA = Vacíos rellenos de asfalto, porcentaje del V.A.M.

VAM = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

Va = Vacíos en la mezcla compactada, % del volumen total.

Figura 2. Componentes de la mezcla de asfalto compactado



Fuente: Elaboración propia

Donde:

VMA= Volumen de vacíos en agregado mineral.

Vmb= Volumen total de la mezcla asfáltica.

Vmm= Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos.

VFA= Volumen de vacíos llenados con asfalto.

Va= Volumen de vacíos con aire.

Vb= Volumen de asfalto.

Vba= Volumen de asfalto absorbido.

Vsb = Volumen neto de agregado mineral (gravedad específica de la masa).

Vse= Volumen específico de agregado mineral (gravedad específica efectiva).

2.2.10 Porcentaje de polvo (relación filler-asfalto) (DP)

Corresponde a la relación de porcentaje de polvo de roca es decir la relación de filler y el asfalto.

Se calcula con la correspondiente a la siguiente ecuación:

$$DP = \frac{P_{0,075}}{P_{be}}$$

Donde:

DP = Proporción de polvo de la mezcla asfáltica.

P0,075 = Porcentaje del material que pasa la malla 200 (0,075mm).

Pbe = Porcentaje de asfalto efectivo del total de la mezcla.

2.3 Propiedades consideradas en las mezclas

Según Garnica Anguas (2005), para una aplicación específica e independientemente del procedimiento de diseño empleado, las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica en caliente son:

2.3.1 Estabilidad

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

2.3.2 Resistencia al deslizamiento

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento, en particular cuando está húmeda.

2.3.3 Impermeabilidad

Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica.

2.3.4 Flexibilidad

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para amoldarse, sin sufrir agrietamientos o fisuración, a los asentamientos y movimientos graduales de la base y la subrasante. En ocasiones esta propiedad presenta conflictos con los requerimientos de estabilidad.

2.3.5 Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir cargas repetidas causadas por el paso de los vehículos. El agrietamiento por fatiga está relacionado con el contenido y la rigidez del asfalto.

2.3.6 Durabilidad

Es la propiedad de la mezcla asfáltica que describe su capacidad para resistir los efectos perjudiciales del aire, agua, temperatura y tránsito que pueden provocar envejecimiento del asfalto, desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado.

Una buena mezcla asfáltica no debe sufrir envejecimiento excesivo durante la vida en servicio. Esta propiedad se relaciona con el espesor de la película de asfalto, y con los vacíos de aire.

2.3.7 Trabajabilidad

Es la propiedad relacionada con la facilidad con que la mezcla asfáltica es colocada y compactada in situ. Una buena mezcla debe ser capaz de permitir su colocación y

compactación, sin que se requiera un esfuerzo demasiado grande. Esta propiedad, generalmente depende de uno, o una combinación, de los siguientes factores: características del agregado, la granulometría, el contenido, y la viscosidad del asfalto.

2.4 Factores a controlar en las mezclas asfálticas

Según UMSS (2008), para que una carpeta sea estable, duradera, impermeable y antiderrapante, se deben controlar los siguientes factores:

- Granulometría.
- Contenido de asfalto.
- Consistencia y calidad del cemento asfáltico.

2.4.1 Granulometría

Existen varias composiciones granulométricas del material pétreo, de acuerdo a las características de la obra y a la especificación técnica utilizada. Las mezclas con un contenido de partículas pétreas de mayor tamaño tienen mayor estabilidad. El tamaño máximo de las partículas no debe ser mayor a $\frac{2}{3}$ del espesor de la carpeta.

2.4.2 Contenido de asfalto

El contenido óptimo para la preparación de la mezcla debe ser el necesario para cubrir con una película de asfalto la superficie de las partículas pétreas, sin llenar completamente los vacíos, ya que éstos deben ser llenados con las partículas más finas. Por una parte, la mezcla debe contener un porcentaje mínimo de vacíos para evitar las exudaciones del asfalto, que pueden provocar la formación de surcos u ondulaciones; por otra parte, deberá tener un porcentaje máximo de vacíos, ya que, si este valor se excede, se puede ocasionar el endurecimiento del asfalto por efecto de los agentes atmosféricos, dando como resultado una carpeta quebradiza.

2.4.3 Consistencia y calidad del cemento asfáltico

Se debe elegir el cemento asfáltico más adecuado a las condiciones climatológicas del lugar donde se encuentra la obra. Un asfalto muy duro puede dar lugar a un pavimento quebradizo con problemas de desintegración y exceso de agrietamientos.

2.5 Influencia relativa del asfalto y del agregado en el cemento asfáltico

En la preparación y colocación del revestimiento asfáltico intervienen un gran número de factores relacionados entre sí, por lo cual no se puede evaluar su calidad considerando separadamente las propiedades del asfalto, y las del agregado. La calidad del pavimento se determinará analizando la mezcla compactada, de acuerdo a las consideraciones siguientes:

2.5.1 Ligante asfáltico

En una mezcla en caliente, el asfalto se encuentra en forma de películas muy delgadas que se han obtenido mediante la aplicación de calor. Por consiguiente, las propiedades del asfalto en película delgada podrían ser diferentes de aquellas del producto a granel, y además, podrían alterarse con la aplicación del calor. El asfalto es sólo uno de los componentes del pavimento que cumplirá apropiadamente sus funciones, solamente si se emplea en la cantidad correcta, con un agregado mineral adecuado, y bajo condiciones apropiadas.

2.5.2 Agregado mineral

Una vez que el agregado mineral ha sido cubierto con asfalto, adquiere características diferentes, por ejemplo, la facilidad con la cual puede compactarse es completamente diferente. Su capacidad de repeler el agua se incrementa de acuerdo al espesor de la película de asfalto. En consecuencia, hay solamente una forma segura de diseñar una mezcla asfáltica, mediante la preparación de mezclas en laboratorio, y la verificación en sitio de que las características físicas establecidas en laboratorio se cumplan en la obra, para garantizar el comportamiento del pavimento.

2.6 Efecto del asfalto en la estabilidad

Dependiendo de su cantidad en la mezcla, el asfalto puede actuar como un ligante o como un lubricante. Por lo tanto, la estabilidad de una mezcla aumenta con un incremento en el porcentaje de asfalto hasta alcanzar un máximo, después del cual disminuye. El efecto del porcentaje de asfalto varía con el tipo de agregado y en algunos casos es mucho más crítico que en otros. (UMSS, 2008)

2.6.1 Características del asfalto

Las características del asfalto, especialmente su consistencia, afectan los resultados de las pruebas de estabilidad. La viscosidad del asfalto entra en juego cuando la aplicación de la carga es muy rápida. En la prueba Marshall, el grado del asfalto, tiene un gran efecto en la estabilidad, pero muy poco en el índice de flujo. (UMSS, 2008).

2.7 Efecto del agregado mineral en la estabilidad

2.7.1 Tamaño máximo de los agregados

En general, a medida que el tamaño del agregado aumenta, la estabilidad aumenta. Por razones de trabajabilidad y apariencia superficial, el tamaño máximo más utilizado es el de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Cuando el porcentaje de agregado grueso es menor de 25 %, el tamaño máximo tiene poca influencia en la estabilidad. (UMSS, 2008).

2.7.2 Tipo de agregado

La forma de las partículas del agregado mineral, su textura superficial y su dureza, influyen en la estabilidad. Por ejemplo, se puede predecir que una grava con partículas sin trituración, lisas y redondas, producirá menor estabilidad que un material triturado con partículas que tengan una superficie áspera y bordes duros.

El tipo de arena y su cantidad, son los factores más importantes que afectan la estabilidad del concreto asfáltico. Cuando la gradación se mantiene constante, la calidad y cantidad de arena tiene una gran influencia en la estabilidad. (UMSS, 2008).

2.7.3 Gradación

El porcentaje de vacíos en la mezcla compactada, debe ser lo suficientemente bajo para prevenir infiltraciones de agua, pero suficientemente alto, con el fin de proveer espacios para un aumento de su densidad y para la expansión ocasionada por las temperaturas altas del verano. Por ejemplo, para una mezcla en laboratorio compactada por el método Marshall con 75 golpes, se considera satisfactorio un porcentaje de vacíos entre 3 y 5%. Por esta razón se recomienda elegir agregados que permitan una amplia variación en el porcentaje de asfalto, con un pequeño cambio en el porcentaje de vacíos. Sin embargo, es difícil encontrar mezclas de agregados que permitan variaciones en el contenido de asfalto mayores al 1%.

Por otra parte, se debe tener en cuenta, que la cantidad de asfalto requerida para producir el volumen necesario de vacíos, depende del volumen de vacíos disponible en el agregado mineral compactado.

Por esta razón, es necesario tener el mayor porcentaje de vacíos en el agregado mineral, tanto como la estabilidad especificada lo permita. Se puede obtener un mayor porcentaje de vacíos en el agregado (mayor espacio para el asfalto), aumentando el porcentaje de arena, o disminuyendo el porcentaje de llenante mineral (Filler). (UMSS, 2008).

2.7.4 Llenante mineral (filler)

Es un material no arcilloso que pasa el tamiz N° 200. Se incorpora a la mezcla con el fin de aumentar la estabilidad, y disminuir el porcentaje de asfalto necesario para obtener un determinado porcentaje de vacíos en la mezcla. Es suficiente una cantidad muy pequeña para aumentar la estabilidad, mientras el índice de flujo permanece prácticamente constante.

Una pequeña cantidad de llenante mineral, puede reducir el contenido óptimo de asfalto. El llenante mineral es un factor importante que afecta a la durabilidad, por esta razón se debe controlar estrictamente su cantidad y su calidad. (UMSS, 2008).

2.7.5 Porcentaje de vacíos

La disminución del porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica produce una disminución de la porosidad y en consecuencia una disminución de la penetrabilidad del aire y agua en el pavimento. La primera significa una oxidación más lenta del asfalto, es decir, una mayor durabilidad, y la segunda una menor posibilidad de que se pongan en contacto las fases agua-asfalto-agregado, lo que se retarda la posibilidad de desintegración del pavimento por la acción del agua, que produce el desprendimiento de la película de asfalto del agregado. (UMSS, 2008)

Por otra parte, la mezcla compactada debe presentar un volumen mínimo de vacíos, para impedir afloramientos de asfalto y pérdida de estabilidad, como consecuencia de la compactación adicional que produce el tránsito. (UMSS, 2008).

2.8 Efecto de la densidad de la mezcla en la estabilidad

La densidad de una mezcla afecta a la mayoría de las pruebas de estabilidad, sin embargo, la estabilidad máxima no ocurre siempre a la densidad máxima determinada antes de la prueba. Un estado más denso puede ocurrir durante la aplicación de la carga, o el porcentaje de asfalto correspondiente a la densidad máxima puede tener un gran efecto lubricante. Además, las temperaturas a las cuales se determinan la densidad y la estabilidad, generalmente, no son iguales.

2.9 Efecto del asfalto en la durabilidad

El asfalto es el material que ejerce mayor influencia en la durabilidad, debido a que el concreto asfáltico mantendrá su durabilidad, mientras el asfalto mantenga sus propiedades de ligante y del impermeabilizador.

El asfalto, previamente calentado, cubre el agregado mineral con una película delgada; el proceso de calentamiento ocasiona en el asfalto oxidación y endurecimiento. El endurecimiento se mide por la disminución del valor de la penetración. El endurecimiento puede ser producido por las propiedades del asfalto, por la temperatura de mezcla, por la cantidad de asfalto en la mezcla, y por la densidad del pavimento.

2.10 Efecto del agregado mineral en la durabilidad

Las características principales del agregado mineral que afectan la durabilidad, son la dureza, la forma y textura superficial. La forma y la textura superficial, afectan la densidad del pavimento. La gradación se debe mantener constante con un esfuerzo de compactación adecuado. El porcentaje de vacíos depende del tipo de agregado.

2.11 Cantidad de asfalto en la mezcla

Una de las principales funciones del asfalto es mantener los agregados ligados bajo los efectos abrasivos del tránsito, en un amplio límite de temperaturas. Esto solo puede alcanzarse si hay una cantidad suficiente de asfalto para ligar estos agregados. El ensayo de abrasión de California, que mide la resistencia del asfalto contra el desgaste, demuestra que la cantidad de asfalto es más importante que sus características.

Es importante que el pavimento conserve su flexibilidad a bajas temperaturas, ya que la abrasión y desintegración aumentan con la fragilidad. Además de la resistencia a la

abrasión, el pavimento debe también ser resistente a las roturas, las cuales se producen por la falta de flexibilidad o por los esfuerzos de contracción a bajas temperaturas.

2.12 Mezclas asfálticas tibias

Las mezclas asfálticas tibias son un tipo de mezcla asfáltica que requiere temperaturas de producción más bajas en comparación con las mezclas asfálticas en caliente, el objetivo de las mezclas tibias es mantener las mismas propiedades mecánicas de una mezcla en caliente, como la resistencia a la humedad y a la deformación permanente. (Delgado Alamilla, 2015).

2.13 Viscosidad

Se define como la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a los rozamientos internos que ocurren en el seno del fluido. La viscosidad reducida permite al agregado ser totalmente cubierto a una temperatura inferior a la que tradicionalmente se requiere en las mezclas de producción en caliente. Debido a la viscosidad reducida, los procesos de las mezclas tibias pueden funcionar como una ayuda en la compactación y algunos beneficios relacionados con este son mencionados a menudo en relación con este tipo de mezclas.

2.14 Aditivos

Según Escobar & Tunala(2019), los aditivos son productos que mejoran el enlace químico entre el asfalto y el agregado, así como el desempeño de la mezcla asfáltica. Los aditivos de este tipo son productos tensoactivos. Los tensoactivos inciden superficialmente sobre las propiedades del sistema. Este tipo de moléculas se caracterizan por tener dos partes bien definidas: una parte afín al asfalto, formada por la cadena hidrocarbonatada y una parte afín al agua formada por grupos funcionales polares.

2.14.1 Aditivos orgánicos

El objetivo de este tipo de aditivos es reducir la viscosidad del bitumen. Los aditivos orgánicos son usualmente ceras o grasas amidas, y pueden ser añadidos o bien a la mezcla o al aglomerante. Un aditivo orgánico comúnmente usado es una cera parafinada especial producida por la conversión del gas natural.

2.14.2 Aditivos químicos

Los aditivos químicos son considerados surfactantes, estos trabajan de manera microscópica en los agregados y el ligante asfáltico. Las temperaturas de compactación pueden ser reducidas entre 20 °C a 40 °C mediante el uso de aditivos químicos.

2.14.3 Zycotherm

Es un aditivo químico de color amarillo pálido a base de organosilanos a escala nanométrica y su función principal es brindar mejoras en la adherencia de agregado-asfalto proporcionando una mayor duración del concreto asfáltico a temperaturas bajas, al tiempo que mejora los procesos de fabricación, extendido y compactado a menores temperaturas (mezclas tibias).

Vera & Rojas (2018) afirman que: con la adición de Zycotherm, debido a la menor tensión superficial del asfalto, el agregado se recubre mejor. Esto resulta en un mejor embebido y saturación de los microporos de la superficie del agregado. Teniendo esta mejora en la adherencia entre árido - ligante, la susceptibilidad a la humedad reduce, lo que implica menos segregación y baches.

Figura 3. Aditivo químico Zycotherm



Fuente: Zydex, Zycotherm

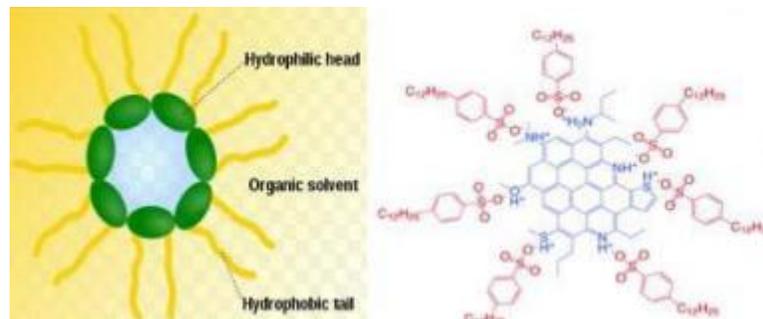
Según la secuencia de fabricación, el aditivo Zycotherm presenta diferencias funcionales en su comportamiento:

Fase 1:

En la base de ligante (Antes del mezclado): Micelación de asfáltenos La composición genérica del betún se divide en dos tipos diferentes de compuestos: Los máltenos, que son fundamentalmente carentes de polaridad. Los asfáltenos, que son compuestos polares.

De acuerdo con Vera & Rojas (2018): La molécula de Zycotherm tiene una parte orgánica extremadamente compatible con los máltenos y una parte polar. Al añadir Zycotherm en el betún, se produce una micelación de los asfáltenos, que quedan recubiertos por los organosilanos. Cuando se micelan los asfáltenos, se reduce la atracción entre los mismos y se mejora la trabajabilidad del betún que antes estaba limitada por la atracción polar entre los asfáltenos. Esto repercute en una mayor fluidez y facilidad de recubrimiento incluso a bajas temperaturas debido a que los asfáltenos pueden moverse más libremente entre las resinas.

Figura 4. Esquema proceso reducción de atracción entre asfáltenos



Fuente: Zydex, Zycotherm

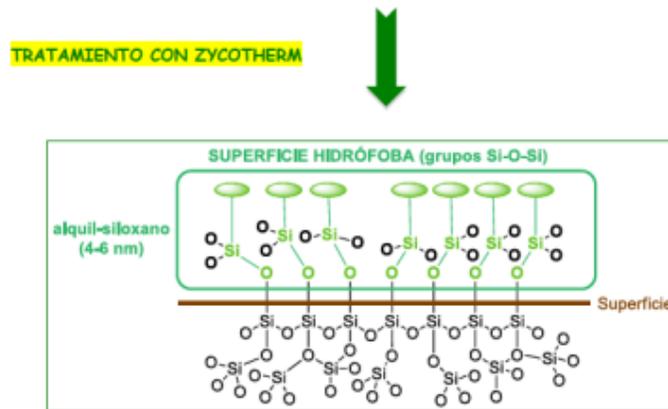
Fase 2:

En el contacto con el árido. Vera & Rojas (2018) afirman que: Zycotherm reacciona a nivel molecular con la superficie de los áridos, formando enlaces de tipo siloxano (Si-O-Si), de elevada fortaleza. Esto provoca una modificación de los áridos, convirtiéndolos en superficies hidrófobas y mejorando por ello su adhesividad al betún. Mediante la acción de Zycotherm, la unión árido betún se produce a nivel químico, y por lo tanto permanente,

mejorándose así la resistencia del pavimento a los agentes degradantes habituales (agua, viento, agentes químicos).

Según Zydex (2014): La capa hidrófoba que cubre a los áridos los convierte en superficies apolares, lo que explica su compatibilidad con los betunes y asfaltos. Esto aporta en su adhesividad, generando uniones árido – betún entre 10 a 20 veces mayores que si no se adicionara aditivo. Este efecto conocido como efecto cáscara de Naranja a cáscara de manzana, es precisamente lo que explica el cambio del pelado del recubrimiento de bitumen de un agregado al pasar de una superficie polar a una apolar.

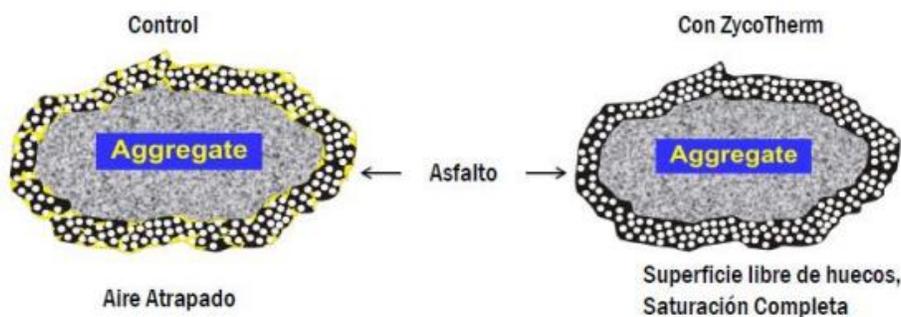
Figura 5. Esquema, superficie árido, hidrófila a hidrófoba con uso de Zycotherm



Fuente: Zydex, Zycotherm

Vera & Rojas (2018) afirman que: Con la adición de Zycotherm, debido a la menor tensión superficial del asfalto, el agregado se recubre mejor. Esto resulta en un mejor embebido y saturación de los microporos de la superficie del agregado. Teniendo esta mejora en la adherencia entra árido - ligante, la susceptibilidad a la humedad reduce, lo que implica menos segregación y baches.

Figura 6. Adherencia agregado – asfalto con zycotherm



Fuente: Zydex, Zycotherm

2.15 Beneficios del uso de aditivos

2.15.1 Reducción del uso de combustible

Debido a la menor temperatura de producción, es evidente la reducción del combustible utilizado para llevar a cabo el proceso de mezclado. Sin embargo, no existen valores exactos en cuanto a la reducción de combustibles debido a que son muchos los factores los que intervienen en la fabricación de una mezcla asfáltica.

2.15.2 Beneficios hacia los trabajadores

La menor temperatura de mezclado y pavimentado minimiza las emisiones de humo y olor y crea un ambiente de trabajo más frío para los trabajadores. Adicionalmente a la reducción de exposición de los trabajadores a las emisiones, las temperaturas de mezclas también proporcionan un ambiente de trabajo más confortable, esto podría adicionar en una menor rotación del personal.

2.15.3 Mayores distancias de transporte

Al poder mezclar y compactar a menores temperaturas, se puede tener una mayor distancia de transporte de la mezcla y ésta, a la hora de compactar, no presentaría dificultades. El uso de Zycotherm permite que a bajas temperaturas la mezcla siga siendo trabajable y conserve sus propiedades físicas, como si se tratase de una mezcla asfáltica caliente (Vera & Rojas, 2018).

2.15.4 Mejor limpieza de equipos

Al modificar la composición química del asfalto, los asfaltenos son más libres de moverse en las resinas, por lo que en los equipos de mezclado y de compactación, el asfalto se

adhiera menos, lo que implica que su limpieza sea más fácil que en mezclas que no utilicen el aditivo (Vera & Rojas, 2018).

2.16 Propiedades que se benefician de una mezcla combinada

De acuerdo con Cornejo & Lamiña (2018): “Una mezcla combinada se puede presentar al añadirse cualquier tipo de material a una mezcla convencional. Esta adición se lo realiza con la única finalidad de mejorar las características reológicas y mecánicas del ligante”.

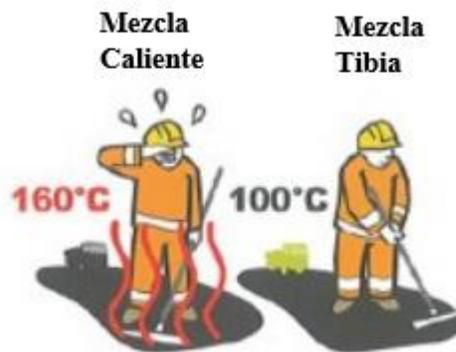
Por otra parte, determina que: al agregar un polímero al asfalto convencional se logra aumentar la rigidez a altas temperaturas evitando de esta manera deformaciones permanentes. Se reduce la rigidez a bajas temperaturas, previniendo que el asfalto colocado se fisure. Mejorar la adhesión de agregados pétreos y aumentar la viscosidad a bajas velocidades de corte.

2.16.1 Consumo de energía

El beneficio más importante de las mezclas asfálticas tibias es la reducción del consumo de energía y es considerado como uno de los principales beneficios.

Los estudios han demostrado que la reducción del consumo de energía es de alrededor de un 30% el cual se puede lograr mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto. La reducción en el consumo de energía reduce a su vez el costo de la producción de la mezcla.

Figura 7. Ambiente trabajo de mezclas caliente y tibia



Fuente: Programa de Infraestructura del Transporte

2.17 Método Marshall

El Método de Dosificación Marshall desarrollado por el Ing. Bruce Marshall, inicialmente fue utilizado por el cuerpo de ingenieros del ejército norteamericano, actualmente es el método más utilizado para la elaboración de fórmulas de mezcla.

El criterio para conseguir una mezcla satisfactoria está basado en requisitos mínimos de estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos. Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas preparadas en caliente, utilizando el equipo Marshall, determina características físicas de las mezclas y analiza los parámetros que definen el contenido óptimo de asfalto. La estabilidad se determina empleando el principio de corte en compresión semiconfinada, sometiendo a la muestra a esfuerzos de compresión diametral a una temperatura de 60 °C. La aplicación de esfuerzos y la rotura de las muestras se consiguen con un dispositivo especialmente proyectado para las pruebas de estabilidad. El valor de estabilidad representa la resistencia estructural de la mezcla compactada y está afectada principalmente por el contenido de asfalto, la composición granulométrica y el tipo de agregado. El valor de estabilidad es un índice de la calidad del agregado. Además, la mezcla debe tener la fluidez necesaria para que pueda compactarse a la densidad exigida y producir una textura superficial adecuada. El valor del Flujo representa la deformación producida en el sentido del diámetro del espécimen antes de que se produzca su fractura. Este valor es un indicador de la tendencia para alcanzar una condición plástica y consecuentemente de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica a deformarse bajo la acción de las cargas que por ella transiten.(UMSS, 2008).

2.18 Criterios a considerar en una mezcla asfáltica

Establecer los criterios a considerar de acuerdo a las especificaciones técnicas:

- Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla total.
- Porcentaje de vacíos llenados con asfalto.
- Porcentaje mínimo de vacíos de aire en agregado mineral.
- Valor de la estabilidad.
- Valor de fluencia.

Estos criterios se deben ajustar a los valores de proyecto, correspondientes al nivel de tráfico establecido (liviano, mediano y pesado).

2.19 Procedimiento del ensayo

Dentro de la metodología Marshall existen tres procedimientos a seguir:

- Determinación de la gravedad específica total.
- Análisis de la densidad y el contenido de vacíos.
- Determinación de la estabilidad y fluencia de Marshall.

2.19.1 Determinación de la gravedad específica total

Este ensayo se puede realizar una vez que se haya enfriado el espécimen de acuerdo a la norma ASTM D-2726, peso específico empleando de mezclas asfálticas compactadas, o bajo la norma ASTM D-1188, peso específico empleando parafina en mezclas asfálticas compactadas. En este caso, como no se cuenta con la parafina se realizará el primer procedimiento señalado. Normalmente, para saber que normativa se debe emplear es necesario ejecutar pruebas de absorción, y si este es mayor al 2 % se empleará la norma ASTM D-1188, y si no es el caso, se empleará la norma ASTM D-2726 (Pincay Bermello, 2018).

2.19.2 Análisis de la densidad y el contenido de vacíos

Una vez fabricadas las briquetas, y que estas han alcanzado la temperatura ambiente, es necesario determinar la gravedad específica neta de la briqueta, la cual influye en los valores de vacíos.

Es conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima de al menos dos contenidos de asfalto conforme la norma ASTM D-2041, preferiblemente de aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. De estos dos valores se debe definir un promedio y determinar el valor de la gravedad específica efectiva total del agregado (G_{se}) (Pincay Bermello, 2018).

Utilizando el promedio de las gravedades específicas netas de las mezclas compactadas, la gravedad específica efectiva total del agregado, la gravedad específica del asfalto, y los diferentes porcentajes de asfalto usados, se determina el porcentaje de vacíos (V_a); el porcentaje de vacíos llenados con asfalto (V.F.A) y el porcentaje de vacíos del agregado mineral (V.M.A) (Garnica Anguas, 2004).

2.19.3 Determinación de la estabilidad y flujo Marshall

El ensayo de estabilidad se ejecuta con el fin de medir la resistencia a la deformación de la mezcla y se expresa en unidades de fuerza (lb o kg). El valor del flujo es la deformación que va a sufrir la muestra al medir su estabilidad, se expresa en unidades de 0,25 mm o en unidades de 0,01 in (Pincay Bermello, 2018).

El proceso se realiza conforme a la norma ASTM D-1559.

Después de determinar la gravedad específica, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo, primero es necesario sumergir el espécimen en baño María a 60°C durante 30 a 40 minutos antes de la prueba. Una vez que todo el equipo esté listo, se debe remover el espécimen de prueba del baño María y se seca cuidadosamente la superficie del mismo, se coloca y se centra en la mordaza inferior, posteriormente se coloca la mordaza superior y se centrará completamente el aparato de carga.

Con todo esto listo se comienza a aplicar la carga al espécimen a una deformación constante de 50 mm por minuto hasta que ocurra la falla, la carga máxima obtenida está definida por el punto de falla y este valor se deberá registrar como el valor de estabilidad de Marshall.

Mientras se realiza la prueba de estabilidad, un deformímetro debe medir el flujo del espécimen, cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el flujo del espécimen (Garnica Anguas, 2004).

2.20 Marco normativo

Las normas que se utilizaran son las siguientes:

Tabla 3. Marco normativo cemento asfáltico

Cemento asfáltico		
Ensayos	Norma ASTM	Norma AASHTO
Penetración	D-5	T-49
Punto de inflamación	D-1310	T-79
Ductilidad	D-113	T-51
Peso específico	D-71	T-229
Punto de ablandamiento	D-36	T-53

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Marco normativo agregado grueso y fino

Agregado grueso y fino		
Ensayos	Norma ASTM	Norma AASHTO
Granulometría	C-136	T-27
Desgaste mediante la máquina de los ángeles	C-131	T-96
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	C-127	T-85
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	C-128	T-84
Equivalente de arena	D-2419	T-176
Porcentaje de caras fracturadas	D-5821	-
Determinación de partículas largas y achatadas	D-4791	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Criterio de diseño método Marshall

Criterio de mezclas método Marshall	Tráfico pesado	
	Mínimo	Máximo
Compactación N° golpes/cara	75	
Estabilidad, lb(N)	1800 (8000)	
Flujo 0,01 in (0,25mm)	8	16
Vacíos de aire %	3	5
V.A.M. (Vacío agregado mineral)	13	-

Fuente: Elaboración propia

2.21 Marco referencial

EL trabajo de investigación se influenció en libros, tesis mencionando los siguientes:

Cornejo Villacís, D. A., & Lamiña Asumasa, J. C. (2018). *Caracterización de Mezclas Asfálticas en Caliente, mediante la incorporación de material triturado de productos reciclados de tereftalato de polietileno (pet), utilizando los agregados de la mina del río Pita en la ciudad de Quito*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Delgado H., Garnica P. (2016). *Caracterización Mecánica de una mezcla tibia con aditivo Químico*. México D.F, México: Instituto mexicano de transporte.

Garnica Anguas P. (2005) *Caracterización Geomecánica de Mezclas asfálticas*. México D.F, México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte.

Montejo A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Bogotá D.C, Colombia: Universidad Católica de Colombia.

Pincay Bermello J, Zúñiga Suarez, A. R., & Córdova Rizo, F. J. (2018). *Análisis comparativo entre la aplicación de Metodología Marshall y Ramcodes como alternativa para la obtención del contenido óptimo de asfalto para el diseño de mezclas asfálticas*. Grupo Compas.

Ulloa Calderón A. (2011). *Mezclas asfálticas tibias (WMA)*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del transporte.

U.M.S.S. *Manual completo de diseño de pavimentos*. Cochabamba, Bolivia: Facultad de Ciencias y Tecnología.

Vera, J., & Rojas, J. (2018) *Comportamiento Físico – Mecánico de una Mezcla Asfáltica Convencional y una Polimerizada con la Adición de un Aditivo Líquido mejorado con nanotecnología (zycotherm)*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

2.22 Análisis del aporte teórico

La investigación de comparación de optimización de mezclas asfálticas densa caliente y mezclas asfálticas densa tibia necesita respaldo teórico fidedigno para poder realizar las comparaciones de estabilidad y fluencia así de tal manera con el marco teórico y normativas establecidas de mezclas asfálticas donde se debe cumplir rangos de especificaciones técnicas de máximos y mínimos en los distintos ensayos para elaborar las mezclas de la investigación por lo tanto el marco teórico tributa rangos específicos importantes para tener mezclas asfálticas normadas por lo tanto el trabajo de investigación se fundamenta en base a la teoría propuesta ya que la información obtenida y mencionada es fundamental para realizar la investigación y su correcta aplicación. A través del enfoque comparar, optimizar se realizará ventajas y desventajas de las mezclas asfálticas densa tibia y caliente, su relevancia influirá en la obtención de diferente tipo de muestra. Apoyado en las investigaciones y normas previamente establecidas.

CAPÍTULO III

CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Criterios de diseño metodológico

3.1.1 Unidad de muestra

Ensayos de laboratorio de Asfaltos.

3.1.2 Población

Todos los ensayos de laboratorio.

3.1.3 Muestra

Caracterización de los agregados:

- Granulometría de áridos
- Desgaste de los ángeles
- Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos
- Peso específico y absorción de agua en agregados finos
- Equivalente de arena
- Porcentaje de cara fracturada
- Determinación de cara chata y alargada

Caracterización del cemento asfáltico:

- Penetración
- Peso específico
- Punto de ablandamiento
- Punto de inflamación
- Ductilidad

Propiedades mecánicas:

- Estabilidad
- Fluencia
- Densidad máxima
- % de Vacíos de aire
- % de Vacíos de V.A.M. (vacíos de agregado mineral)
- % de Vacíos de R.B.V. (relación betún vacíos)

3.2 Tamaño de la muestra

3.2.1 Nivel de confianza

Tabla 6. Nivel de confianza

Nivel de confianza %	Valor del nivel de confianza Z
50	0,574
80	1,280
85	1,444
90	1,640
95	1,960
99	2,680

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Tamaño de muestra

$$n = \frac{\sum Ni * \sigma^2}{Ni * \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum Ni * \sigma^2}{N}} \quad \sigma^2 = (0,10 - 0,15)$$

$$n = \frac{21,900}{146 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \left(\frac{21,900}{146}\right)} \quad \sigma^2 = (0,15)$$

$$n = 100 \text{ Ensayos}$$

$$e = 0,05 \%$$

Tabla 7. Planilla de muestreo

Ensayos	Cantidad (Ni)	σ^2	$Ni*\sigma^2$	fi	ni	Valor adop.
Caracterización de los agregados pétreos						
Granulometría de áridos	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
Desgaste de los ángeles	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
Equivalente de arena	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
Porcentaje de cara fracturada	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
Determinación de cara chata y alargada	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
	28		4,200		17,073	21
Caracterización del cemento asfáltico						
Penetración	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
Peso específico	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
Punto de ablandamiento	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
Punto de inflamación	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
Ductilidad	4	0,150	0,600	0,024	2,439	3
	20		3,000		9,756	15
Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas						
Estabilidad	20	0,150	3,000	0,122	12,195	15
Fluencia	20	0,150	3,000	0,122	12,195	15
% de Vacíos de aire	20	0,150	3,000	0,122	12,195	15
% de Vacíos de V.A.M. (vacíos de agregado mineral)	20	0,150	3,000	0,122	12,195	15
% de vacíos de R.B.V.(relación betún vacíos)	20	0,150	3,000	0,122	12,195	15
Densidad	20	0,150	3,000	0,122	12,195	15
Totales	168		24,600		100,000	126

Fuente: Elaboración propia

El Tamaño de la muestra total será de: 126 ensayos.

3.3 Localización de obtención de agregados

Los agregados pétreos utilizados fueron proporcionados por la alcaldía municipal de la ciudad de Tarija y la provincia Cercado los cuales son procedentes de la chancadora Garzón de la comunidad San Mateo, municipio de Cercado, departamento de Tarija-Bolivia, la cual tiene una gran cantidad de áridos. La comunidad San Mateo se encuentra a 5 kilómetros de la ciudad de Tarija con ubicación geográfica de 318568,00 E y 7624720,00 S, esta comunidad se dedica mayormente a la agricultura, la chancadora Garzón se encuentra a la orilla del río.

Figura 8. Ubicación de la chancadora Garzón



Fuente: Google earth

3.4 Localización de obtención del cemento asfáltico

El cemento asfáltico utilizado fue proporcionado por la alcaldía municipal de la ciudad de Tarija y la provincia Cercado con las características de ser un asfalto C.A 85-100 de procedencia colombiana. Utilizado para la pavimentación de las calles de la ciudad de Tarija. La planta de calentamiento del cemento asfáltico se encuentra ubicado en la ciudad de Tarija, provincia Cercado zona barrio El Carmen a 319713,95 E y 7618550,46 S.

Figura 9. Ubicación de la posta municipal de la provincia Cercado



Fuente: Google earth

3.5 Caracterización de los agregados pétreos

3.5.1 Ensayo de granulometría (ASTM C-136)

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

Figura 10. Ensayo granulometría



Fuente: Elaboración propia

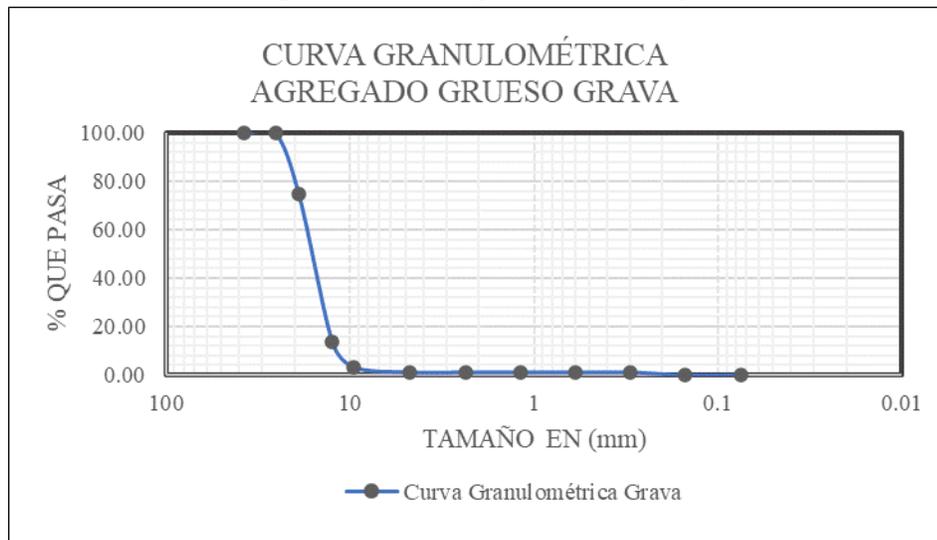
Resultados de la práctica

Tabla 8. Granulometría agregado grueso grava

Peso total (gr) =		5000			
Tamices	Tamaño(mm)	Peso ret. (gr)	Ret. acumulado		% Que pasa del total
			(gr)	(%)	
1 ½"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
¾"	19,00	1255,00	1255,00	25,10	74,90
½"	12,50	3057,00	4312,00	86,24	13,76
3/8"	9,50	527,10	4839,10	96,78	3,22
N°4	4,75	100,90	4940,00	98,80	1,20
Base	-	60,00	5000,00	100,00	0,00
	Suma	5000,00			
	Perdidas	0,00			
	MF	7,15			

Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Curva granulométrica grava



Fuente: Elaboración propia

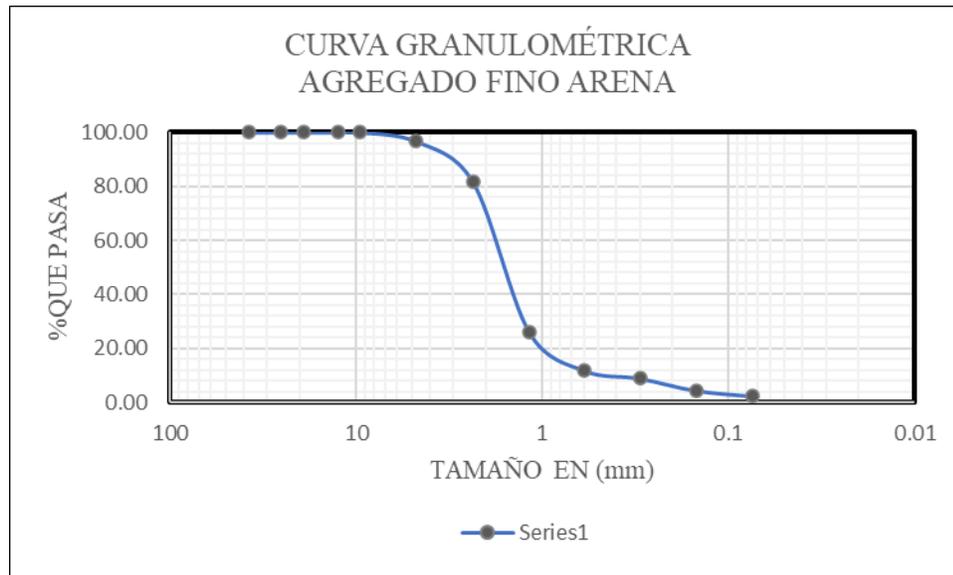
Resultados de la práctica

Tabla 9. Granulometría agregado grueso gravilla

Peso total (gr) =		5000			
Tamices	Tamaño(mm)	Peso ret. (gr)	Ret. acumulado		% Que pasa del total
			(gr)	(%)	
1 ½"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
¾"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
½"	12,50	6,90	6,90	0,14	99,86
3/8"	9,50	318,80	325,70	6,51	93,49
N°4	4,75	4027,80	4353,50	87,07	12,93
Base	-	646,50	5000,00	100,00	0,00
	Suma	5000,00			
	Perdidas	0,00			
	MF	5,90			

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Curva granulométrica arena



Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Ensayo de peso específico en agregados gruesos (ASTM C-127)

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. Para este ensayo se realizó la medición del peso específico para la grava 3/4" y para la gravilla 3/8". La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100° - 110°C. Después se lo sumerge en agua, se seca la muestra del agua y se secan partículas redondas sobre un paño a continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturación con superficie seca (S.S.S.)

A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergido en el agua, a la temperatura de 25°C de temperatura ambiente. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-85 y ASTM C-127.

Figura 14. Lavar y dejar saturar con agua por 24 hr



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Secado superficialmente seco de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Determinación del peso de la muestra sumergido



Fuente: Elaboración propia

Cálculos agregado grueso grava

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{\text{peso de muestra seca}}{\text{peso de la muestra S. S. S.} - \text{peso de la muestra sumergida en agua}}$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{4941 \text{ gr}}{5000 \text{ gr} - 3373 \text{ gr}}$$

$$\text{Peso específico a granel} = 3,04 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico S. S. S.} = \frac{\text{peso de la muestra S. S. S.}}{\text{peso de la muestra S. S. S.} - \text{peso de la muestra sumergida en agua}}$$

$$\text{Peso específico S.S.S.} = \frac{5000 \text{ gr}}{5000 \text{ gr} - 3373 \text{ gr}}$$

$$\text{Peso específico S.S.S.} = 3,07 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico sumergido} = \frac{\text{peso de la muestra seca}}{\text{peso de la muestra seca.} - \text{peso de la muestra sumergida en agua}}$$

$$\text{Peso específico sumergido} = \frac{4941 \text{ gr}}{4941 \text{ gr} - 3373 \text{ gr}}$$

$$\text{Peso específico sumergido} = 3,15 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ absorción} = \frac{\text{peso de la muestra S. S. S.} - \text{peso de la muestra seca}}{\text{peso de la muestra seca} * 100}$$

$$\% \text{ absorción} = \frac{5000 \text{ gr} - 4941 \text{ gr}}{4941 \text{ gr} * 100}$$

$$\% \text{ absorción} = 1,19 \text{ gr/cm}^3$$

Se realizará los mismos cálculos para la gravilla

Determinado el promedio de los 3 ensayos realizados

Resultados de la practica

Tabla 11. Resultados del peso específico de la grava

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "B" (gr)	Peso muestra sat. dentro del agua "c" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico S.S.S. (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de Abs.
1	4951,00	5000,00	3103,00	2,61	2,64	2,68	0,99
2	4954,00	5000,00	3094,00	2,60	2,62	2,66	0,93
3	4956,00	5000,00	3108,00	2,62	2,64	2,68	0,89
			Promedio	2,61	2,63	2,67	0,94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Resultados del peso específico de la gravilla

Muestra N°	Peso muestra secada "a" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "b" (gr)	Peso muestra sat. dentro del agua "c" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico s.s.s. (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de abs.
1	4944,10	5000,00	3051,00	2,54	2,57	2,61	1,13
2	4948,40	5000,00	3062,00	2,55	2,58	2,62	1,04
3	4945,20	5000,00	3067,00	2,56	2,59	2,63	1,11
			Promedio	2,55	2,57	2,62	1,09

Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Ensayo de peso específico en agregados finos (ASTM C-128)

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso. El peso específico aparente es la relación entre el peso del agua correspondiente a su volumen aparente, este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos finos.

Figura 17. Lavar y dejar saturar la muestra con agua por 24 hr



Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Secado superficial y verificación de la condición S.S.S



Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Colocado de material en un matraz de 500gr, llenar de agua y pesar



Fuente: Elaboración propia

Figura 20. Sacar la muestra del matraz y dejar secar en horno, luego pesar



Fuente: Elaboración propia

Cálculos agregado fino arena

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{\text{peso de muestra seca}}{(\text{peso de la muestra S. S. S.}) - (\text{agua agregada al matraz})}$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{489,9 \text{ gr}}{500 \text{ gr} - 289,2 \text{ gr}}$$

$$\text{Peso específico a granel} = 2,32 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico S. S. S} = \frac{\text{peso de muestra S. S. S}}{(\text{peso de la muestra S. S. S.}) - (\text{agua agregada al matraz})}$$

$$\text{Peso específico S.S.S.} = \frac{500 \text{ gr}}{500 \text{ gr} - 289,2 \text{ gr}}$$

$$\text{Peso específico S.S.S.} = 2,37 \text{ gr/cm}^3.$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{\text{peso de muestra seca}}{(\text{Peso de la muestra S. S. S.} - \text{agua agregada matraz}) - (\text{Peso de la muestra S. S. S.} - \text{peso de muestra seca})}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{489,9 \text{ gr}}{(500 - 289,2) - (500 - 489,9)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,44 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ absorción} = \frac{(\text{Peso de la muestra S. S. S} - \text{peso de la muestra seca}) * 100}{\text{peso de la muestra S. S. S}}$$

$$\% \text{ absorción} = \frac{(500 - 489,9) * 100}{500 \text{ gr}}$$

$$\% \text{ absorción} = 2,02 \text{ gr/cm}^3$$

Resultados de la práctica

Tabla 13. Resultados del peso específico de la arena

N°	Peso muestra (gr)	Peso matraz (gr)	Muestra + matraz + agua (gr)	Agua agr. al matraz "w" (ml) ó (gr)	Peso muestra secada "a" (gr)	Vol. de matraz "v" (ml)	P. E. a granel (gr/cm ³)	P. E. sat. con sup. seca (gr/cm ³)	P. E. aparente (gr/cm ³)	% de abs.
1	500,00	183,50	992,70	309,20	489,90	500,00	2,57	2,62	2,71	2,02
2	500,00	186,00	993,40	307,40	489,60	500,00	2,54	2,60	2,69	2,08
3	500,00	182,80	979,40	296,60	489,10	500,00	2,40	2,46	2,54	2,18
Prom.							2,50	2,56	2,65	2,09

Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Ensayo desgaste de la máquina de los ángeles (ASTM C-131)

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y de degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento. Debido a las condiciones de esfuerzo-deformación, la carga de la rueda es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante. Por esta razón los agregados que están en, o de la superficie, como son los materiales de base y carpetas asfálticas, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores, sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de cargas del tránsito. Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los ángeles, ASTM C-131 ó AASTHO T-96, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión. Los aparatos y

procedimiento para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-96 y ASTM C-131.

Tabla 14. Pesos del agregado grueso y N° de esferas

Tabla ASTM C-131 según el tamaño de material que se tenga					
Método		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		30	15	15	15

Fuente: Norma ASTM C-131

Figura 21. Máquina de desgaste de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Lavar y secar en el horno antes de llevar a la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Introduciendo material y las esferas a la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Figura 24. Retirando material y las esferas de la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Tamizar el material por tamiz N°12 para luego secar en horno y pesar



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

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

Tabla 15. Resultados de desgaste de los ángeles (grava)

Material	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
B "Grava"	5000,00	3879,90	22,40	40% Max

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Resultados de desgaste de los ángeles (gravilla)

Material	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
C "Gravilla"	5000,00	3778,60	24,43	40% Max

Fuente: Elaboración propia

3.5.5 Ensayo porcentaje de caras fracturadas (ASTM D-5821)

Este ensayo se realiza para determinar el porcentaje de peso de la muestra que se utilizó del agregado en las diferentes caras fracturadas. Se realiza la separación de todas las muestras y se pesó cada muestra para hallar los porcentajes.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos ASTM D-5821.

$$\% \text{ de caras fracturadas} = \frac{\text{suma de \% de caras fracturadas}}{\text{muestra de ensayo del material}}$$

Resultados de la práctica

Para la grava

Tabla 17. Resultados del % de caras fracturadas (grava)

Tamiz		A	B	C	D	E
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	(gr)	(gr)	(B/A) *100	(%)	(C*D)
1 1/2"	1"	2000,00	1860,00	93,00	40,00	3720,00
1"	3/4"	1500,00	1325,00	88,33	40,00	3533,33
3/4"	1/2"	1200,00	800,00	66,67	30,00	2000,00
1/2"	3/8"	300,00	180,00	60,00	24,00	1440,00
Total		5000,00	4165,00	308,00	134,00	10693,33

Porcentaje de caras fracturadas =	79,80	%
-----------------------------------	-------	---

Fuente: Elaboración propia

Para la gravilla

Tabla 18. Resultados del % de caras fracturadas (gravilla)

Tamiz		A	B	C	D	E
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	(gr)	(gr)	(B/A) *100	(%)	(C*D)
1 1/2"	1"	2000,00	1800,00	90,00	40,00	3600,00
1"	3/4"	1500,00	1100,00	73,33	40,00	2933,33
3/4"	1/2"	1200,00	856,00	71,33	30,00	2140,00
1/2"	3/8"	300,00	190,00	63,33	24,00	1520,00
Total		5000,00	3946,00	298,00	134,00	10193,33

Porcentaje de caras fracturadas =	76,07	%
-----------------------------------	-------	---

Fuente: Elaboración propia

3.5.6 Ensayo partículas planas y alargadas (ASTM D-4791)

Este ensayo describe el procedimiento para la determinación de los porcentajes de los agregados. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos ASTM D-4791.

Figura 26. Seleccionando material aplanado con el calibrador de aplanamiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Seleccionando material alargado con el calibrador de alargamiento



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica índice de aplanamiento

Para la grava

Tabla 19. Resultados del índice de aplanamiento (grava)

Tamiz	Peso retenido (gr) (Ri)	% Retenido	Peso de partículas que pasa (gr) (mi)	Índice de aplanamiento % (ILi)
1 1/2" - 1"	0,00	0,00	0,00	-
1" - 3/4"	1364,00	27,29	288,40	21,14
3/4" - 1/2"	3149,30	63,00	512,20	16,26
1/2" - 3/8"	444,10	8,88	97,40	21,93
3/8" - 1/4"	41,50	0,83	0,40	0,96
Base	0,00	0,00	-	-
Peso total	4998,90	100,00	898,40	-

Índice de aplanamiento global % (IL) =	17,97	%
--	-------	---

Fuente: Elaboración propia

Para la gravilla

Tabla 20. Resultados del índice de aplanamiento (gravilla)

Tamiz	Peso retenido (gr) (Ri)	% Retenido	Peso de partículas que pasa (gr) (mi)	Índice de aplanamiento % (ILi)
1 1/2" - 1"	0,00	0,00	0,00	-
1" - 3/4"	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4" - 1/2"	6,70	0,13	3,00	44,78
1/2" - 3/8"	164,00	3,28	66,60	40,61
3/8" - 1/4"	1852,70	37,06	411,50	22,21
Base	976,30	19,53	-	-
Peso total	2999,70	60,01	481,10	-

Índice de aplanamiento global % (IL) =	16,04	%
--	-------	---

Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica índice de alargamiento

Para la grava

Tabla 21. Resultados del índice de alargamiento (grava)

Tamiz	Peso retenido (gr) (Ri)	% Retenido	Peso de partículas retenidas (gr)	Índice de alargamiento % (IAi)
1 1/2" - 1"	0,00	0,00	0,00	-
1" - 3/4"	1364,00	27,29	0,00	0,00
3/4" - 1/2"	3149,30	63,00	238,00	7,56
1/2" - 3/8"	444,10	8,88	16,70	3,76
3/8" - 1/4"	41,50	0,83	30,80	74,22
Base	0,00	0,00	-	-
Peso total	4998,90	100,00	285,50	-

Índice de alargamiento global % (IA) =	5,71	%
--	------	---

Fuente: Elaboración propia

Para la gravilla

Tabla 22. Resultados del índice de alargamiento (gravilla)

Tamiz	Peso retenido (gr) (Ri)	% Retenido	Peso de partículas retenidas (gr)	Índice de alargamiento % (IAi)
1 1/2" - 1"	0,00	0,00	0,00	-
1" - 3/4"	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4" - 1/2"	6,70	0,13	0,00	0,00
1/2" - 3/8"	164,00	3,28	13,50	8,23
3/8" - 1/4"	1852,70	37,06	112,90	6,09
Base	976,30	19,53	-	-
Peso total	2999,70	60,01	126,40	-

Índice de alargamiento global % (IA) =	4,21	%
--	------	---

Fuente: Elaboración propia

3.5.7 Ensayo equivalente de arena en agregado fino (ASTM D-2419)

De acuerdo con la norma ASTM el método de ensayo llamado: equivalente de arena se denomina a todas aquellas partículas de diámetro menor a 0,002mm que se encuentran adheridos al agregado fino. El objetivo de este ensayo es determinar la proporción de finos con características plásticas y polvo de suelo granular. Este ensayo se realiza para los agregados fino; aquella porción pasante del tamiz N° 4 (4,75mm).

Figura 28. Equipo necesario para el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Obtener datos mediante lectura de altura de las probetas



Fuente: Elaboración propia

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{\text{lectura de nivel superior } (H_1)}{\text{lectura de nivel inferior } (H_2)} * 100$$

Resultados de la práctica

Tabla 23. Resultados del porcentaje de equivalente de arena

N° de muestra	H1	H2	Equivalente de arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,70	9,90	97,98
2	8,80	9,30	94,62
3	9,50	9,90	95,96
		Promedio	96,19

Equivalente de arena (%)	Norma
96,19	> 50%

Fuente: Norma ASTM D-2419

3.6 Caracterización del cemento asfáltico

3.6.1 Ensayo de ductilidad (ASTM D-113) (AASHTO T-51)

Este método de prueba describe el procedimiento para determinar la ductilidad de un material de asfalto medido por la distancia a la que se alargará antes de romperse cuando dos extremos de una muestra de briquetas del material se separan a una velocidad especificada y a una temperatura especificada. El ensayo se realizará a una temperatura de $25 \pm 0,5$ ° C y con una velocidad de 5 cm/min. A otras temperaturas, se debe especificar la velocidad.

Figura 30. Vertir cemento asfáltico en moldes, enfriar y colocar en baño maría



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Colocar los moldes en el ductilímetro para luego realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 24. Resultados del ensayo de ductilidad

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom.	Especificaciones	
						Min.	Max.
Ductilidad a 25°C	cm	104	101	107	104	>100	-

Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Ensayo punto de ablandamiento (ASTM D-36) (AASHTO T-53)

También conocido como el ensayo del anillo y bola, el resultado de este ensayo nos permite determinar dos cosas; asegura la uniformidad del asfalto durante su transporte, indicador de su tendencia al flujo en bajas temperaturas.

Figura 32. Colocado de cemento asfáltico en los anillos



Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Colocar anillos en el vaso y hielo alrededor para bajar la temperatura



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 25. Resultados del ensayo punto de ablandamiento

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	48	47	49	48	43	53

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Ensayo de penetración (ASTM D-5) (AASHTO T-49)

La consistencia de un cemento asfáltico se mide mediante el ensayo de penetración durante este ensayo se introduce una aguja de dimensiones específicas en una muestra de cemento asfáltico bajo una carga conocida a una temperatura fija durante un plazo de tiempo predeterminando.

Figura 34. Colocar cemento asfáltico en las muestras



Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Colocar las muestras en baño maría a 25°C por 30min



Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Penetración de las muestras con el penetrómetro



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 26. Resultados del ensayo de penetración

Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C	lectura N°1	0,1 mm	89	92	93	91	85	100
	lectura N°2	0,1 mm	91	90	91			
	lectura N°3	0,1 mm	90	93	94			
	Promedio	0,1 mm	90	92	93			

Fuente: Elaboración propia

3.6.4 Ensayo densidad del asfalto (ASTM D-71) (AASHTO T-229)

La densidad relativa de un material bituminoso se define como la relación entre el peso de un volumen dado de una sustancia a 25°C y el peso de un volumen de agua a la misma temperatura.

Determinar el peso de los picnómetros y registrar el peso y designar a este dato la letra A después llenar los picnómetros con agua destilada para posteriormente sumergir totalmente en un vaso precipitado con agua destilada y dejar en baño maría por 30 minutos para calibrar después transcurrido el tiempo extraer los picnómetros secar superficialmente y pesar para designar con la letra B. Seguidamente verter el cemento asfáltico aproximadamente a $\frac{3}{4}$ del picnómetro y dejar que alcance la temperatura ambiente. Posteriormente pesar los picnómetros más las muestras designadas con la letra C. Después llenar los picnómetros con agua destilada y sumergir en la misma y dejar por 30 minutos para luego secar y pesar y obtener el último dato y designar con la letra D.

$$\rho_b = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} * \rho_w$$

Donde:

A= Peso del picnómetro.

B= Peso del picnómetro + agua.

C= Peso del picnómetro + asfalto.

D= Peso del picnómetro + agua + asfalto.

ρ_w = Peso específico del agua.

ρ_b = Peso específico del asfalto.

Figura 37. Vasos precipitados colocados en baño maría



Fuente: Elaboración propia

Figura 38. Colocado de asfalto en vasos precipitados y pesado



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 27. Resultados del ensayo densidad del asfalto

Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Densidad del Asfalto	Peso Picnómetro	gr	38,2	35,2	32,9	1	1,05
	Peso Picnómetro + agua	gr	82,7	86,1	88,0		
	Peso Picnómetro + muestra	gr	56,2	58,9	58,2		
	Peso Picnómetro + agua + muestra	gr	82,9	86,7	88,5		
	P.E. Cemento Asfáltico	gr/cm ³	1,008	1,023	1,017		
	Promedio	gr/cm ³	1,016				

Fuente: Elaboración propia

3.6.5 Ensayo punto de inflamación (ASTM D-1310) (AASHTO T-79)

El objetivo de esta práctica es determinar el punto de ignición mínimo del asfalto el cual representa las temperaturas críticas por medio de la copa abierta de Cleveland cuando se calienta un asfalto libera vapores que son combustibles el punto de inflamación es la temperatura a la cual puede ser calentado con seguridad un asfalto sin que se provoque la inflamación instantánea de los vapores liberados en presencia de una llana libre. El ensayo es el más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el vaso abierto de Cleveland que consiste en llamar un vaso de bronce con determinado volumen de asfalto y calentarlo con un aumento de temperatura normalizados pasa una llama instantánea sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados el punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes volátiles como para provocar una inflamación. Este ensayo resulta necesario para fines prácticos de seguridad puesto que los resultados que arroja permiten conocer la temperatura a la cual el bitumen podría entrar en combustión.

Figura 39. Muestra en la copa de Cleveland



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 28. Resultados del ensayo punto de inflamación

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de inflamación	°C	270	282	275	276	>232	-

Fuente: Elaboración propia

3.7 Resultados del levantamiento de la información

3.7.1 Resultados de la caracterización de agregados pétreos

Tabla 29. Resultados de la caracterización de los agregados

Ensayo	Agregado	Especificación		Resultado	ASTM
		Mín.	Máx.		
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	Grava	-	-	2,67 gr/cm ³	C-127
	Gravilla	-	-	2,62 gr/cm ³	
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	-	-	2,65 gr/cm ³	C-128
Equivalente de arena	Arena	>50%	-	96,19%	D-2419
Porcentaje de cara fracturada	Grava	75%	-	79,80%	D-5821
	Gravilla	75%	-	76,07%	
Determinación de partículas largas y chatas	Grava	-	10%	5,71%	D-4791
	Gravilla	-	10%	4,21%	
Desgaste mediante máquina de los ángeles	Grava	-	40%	22,40%	C-131
	Gravilla	-	40%	24,43%	

Fuente: Elaboración propia

3.7.2 Resultados de la caracterización del cemento asfáltico

Tabla 30. Resultados de la caracterización del cemento asfáltico

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Prom.	Especificación		
						Mínimo	Máximo	
Peso específico	grs./cm ³	1,008	1,023	1,017	1,016	1	1,05	
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	270	282	275	276	>232	-	
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	104	101	107	104	>100	-	
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0,1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	0,1 mm	89	92	93	91	85	100
	Lectura N°2		91	90	91			
	Lectura N°3		90	93	94			
	Promedio		90	92	93			
Punto de ablandamiento	°C	48	47	49	48	43	53	

Fuente: Elaboración propia

3.8 Diseño de mezclas

3.8.1 Diseño por método Marshall para contenido óptimo de C.A

El siguiente procedimiento será aplicado para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico que será utilizado para el diseño de mezclas asfálticas en caliente este se realizara mediante el método Marshall de acuerdo a la norma (ASTM D-15-59) que es empleado también para proyectos en laboratorio y comprobación en obras de las mezclas que contienen cemento asfáltico y áridos.

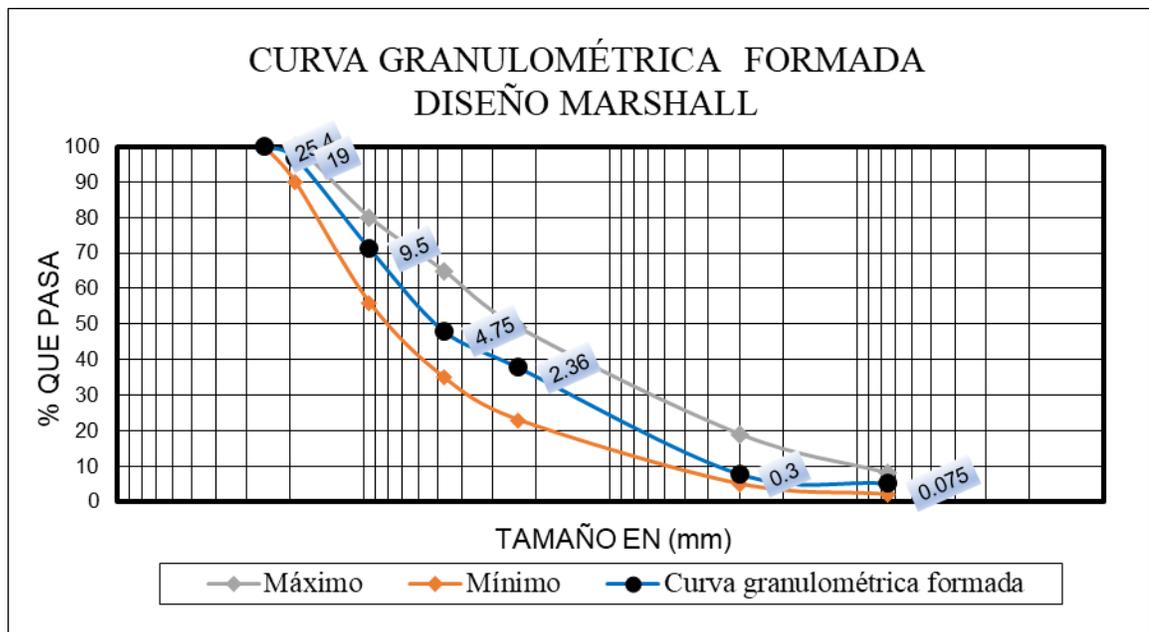
El propósito del método de dosificación Marshall es determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico para una combinación específica de áridos. Se trata de un ensayo mecánico que consiste en romper briquetas cilíndricas compactadas mediante un martillo de peso y altura de caída normalizados.

Tabla 31. Datos de curva granulométrica de dosificación

Tamices	Tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	Filler	Total				Especif.	
		Peso ret. a 5000 gr	Peso ret. a 5000 gr	Peso ret. a 5000 gr	al	al	al	al	Peso ret.	Ret. acum	% Ret	% que pasa del total	Min.	Max.
					0,30	0,27	0,40	0,03	1,00					
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	1255,00	0,00	0,00	376,50	0,00	0,00	0,00	376,50	376,50	7,53	92,47	90	100
1/2"	12,5	3057,00	6,90	0,00	917,10	1,86	0,00	0,00	918,96	1295,46	25,91	74,09	-	-
3/8"	9,5	527,10	318,80	0,00	158,13	86,08	0,00	0,00	244,21	1539,67	30,79	69,21	56	80
Nº4	4,75	100,90	4027,80	169,80	30,27	1087,51	67,92	0,00	1185,70	2725,37	54,51	45,49	35	65
Nº8	2,36	0,00	606,50	751,30	0,00	163,76	300,52	0,00	464,28	3189,64	63,79	36,21	23	49
Nº16	1,18	0,00	0,00	2770,10	0,00	0,00	1108,04	0,00	1108,04	4297,68	85,95	14,05	-	-
Nº30	0,60	0,00	0,00	712,80	0,00	0,00	285,12	0,00	285,12	4582,80	91,66	8,34	-	-
Nº50	0,30	0,00	0,00	148,70	0,00	0,00	59,48	0,00	59,48	4642,28	92,85	7,15	5	19
Nº100	0,15	0,00	0,00	223,70	0,00	0,00	89,48	0,00	89,48	4731,76	94,64	5,36	-	-
Nº200	0,075	0,00	0,00	103,60	0,00	0,00	41,44	0,00	41,44	4773,20	95,46	4,54	2	8
Base	-	60,00	40,00	120,00	18,00	10,80	48,00	150,00	226,80	5000,00	100,00	0,00	-	-
Suma		5000,00	5000,00	5000,00	1500,00	1350,00	2000,00	150,00	5000,00					
Pérdidas		0,00	0,00	0,00										

Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Curva granulométrica diseño Marshall



Fuente: Elaboración propia

3.9 Dosificación de mezcla asfáltica densa caliente

Mezcla asfáltica densa caliente

Tabla 32. Datos dosificación briquetas

de la curva granulométrica	
Grava (%)	30
Gravilla (%)	27
Arena (%)	40
Filler (%)	3

Porcentaje de briqueta (%)	100
Peso total de briqueta (gr)	1200

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. % de cemento asfáltico en la mezcla densa caliente

	% de cemento asfáltico en la mezcla densa caliente				
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
Porcentaje de agregado (%)	95,50	95,00	94,50	94,00	93,50
Peso de cemento asfáltico (gr)	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Grava (gr)	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Gravilla (gr)	309,42	307,80	306,18	304,56	302,94
Arena (gr)	458,40	456,00	453,60	451,20	448,80
Filler (gr)	34,38	34,20	34,02	33,84	33,66
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Dosificación de la mezcla asfáltica

Figura 41. Pesar los agregados las cantidades requeridas



Fuente: Elaboración propia

Figura 42. Mezclar los agregados y cemento asfáltico a temperatura requerida



Fuente: Elaboración propia

Determinación de la densidad

Figura 43. Determinación de altura y peso de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Sumergir las briquetas en agua durante 5 min. a 25°C



Fuente: Elaboración propia

Figura 45. Pesar las briquetas saturadas con superficie seca



Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Pesar las briquetas sumergidas en agua



Fuente: Elaboración propia

Determinación de la estabilidad y fluencia

Figura 47. Colocar las briquetas en baño maría a 60°C por 30 min



Fuente: Elaboración propia

Figura 48. Colocar las briquetas en mordaza y dial de deformación para la fluencia



Fuente: Elaboración propia

Desarrollo de la planilla

A continuación, se realizará un cálculo demostrativo para la briqueta con porcentaje de cemento asfáltico de 4,5%

3.9.1 Identificación

Para el cálculo se tomará en cuenta las briquetas 1, 2, 3 para el correspondiente porcentaje de cemento asfáltico de 4,5% en el documento.

3.9.2 Altura de las briquetas

Tabla 34. Altura de las briquetas

Identificación	Altura briqueta (cm)
1	6,20
2	6,18
3	6,62

Fuente: Elaboración propia

3.9.3 Porcentaje de asfalto

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

$$\text{Base del agregado} = \frac{4,5 * 100}{100 - 4,5}$$

$$\text{Base del agregado} = 4,71\%$$

3.9.4 Peso de briqueta en el aire

Tabla 35. Peso de la briqueta en el aire

Identificación	Peso de la briqueta en el aire (gr)
1	1191,3
2	1122,1
3	1107,6

Fuente: Elaboración propia

3.9.5 Peso de la briqueta saturada superficialmente seco (S.S.S)

Tabla 34. Peso de la briqueta saturada superficialmente seco

Identificación	Peso de la briqueta S.S.S. (gr)
1	1195,3
2	1126,9
3	1111,7

Fuente: Elaboración propia

3.9.6 Peso de la briqueta sumergida en agua

Tabla 36. Peso de la briqueta sumergida en agua

Identificación	Peso de briqueta sumergida en agua (gr)
1	635
2	651
3	649

Fuente: Elaboración propia

3.9.7 Volumen de la briqueta

Vol. de briqueta = peso briqueta S. S. S. – Peso briqueta sumergida

$$\text{Vol. de briqueta} = 1195,3 - 635$$

$$\text{Vol. de Briqueta} = 560,3 \text{ c. c.}$$

3.9.8 Densidad de la briqueta

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{peso de la briqueta en aire}}{\text{volumen de la briqueta}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1191,3}{560,3}$$

$$\text{Densidad real} = 2,13\text{gr/cm}^3$$

3.9.9 Densidad máxima teórica de la briqueta

$$\text{Densidad max. t} = \frac{100}{\left(\frac{\% \text{ asfalto}}{\text{peso esp. asfalto}} + \frac{100 - \% \text{ asfalto}}{\text{peso esp. total}}\right)}$$

$$\text{Densidad max. t} = \frac{100}{\left(\frac{4,5}{1,016} + \left(\frac{100 - 4,5}{2,65}\right)\right)}$$

$$\text{Densidad max. t} = 2,47\text{gr/cm}^3$$

3.9.10 Porcentaje de vacíos

$$V_v = \left(\frac{\text{densidad max. t} - \text{densidad prom.}}{\text{densidad max. t}}\right) * 100$$

$$V_v = \left(\frac{2,47 - 2,29}{2,47}\right) * 100$$

$$V_v = 7,11\%$$

3.9.11 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (V.A.M)

$$\text{V.A. M} = \left(\frac{\% \text{ de asfalto} * \text{densidad prom.}}{\text{peso específico de asfalto}}\right) + \% \text{ de vacíos}$$

$$\text{V.A. M} = \left(\frac{4,5 * 2,29}{1,016}\right) + 7,11$$

$$\text{V.A. M} = 17,27\%$$

3.9.12 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (R.B.V)

$$R. B. V = \left(\frac{V.A.M - V_v}{V.A.M} \right) * 100$$

$$R. B. V = \left(\frac{17,27 - 7,11}{17,27} \right) * 100$$

$$R. B. V = 58,80\%$$

3.9.13 Resultados de Estabilidad y fluencia

Tabla 37. Resultados de estabilidad y fluencia Marshall

Identificación	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01")
1	1487	12
2	1513	10
3	1597	9

Fuente: Elaboración propia

3.10 Resultado del diseño de la mezcla asfáltica densa caliente

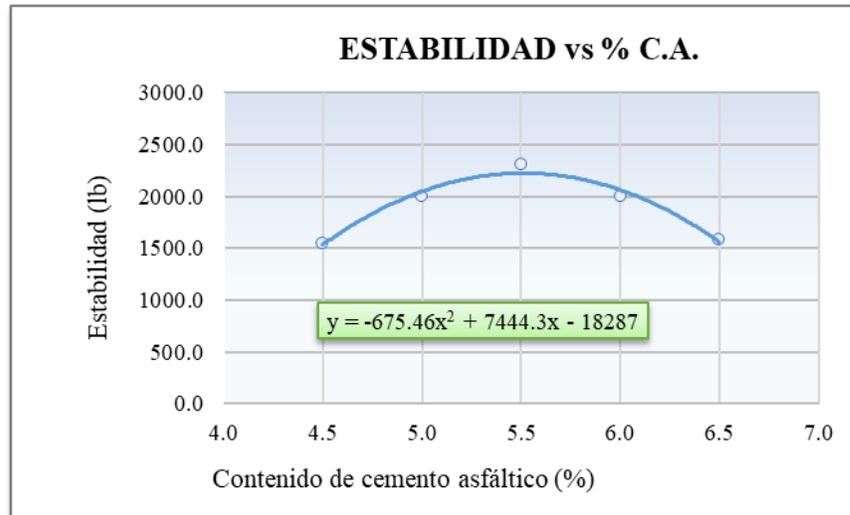
Tabla 38. Resultado del ensayo Marshall para determinar el contenido óptimo

Contenido de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01in)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,29	1543,60	10,33	7,11	58,80	17,27
5,0	2,34	2001,38	10,33	4,67	71,11	16,16
5,5	2,35	2307,76	11,67	3,38	79,00	16,10
6,0	2,33	1997,09	13,33	3,34	80,51	17,12
6,5	2,29	1581,34	15,00	4,57	76,20	19,20
X	5,48	5,51	4,32	5,05	5,82	5,27
Y máx.	2,35	2224,06	10,15	4,17	81,35	15,99

Fuente: Elaboración propia

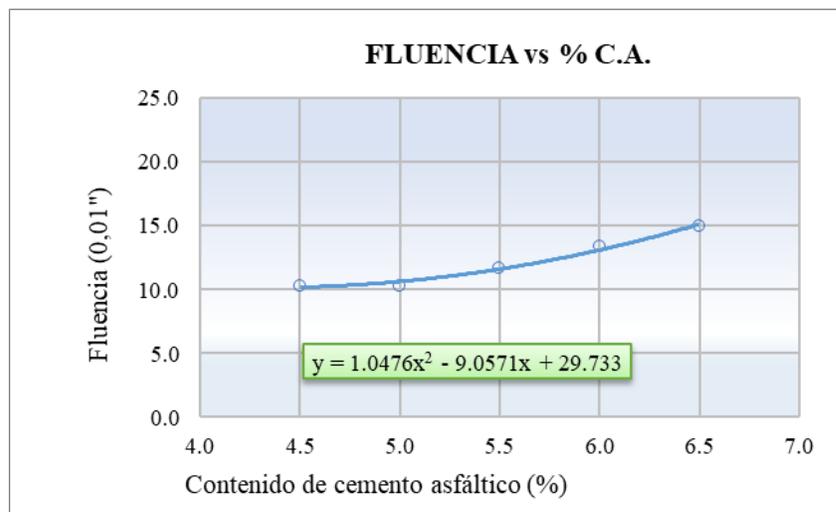
Se procede a dibujar las curvas correspondientes a cada relación

Figura 49. Estabilidad corregida vs. % de cemento asfáltico



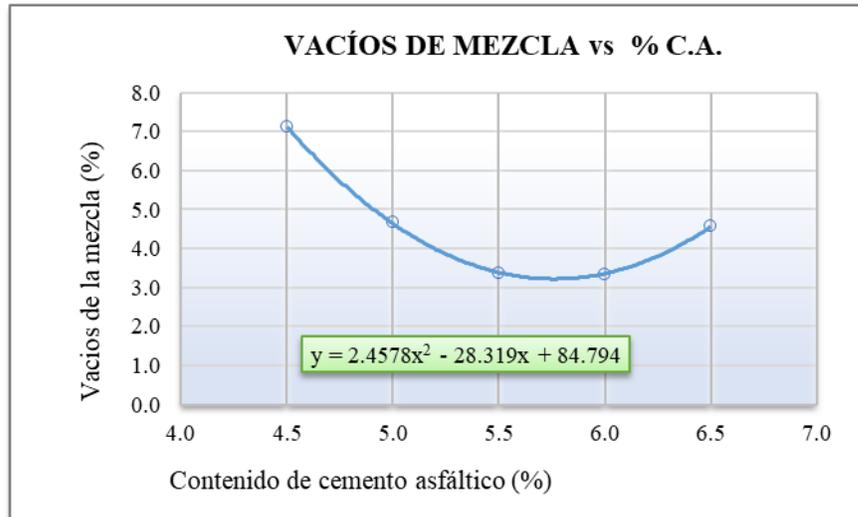
Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Fluencia vs. % de cemento asfáltico



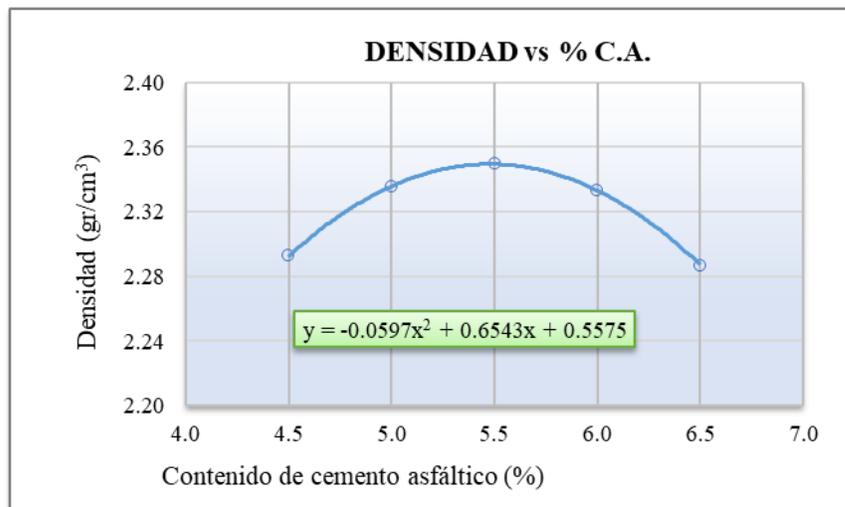
Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Vacíos en aire de la mezcla vs. % de cemento asfáltico



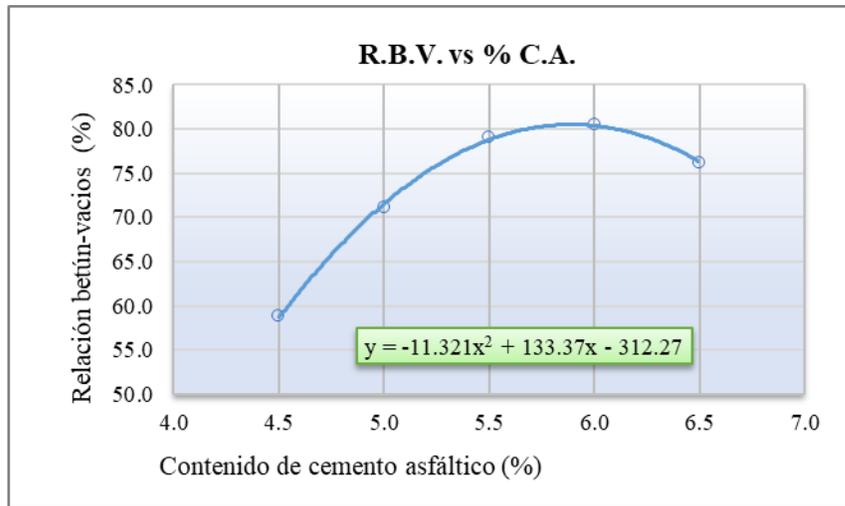
Fuente: Elaboración propia

Figura 52. Densidad de la briqueta vs. % de cemento asfáltico



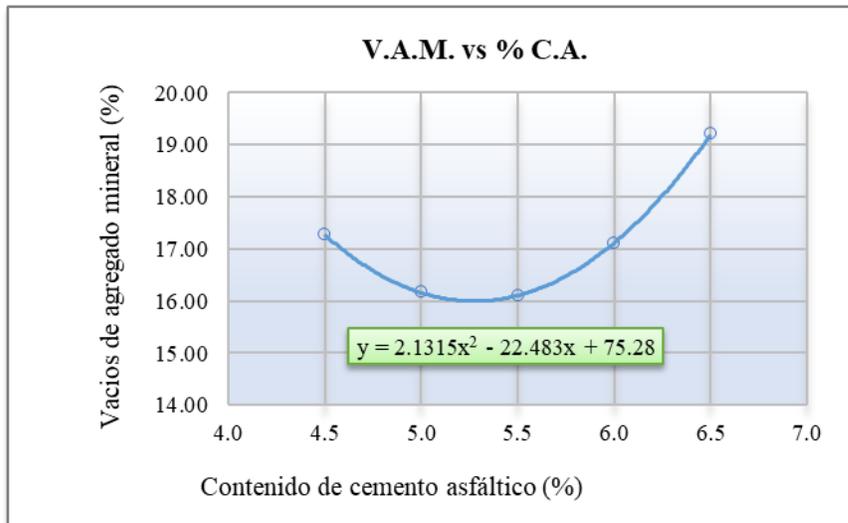
Fuente: Elaboración propia

Figura 53. Relación betún vacíos vs. % de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Figura 54. Vacíos de agregado mineral vs. % de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Ensayo	Valor de diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (lb)	2224,06	5,51
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,35	5,48
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,05
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio =	5,35

Fuente: Elaboración propia

3.11 Elaboración de briquetas con el óptimo de cemento asfáltico

Luego de realizar el cálculo del porcentaje de cemento asfáltico que es igual a 5,35% se procede a realizar nuevamente el pesado de las muestras manteniendo la combinación de agregados y cemento asfáltico para la respectiva comparación tanto para las mezclas asfálticas densa caliente y para las mezclas asfálticas densa tibia en las cuales se procederá a realizar 24 briquetas (12 briquetas para cada mezcla) utilizando diferentes temperaturas de producción.

3.12 Briquetas con diseño de mezcla asfáltica densa caliente

Tabla 40. Datos de dosificación de briquetas en caliente

de la curva granulométrica	
Grava (%)	30
Gravilla (%)	27
Arena (%)	40
Filler (%)	3

Porcentaje de briqueta (%)	100
Peso total de briqueta (gr)	1200

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. % óptimo de cemento asfáltico en la mezcla densa caliente

	Porcentaje óptimo de cemento asfáltico en la mezcla densa caliente
	5,35%
Porcentaje de agregado (%)	94,65
Peso del cemento asfáltico (gr)	64,20
Peso de grava (gr)	340,74
Peso de gravilla (gr)	306,67
Peso de arena (gr)	454,32
Peso de filler (gr)	34,07
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Resultados de estabilidad y fluencia para las mezclas densa caliente

N° de probeta	Altura de probeta	% de asfalto		Temperatura	Peso briqueta			Estabilidad Marshall	Fluencia
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Estabilidad real corregida	Fluencia real
N°	cm	%	%	°C	grs.	grs.	grs.	libras	0,01 pulg
1	6,53	5,35	5,65	145	1193,9	1200,2	682	2359,42	14
2	6,54				1176,5	1183,2	684	2454,96	15
3	6,48				1150,5	1159,5	686	2207,28	13
4	6,37	5,35	5,65	150	1172,3	1177,8	682	2326,29	13
5	6,55				1165,2	1173,1	684	2185,89	12
6	6,58				1173,9	1182,8	678	2137,34	12
7	6,67	5,35	5,65	155	1189,9	1198,9	692	2146,77	10
8	6,65				1196,3	1203,0	699	2148,00	11
9	6,41				1193,0	1196,2	685	2260,47	10
10	6,80	5,35	5,65	160	1168,9	1180,5	671	1941,24	8
11	6,53				1202,1	1205,7	699	2055,55	9
12	6,63				1208,6	1221,4	709	2038,08	9

Fuente: Elaboración propia

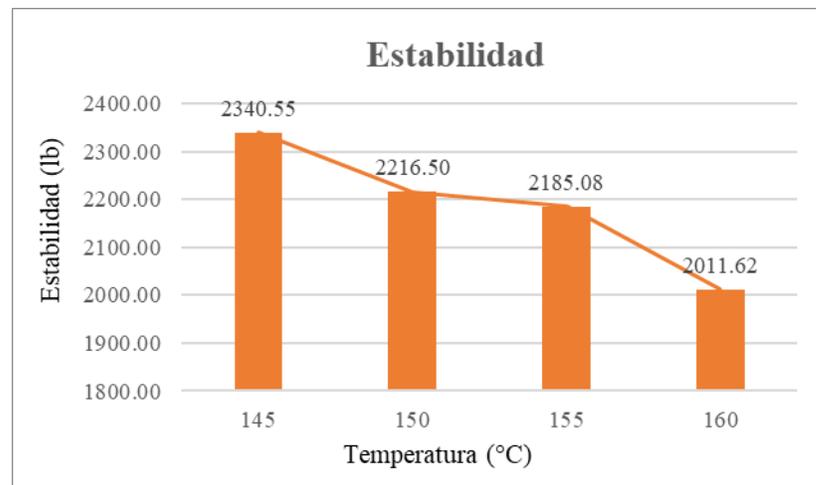
Tabla 43. Resumen dosificación de mezclas asfálticas densa caliente

Contenido de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libras)	Fluencia (0,01in)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
Promedio	2,35	2188,44	11,33	3,43	78,35	15,82

Fuente: Elaboración propia

3.13 Análisis de las propiedades de la mezcla asfáltica densa caliente

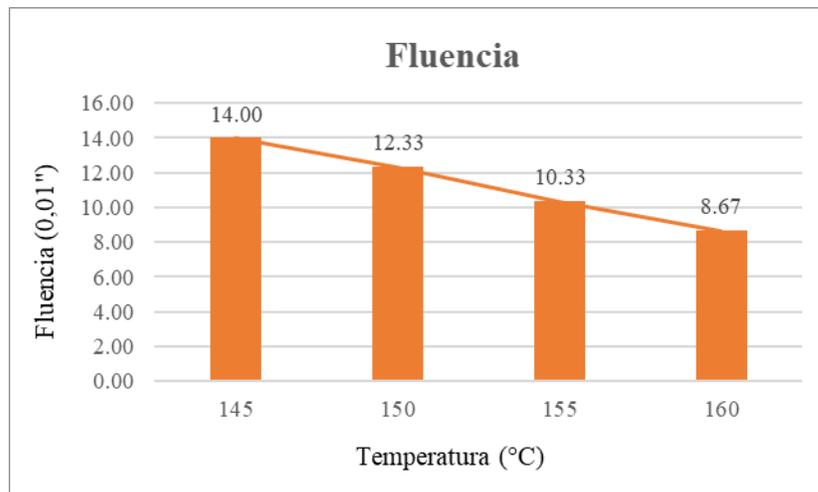
Gráfico 2. Propiedad de estabilidad en mezcla densa caliente



Fuente: Elaboración propia

A medida que aumenta la temperatura, la estabilidad de Marshall disminuye debido a la disminución de la viscosidad del asfalto y la mayor facilidad de deformación de la mezcla asfáltica.

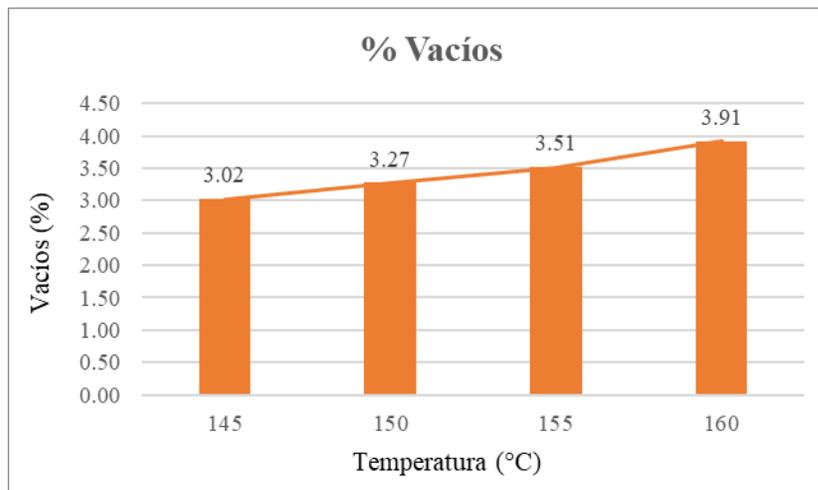
Gráfico 3. Propiedad de fluencia en mezcla densa caliente



Fuente: Elaboración propia

La fluencia de Marshall disminuye a medida que aumenta la temperatura debido a que el asfalto reduce su viscosidad.

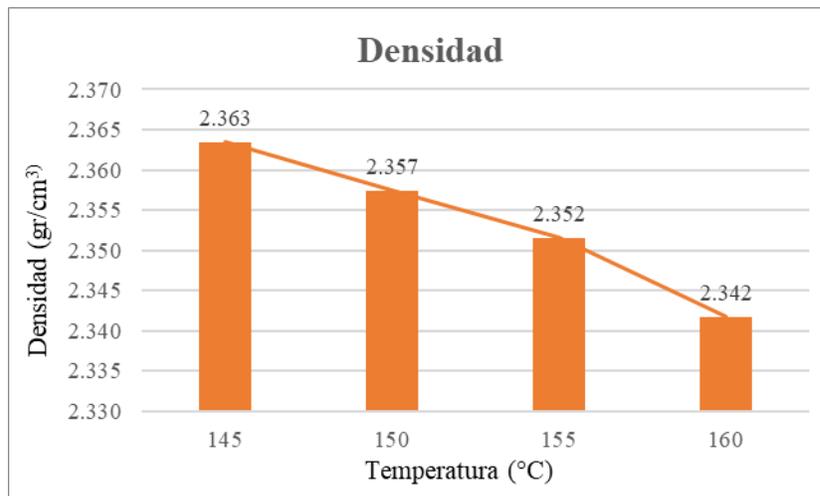
Gráfico 4. Propiedad de vacíos en mezcla densa caliente



Fuente: Elaboración propia

A medida que aumenta la temperatura, el porcentaje de vacíos de Marshall aumenta, lo que indica que la compactación del asfalto es menor y, por lo tanto, su resistencia también reduce.

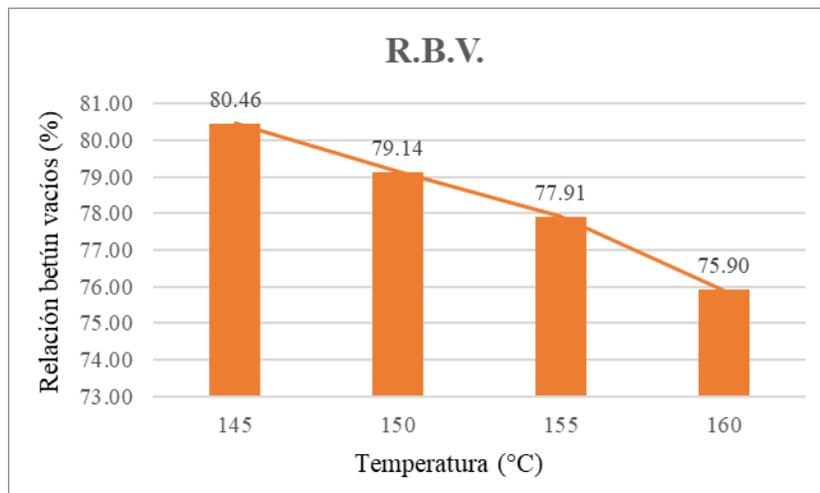
Gráfico 5. Propiedad de densidad en mezcla densa caliente



Fuente: Elaboración propia

La densidad de Marshall disminuye a medida que aumenta la temperatura debido a que el asfalto se ablanda y se expande, lo que reduce la cantidad de material que puede caber en el mismo volumen.

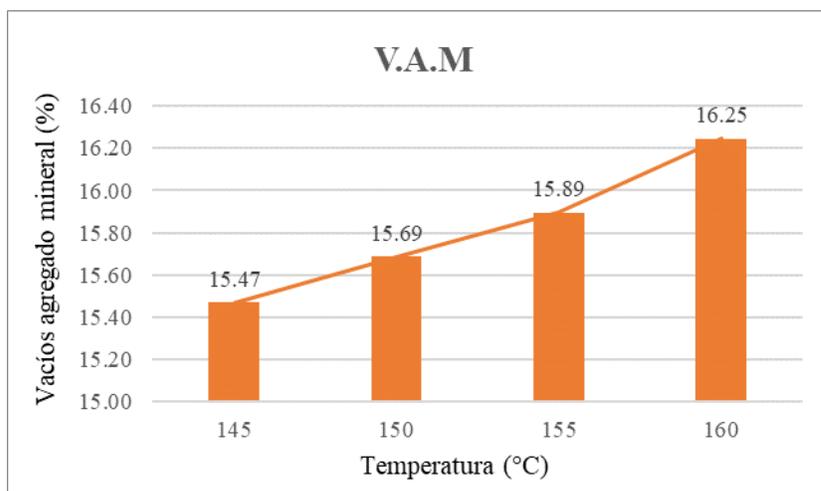
Gráfico 6. Propiedad de R.B.V. en mezcla densa caliente



Fuente: Elaboración propia

A medida que aumenta la temperatura, la propiedad de residuo de betún por vacíos (R.B.V) de Marshall disminuye debido a la volatilización del betún.

Gráfico 7. Propiedad de V.A.M. en mezcla densa caliente



Fuente: Elaboración propia

A medida que aumenta la temperatura, la propiedad de vacíos de agregado mineral (V.A.M) de Marshall aumenta, lo que indica un aumento de rigidez del asfalto.

3.14 Briquetas con diseño de mezcla asfáltica densa tibia

Tabla 44. Datos de dosificación de briquetas tibias

de la curva granulométrica	
Grava (%)	30
Gravilla (%)	27
Arena (%)	40
Filler (%)	3

Porcentaje de briqueta (%)	100
Peso total de briqueta (gr)	1200

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. % óptimo de cemento asfáltico en la mezcla densa tibia

	Porcentaje óptimo de cemento asfáltico en la mezcla densa tibia
	5,35%
Porcentaje de agregado (%)	94,65
Peso del cemento asfáltico (gr)	64,20
Peso de grava (gr)	340,74
Peso de gravilla (gr)	306,67
Peso de arena (gr)	454,32
Peso de filler (gr)	34,07
Peso del aditivo Zycotherm (gr)	7,00
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46. Resultados de estabilidad y fluencia para las mezclas densa tibia

N° de probeta	Altura de probeta	% de asfalto		Temperatura	Peso briqueta			Estabilidad Marshall	Fluencia
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Estabilidad real corregida	Fluencia real
N°	cm	%	%	°C	grs.	grs.	grs.	libras	0,01 pulg
1	6.27	5.35	5.65	110	1165.9	1169.3	659	2208.37	11
2	6.15				1105.1	1108.5	647	2269.85	12
3	6.20				1155.0	1157.3	676	2263.47	12
4	6.43	5.35	5.65	120	1178.9	1183.8	683	2016.77	12
5	6.29				1169.3	1172.8	675	2153.78	9
6	6.30				1156.6	1160.4	667	2210.16	10
7	6.53	5.35	5.65	130	1199.3	1202.8	685	2047.82	10
8	6.30				1180.5	1182.6	689	2030.12	9
9	6.41				1176.8	1181.0	675	1942.18	10
10	6.43	5.35	5.65	140	1192.5	1203.0	695	1805.65	9
11	6.47				1187.2	1202.1	690	1883.87	8
12	6.45				1190.8	1202.8	695	1833.20	8

Fuente: Elaboración propia

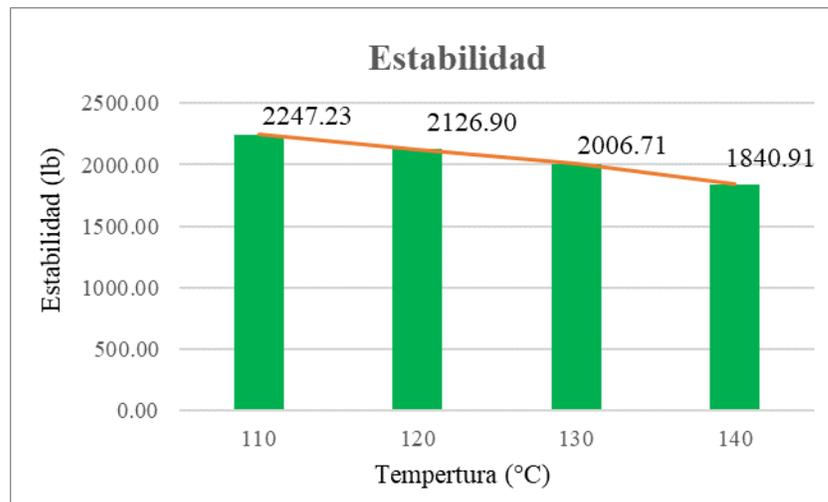
Tabla 47. Resumen dosificación de mezclas asfálticas densa tibia

Contenido de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libras)	Fluencia (0,01in)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
Promedio	2.35	2055.44	10.00	3.67	77.15	16.03

Fuente: Elaboración propia

3.15 Análisis de las propiedades de la mezcla asfáltica densa tibia

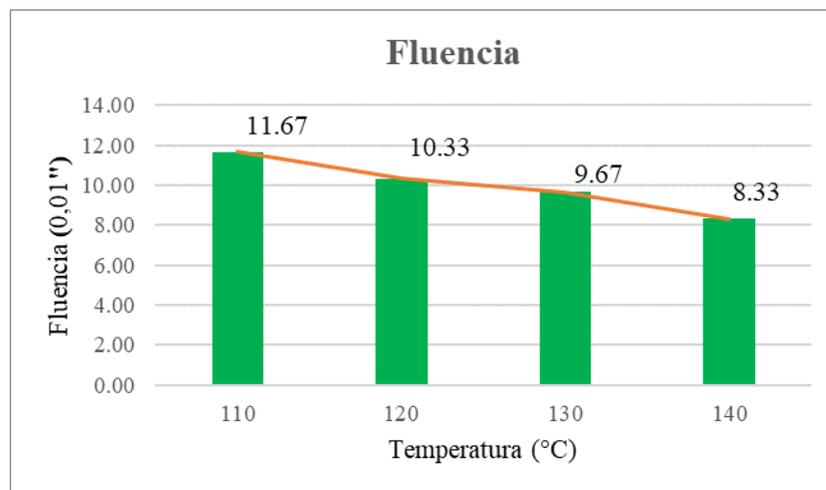
Gráfico 8. Propiedad de estabilidad en mezcla densa tibia



Fuente: Elaboración propia

A medida que aumenta la temperatura, la estabilidad de Marshall disminuye debido a la disminución de la viscosidad del asfalto y la mayor facilidad de deformación de la mezcla asfáltica.

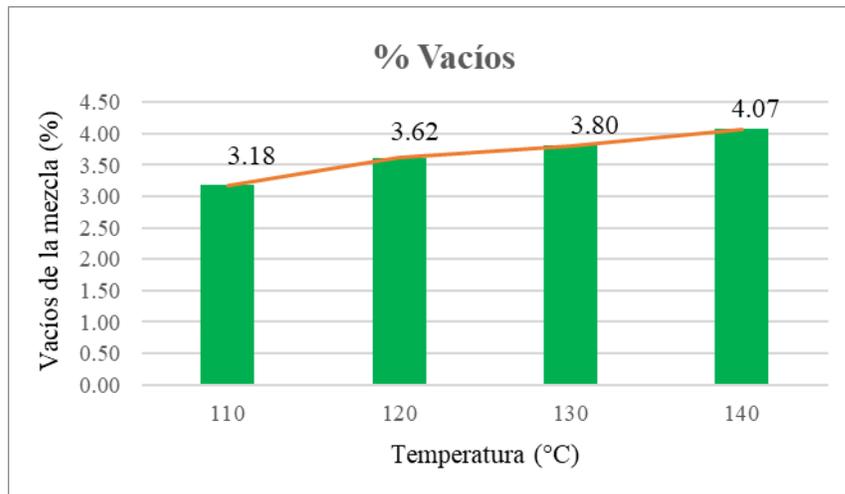
Gráfico 9. Propiedad de fluencia en mezcla densa tibia



Fuente: Elaboración propia

La fluencia de Marshall disminuye a medida que aumenta la temperatura debido a que el asfalto reduce su viscosidad.

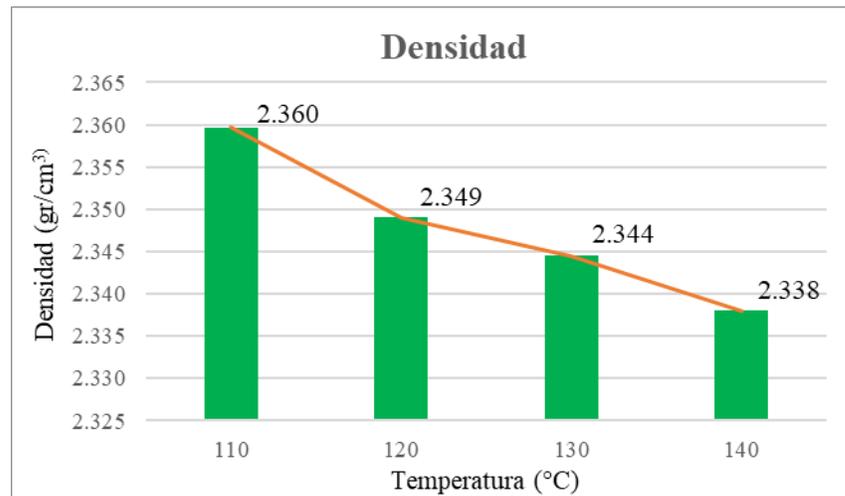
Gráfico 10. Propiedad de vacíos en mezcla densa tibia



Fuente: Elaboración propia

A medida que aumenta la temperatura, el porcentaje de vacíos de Marshall aumenta, lo que indica que la compactación del asfalto es menor y por lo tanto, su resistencia también reduce.

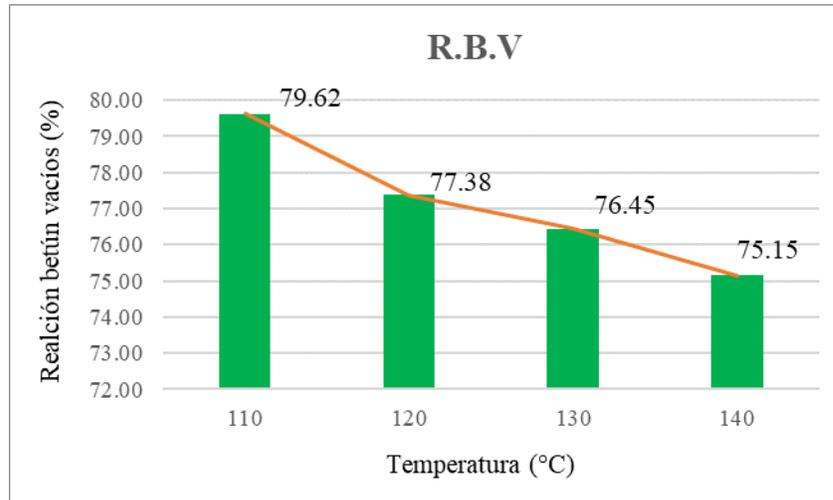
Gráfico 11. Propiedad de densidad en mezcla densa tibia



Fuente: Elaboración propia

La densidad de Marshall disminuye a medida que aumenta la temperatura debido a que el asfalto se ablanda y se expande, lo que reduce la cantidad de material que puede caber en el mismo volumen.

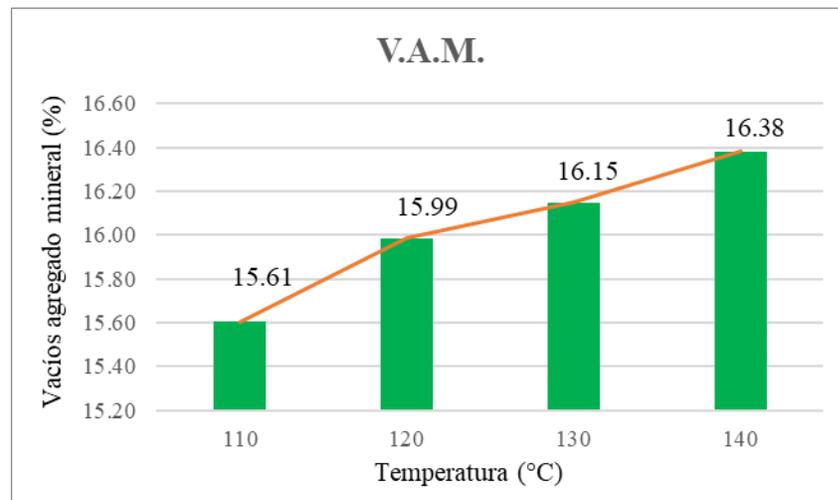
Gráfico 12. Propiedad de R.B.V. en mezcla densa tibia



Fuente: Elaboración propia

A medida que aumenta la temperatura, la propiedad de residuo de betún por vacío (R.B.V) de Marshall disminuye debido a la volatilización del betún.

Gráfico 13. Propiedad de V.A.M. en mezcla densa tibia

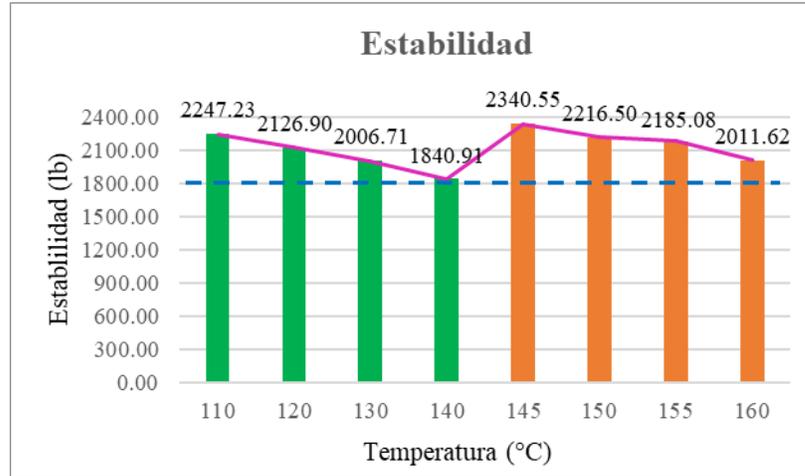


Fuente: Elaboración propia

A medida que aumenta la temperatura, la propiedad de vacíos de agregado mineral (V.A.M) de Marshall aumenta, lo que indica un aumento de rigidez del asfalto.

3.16 Análisis de temperatura en mezclas densa tibia y caliente

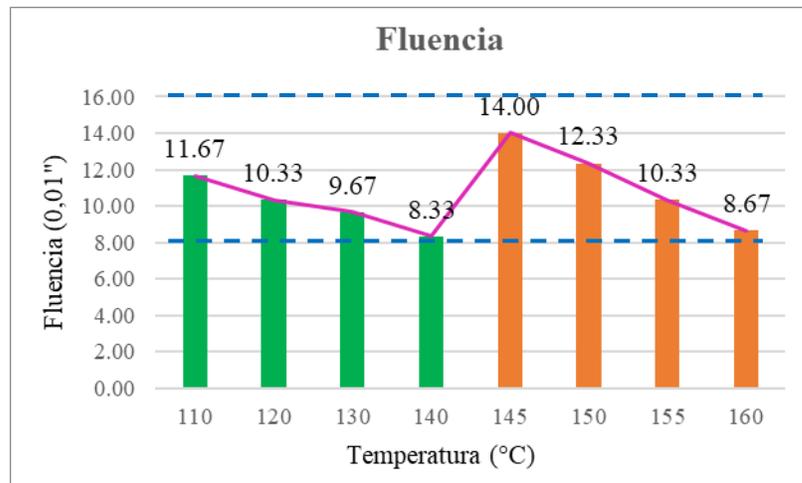
Gráfico 14. Propiedad de estabilidad en mezclas densa tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el siguiente gráfico de barras se muestra como la mezcla densa tibia tiene características muy similares en estabilidad, demostrando que la mezcla densa tibia tiene propiedades mecánicas en estabilidad muy parecidas a la mezcla densa caliente.

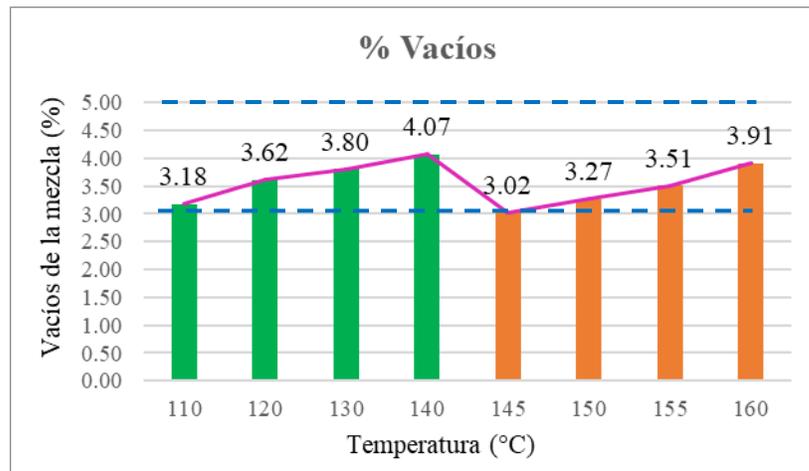
Gráfico 15. Propiedad de fluencia en mezclas densa tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el siguiente gráfico de barras se muestra como la mezcla densa tibia tiene características muy similares en fluencia demostrando que la mezcla densa tibia tiene propiedades mecánicas en fluencia muy parecidas a la mezcla densa caliente.

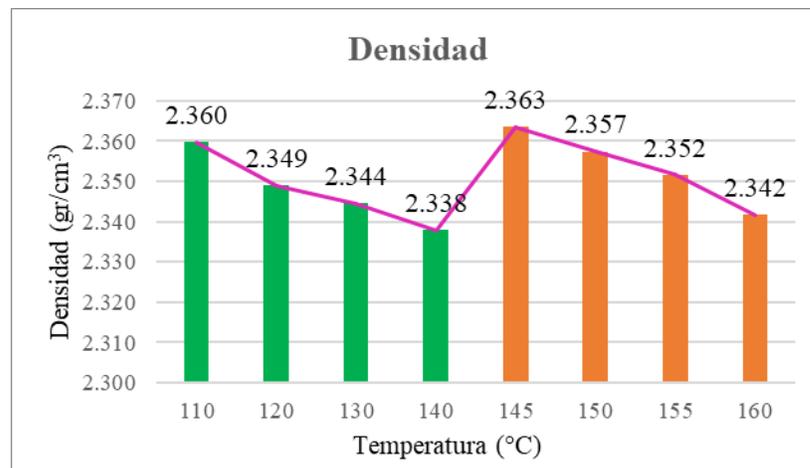
Gráfico 16. Propiedad de vacíos en mezclas densa tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el siguiente gráfico de barras se muestra como la mezcla densa tibia tiene características muy similares en su propiedad de vacíos de la mezcla demostrando que la mezcla densa tibia tiene propiedades mecánicas muy parecidas a la mezcla densa caliente.

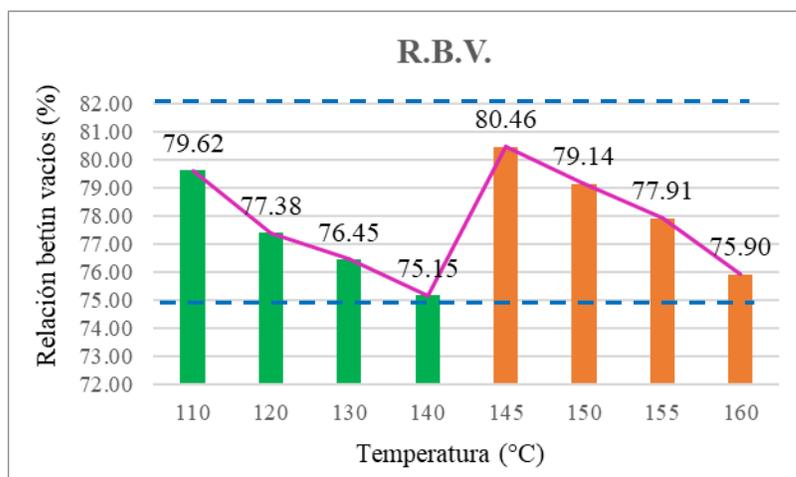
Gráfico 17. Propiedad de densidad en mezclas densa tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el siguiente gráfico de barras se muestra como la mezcla densa tibia tiene características muy similares en densidad demostrando que la mezcla densa tibia tiene propiedades mecánicas muy parecidas a la mezcla densa caliente.

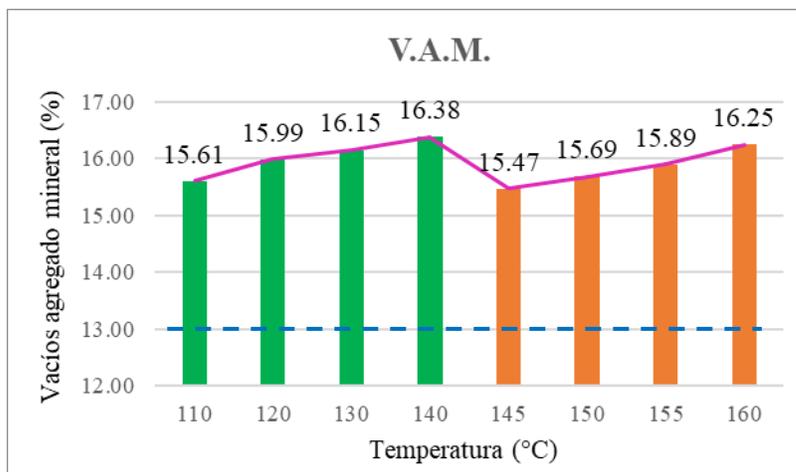
Gráfico 18. Propiedad de R.B.V. en mezclas densa tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el siguiente gráfico de barras se muestra como la mezcla densa tibia tiene características muy similares en su propiedad de R.B.V. demostrando que la mezcla densa tibia tiene propiedades mecánicas muy parecidas a la mezcla densa caliente.

Gráfico 19. Propiedad de V.A.M. en mezclas densa tibia y caliente

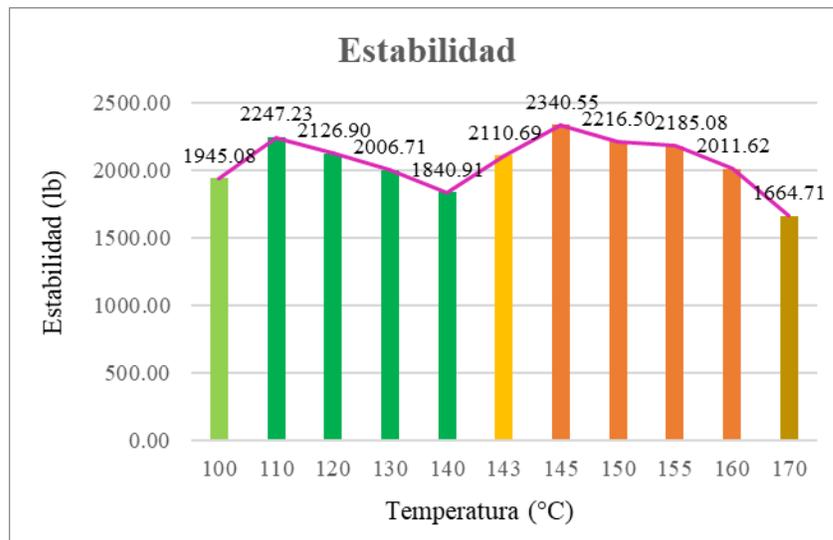


Fuente: Elaboración propia

En el siguiente gráfico de barras se muestra como la mezcla densa tibia tiene características muy similares en su propiedad de V.A.M. demostrando que la mezcla densa tibia tiene propiedades mecánicas muy parecidas a la mezcla densa caliente.

3.17 Análisis en extremos de temperatura en mezclas densa tibia y caliente

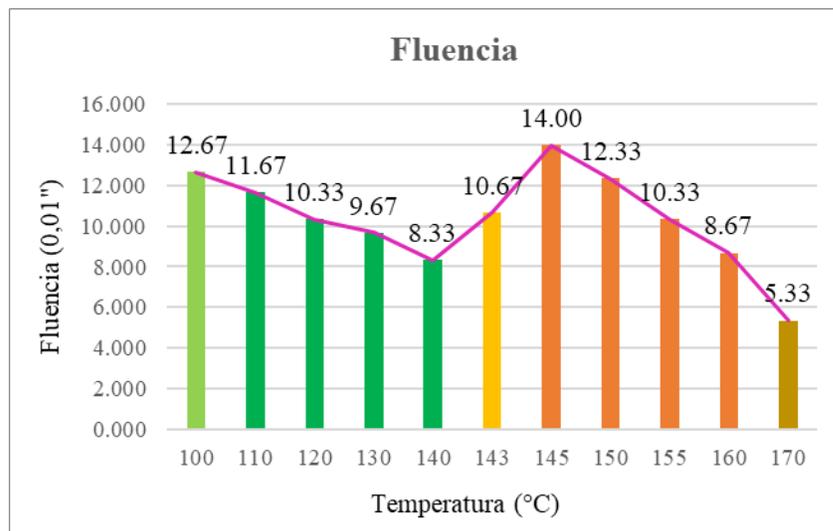
Gráfico 20. Estabilidad en extremos de temperatura en mezclas tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de barras se puede apreciar que a temperaturas extremas del rango de las mismas para el caso de las mezclas densas tibias a 100 °C usando aditivo se obtienen resultados más bajos de estabilidad, para rangos medios de temperatura en las mezclas densas calientes a 143°C usando aditivo, se observa que la estabilidad empieza a ascender y finalmente a rangos mayores de temperatura para las mezclas densas calientes a 170°C sin utilizar el aditivo se comporta con una estabilidad más baja debido a que el cemento asfáltico empieza a perder sus propiedades mecánicas.

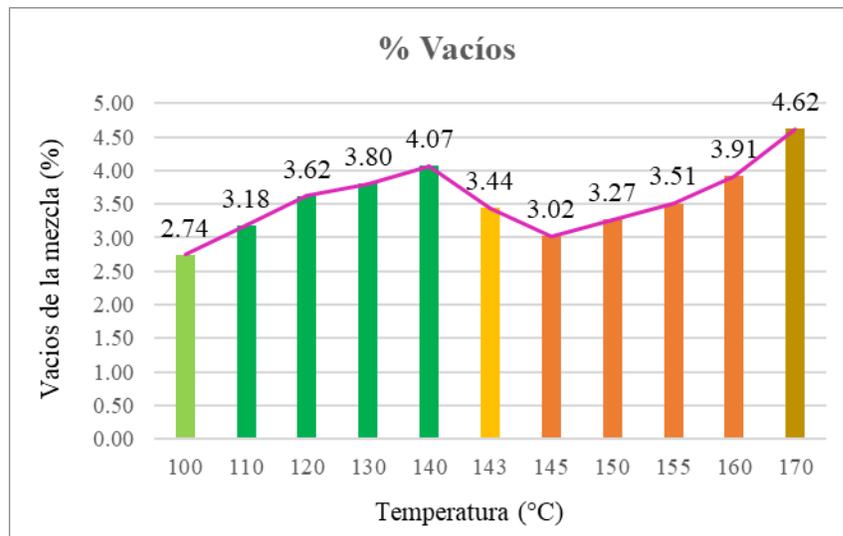
Gráfico 21. Fluencia en extremos de temperatura en mezclas tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de barras se puede apreciar que a temperaturas extremas del rango de las mismas para el caso de las mezclas densas tibias a 100 °C usando aditivo se obtienen resultados más altos de fluencia para rangos medios de temperatura en las mezclas densas calientes a 143°C usando aditivo, se observa que la fluencia empieza a ascender y para rangos mayores de temperatura en caso de mezclas densas calientes a 170°C sin utilizar el aditivo se obtienen valores mucho más bajos de fluencia.

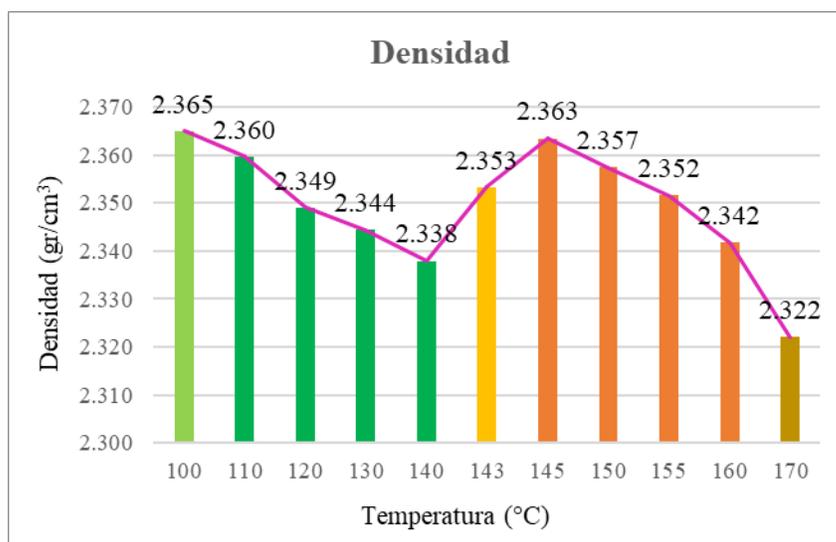
Gráfico 22. Vacíos en extremos de temperatura en mezclas tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de barras se puede apreciar que a temperaturas extremas del rango de las mismas para el caso de las mezclas densas tibias a 100 °C usando aditivo se obtienen porcentajes muy bajos de vacíos de la mezcla, para rangos medios de temperatura en las mezclas densas calientes a 143°C usando aditivo, se observa que los Vacíos de la mezcla empiezan a descender y para rangos mayores de temperatura en caso de mezclas densas calientes a 170°C sin utilizar el aditivo se obtienen porcentajes más elevados de vacíos de la mezcla.

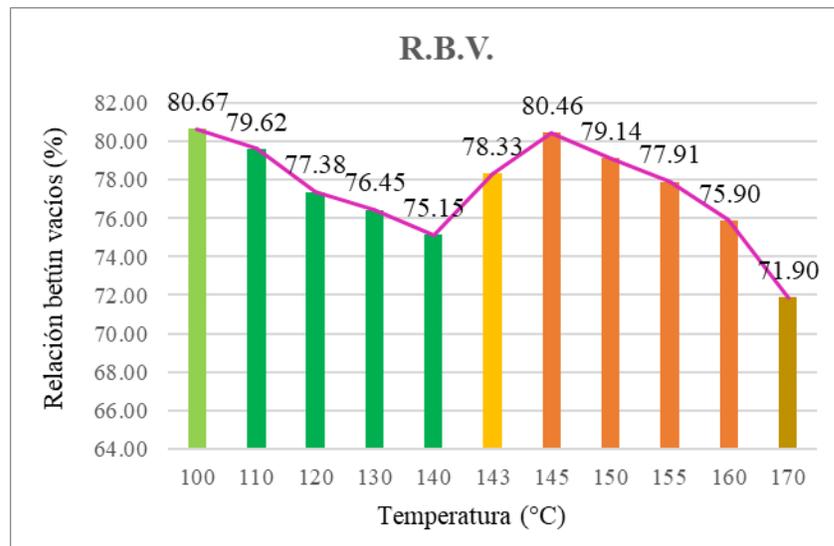
Gráfico 23. Densidad en extremos de temperatura en mezclas tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de barras se puede apreciar que a temperaturas extremas del rango de las mismas para el caso de las mezclas densas tibias a 100 °C usando aditivo se obtienen densidades altas, para rangos medios de temperatura en las mezclas densas calientes a 143°C usando aditivo, se observa que la densidad de la mezcla empieza a elevarse y para rangos mayores de temperatura en caso de mezclas densas calientes a 170°C sin utilizar el aditivo se obtienen valores más bajos de densidad de la mezcla.

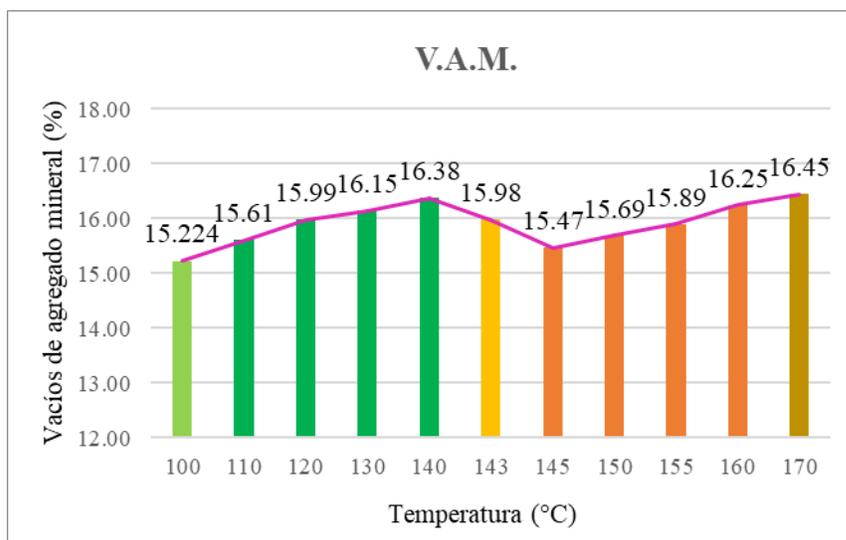
Gráfico 24. R.B.V. en extremos de temperatura en mezclas tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de barras se puede apreciar que a temperaturas extremas del rango de las mismas para el caso de las mezclas densas tibias a 100 °C usando aditivo se obtienen un valor de R.B.V muy elevado para rangos medios de temperatura en las mezclas densas calientes a 143°C usando aditivo, se observa que la propiedad R.B.V de la mezcla empieza a elevarse y para rangos mayores de temperatura en caso de mezclas densas calientes a 170°C sin utilizar el aditivo se obtienen valores más bajos de R.B.V. de la mezcla.

Gráfico 25. V.A.M. en extremos de temperatura en mezclas tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de barras se puede apreciar que a temperaturas extremas del rango de las mismas para el caso de las mezclas densas tibias a 100 °C usando aditivo se obtienen valores de V.A.M muy bajos, para rangos medios de temperatura en las mezclas densas calientes a 143°C usando aditivo, se observa que la propiedad de los vacíos de agregado mineral empieza a decrecer y para rangos mayores de temperatura en caso de mezclas densas calientes a 170°C sin utilizar el aditivo se obtienen valores más altos de V.A.M de la mezcla.

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Organización de resultados

Teniendo los resultados de las propiedades mecánicas de las briquetas con diseño de mezcla asfáltica densa caliente y densa tibia provenientes del ensayo Marshall, se procede a analizar el comportamiento estadístico del mismo.

4.2 Estadística descriptiva

4.2.1 Cálculo de curva de frecuencias, relativa y acumulada

Para la mezcla densa caliente

Datos de los valores observados para la mezcla densa caliente:

Tabla 48. Estadística de resultados para las mezclas densa caliente

Briqueta	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01in)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
1	2,36	2308,36	11,00	3,09	80,07	15,53
2	2,35	2351,44	10,00	3,59	77,50	15,96
3	2,34	2391,83	9,00	4,04	75,31	16,35
4	2,36	2337,98	10,00	3,23	79,37	15,65
5	2,35	2203,34	9,00	3,60	77,45	15,97
6	2,35	2394,53	9,00	3,54	77,74	15,92
7	2,34	2432,23	10,00	4,06	75,20	16,37
8	2,34	2418,76	11,00	3,79	76,52	16,14
9	2,35	2297,59	10,00	3,67	77,10	16,03
10	2,33	2432,23	10,00	4,25	74,31	16,54
11	2,35	2337,98	10,00	3,61	77,38	15,98
12	2,34	2459,15	12,00	3,96	75,68	16,29
13	2,34	2337,98	11,00	3,79	76,53	16,13
14	2,34	2270,66	12,00	3,94	75,79	16,27
15	2,34	2539,94	11,00	4,10	75,02	16,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla 49. Desarrollo de los datos para la planilla de frecuencias

Máximo=	2,36	2539,94	12,00	4,25	80,07	16,54
Mínimo=	2,33	2203,34	9,00	3,09	74,31	15,53
Rango=	0,03	336,60	3,00	1,16	5,76	1,01
n=	15	15	15	15	15	15
N° de clase=	5	5	5	5	5	5
Amplitud=	0,02	70	1	0,8	3,68	0,8
Máx.Med.=	2,29	2197	8	1,67	67,99	14,03
Mín.Med.=	2,39	2547	13	5,67	86,39	18,03

Fuente: Elaboración propia

Para la estabilidad

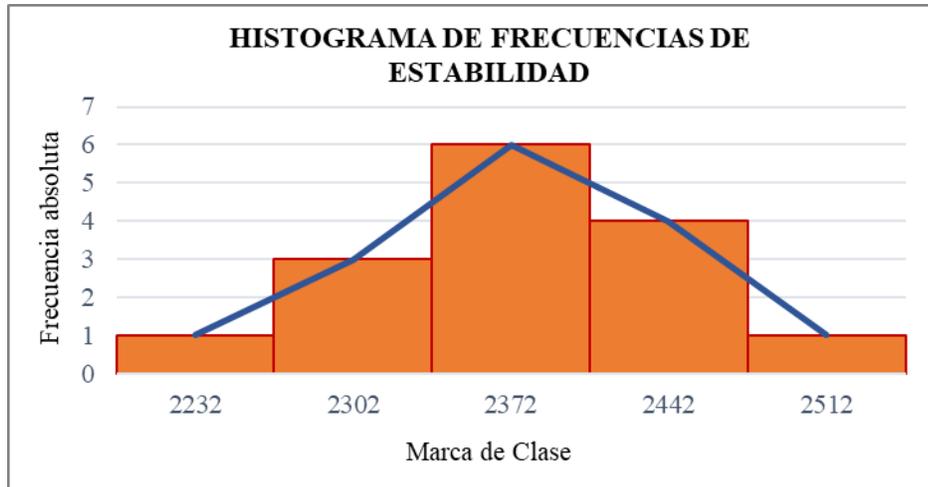
Tabla 50. Planilla de frecuencias, relativa y acumulada

Intervalo de clase I	Marca de clase	Frec. abs. ni	Frec. rel. Fi	Frec. abs. acum. Ni	Frec. rel. acum. Fi
2197-2267	2232	1	0,1	1	0,1
2267-2337	2302	3	0,2	4	0,3
2337-2407	2372	6	0,4	10	0,7
2407-2477	2442	4	0,3	14	0,9
2477-2547	2512	1	0,1	15	1,0

Fuente: Elaboración propia

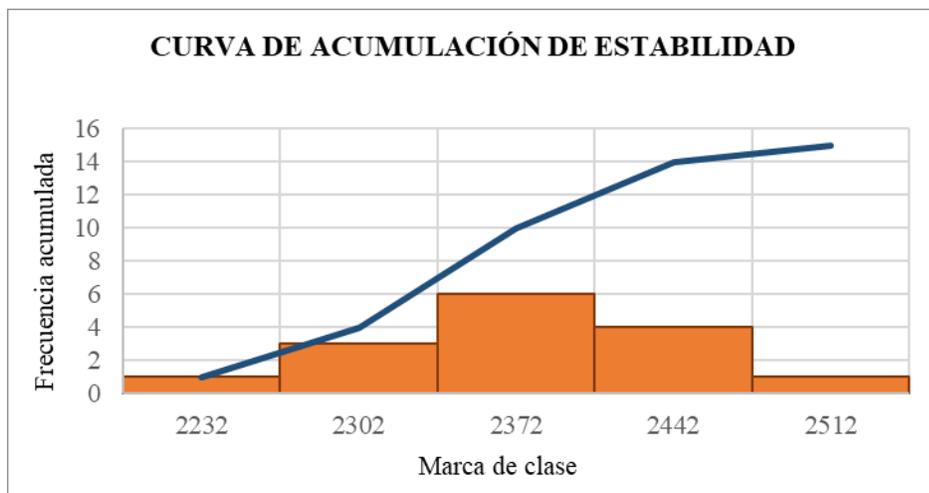
Determinación de los histogramas para la estabilidad

Gráfico 26. Histograma de frecuencia de estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 27. Curva de acumulación de estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Para la fluencia

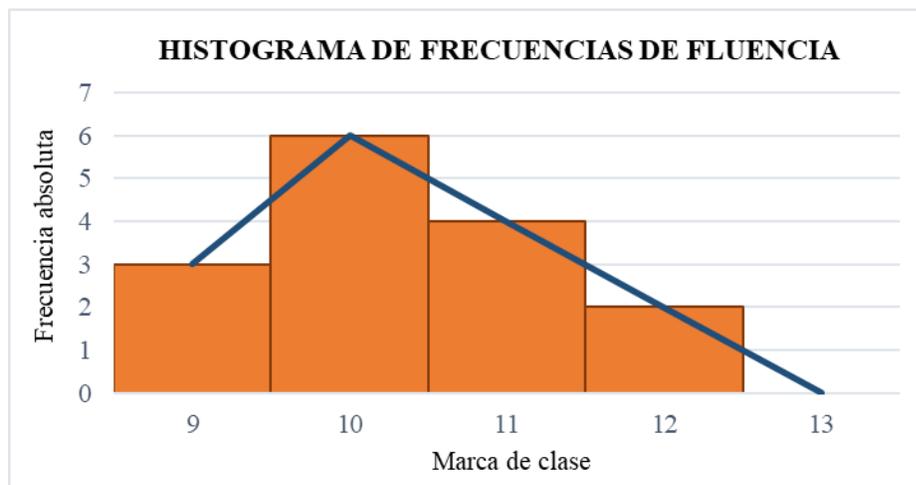
Tabla 51. Planilla de frecuencias, relativa y acumulada

Intervalo de clase I	Marca de clase	Frec. abs. ni	Frec. rel. Fi	Frec. abs. acum. Ni	Frec. rel. acum. Fi
8-9	8,5	3	0,2	3	0,2
9-10	9,5	6	0,4	9	0,6
10-11	10,5	4	0,3	13	0,9
11-12	11,5	2	0,1	15	1,0
12-13	12,5	0	0,0	15	1,0

Fuente: Elaboración propia

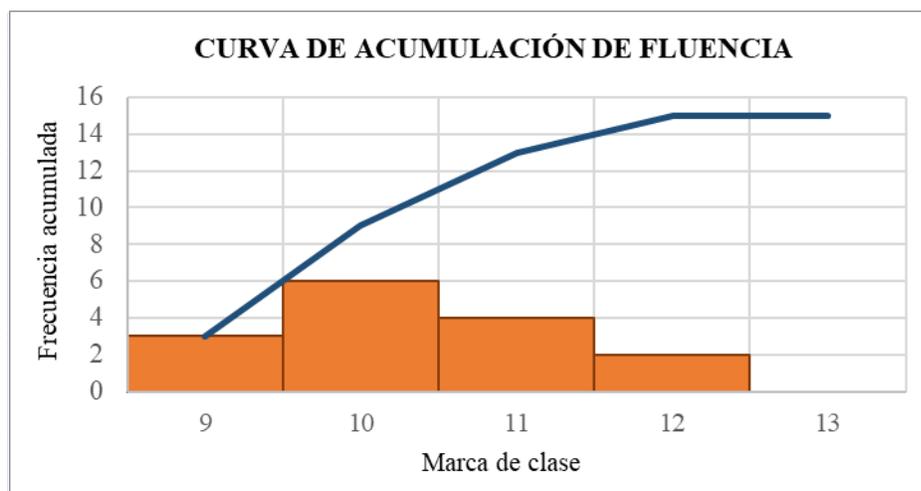
Determinación de los histogramas para la fluencia

Gráfico 28. Histograma de frecuencias de fluencia



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 29. Curva de acumulación de fluencia



Fuente: Elaboración propia

Para la mezcla densa tibia

Datos de los valores observados para la mezcla densa tibia

Tabla 52. Estadística de resultados para las mezclas densa tibia

Briqueta	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01in)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
1	2,35	1944,83	9,00	3,56	77,66	15,94
2	2,35	1977,14	10,00	3,63	77,33	15,99
3	2,35	2114,48	9,00	3,54	77,75	15,92
4	2,33	2028,31	12,00	4,24	74,36	16,53
5	2,36	1963,68	11,00	3,32	78,90	15,73
6	2,36	2020,23	9,00	3,09	80,08	15,53
7	2,35	2012,15	9,00	3,39	78,55	15,79
8	2,35	2041,77	12,00	3,69	76,99	16,05
9	2,33	2001,38	10,00	4,25	74,29	16,54
10	2,34	2006,76	11,00	3,93	75,85	16,26
11	2,34	2001,38	10,00	3,87	76,14	16,20
12	2,34	2082,16	8,00	3,94	75,78	16,27
13	2,36	2036,39	9,00	3,11	80,01	15,54
14	2,34	1920,59	9,00	4,07	75,14	16,38
15	2,35	1893,67	11,00	3,67	77,10	16,03

Fuente: Elaboración propia

Para la estabilidad

Tabla 53. Desarrollo de los datos para la planilla de frecuencias

Máximo=	2,36	2114,48	12,00	4,25	80,08	16,54
Mínimo=	2,33	1893,67	8,00	3,09	74,29	15,53
Rango=	0,03	220,81	4,0	1,16	5,79	1,01
n=	15	15	15	15	15	15
N° de clase=	5	5	5	5	5	5
Amplitud=	0,03	45	1	1,2	5,4	0,9
Máx.Med.=	2,28	1892	7,50	0,25	67,60	13,42
Mín.Med=	2,43	2117	12,50	6,25	94,60	17,92

Fuente: Elaboración propia

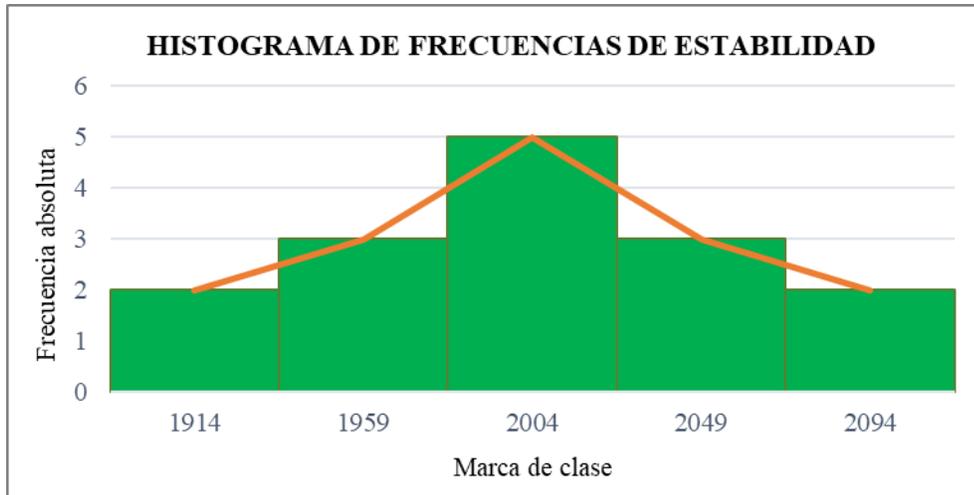
Tabla 54. Planilla de frecuencias, relativa y acumulada

Intervalo de clase I	Marca de clase	Frec. abs. ni	Frec. rel. Fi	Frec. abs. acum. Ni	Frec. rel. acum. Fi
1892-1937	1914,5	2	0,1	2	0,1
1937-1982	1959,5	3	0,2	5	0,3
1982-2027	2004,5	5	0,3	10	0,7
2027-2072	2049,5	3	0,2	13	0,9
2072-2117	2094,5	2	0,1	15	1,0

Fuente: Elaboración propia

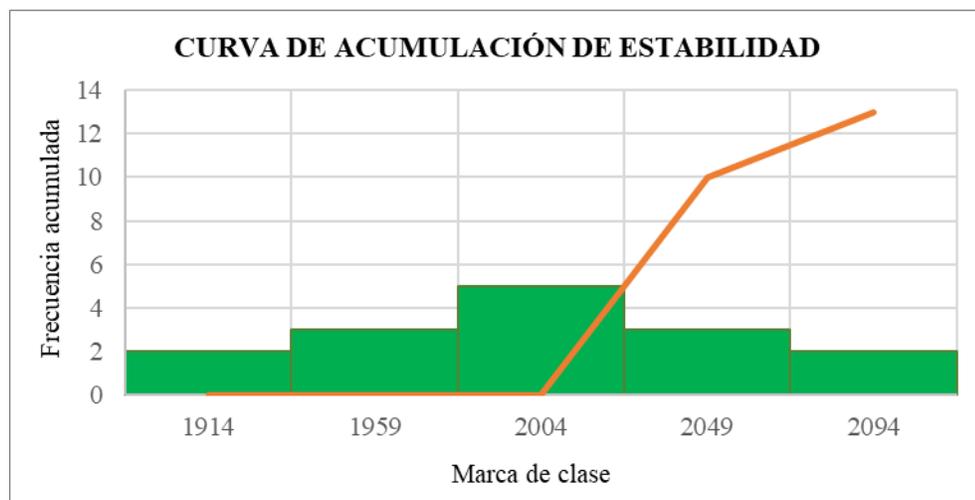
Determinación de los histogramas para la estabilidad

Gráfico 30. Histograma de frecuencias de estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 31. Curva de acumulación de estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Para la Fluencia

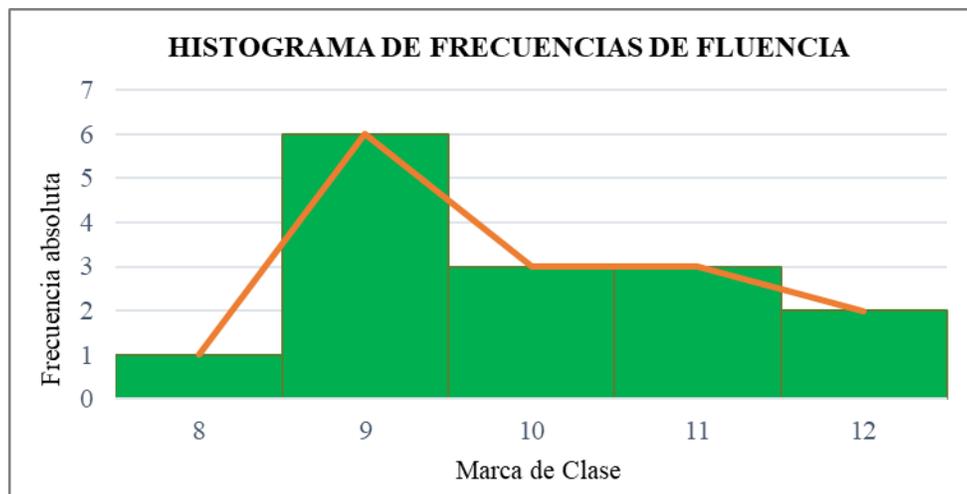
Tabla 55. Planilla de frecuencias, relativa y acumulada

Intervalo de clase I	Marca de clase	Frec. abs. ni	Frec. rel. Fi	Frec. abs. acum. Ni	Frec. rel. acum. Fi
7,5-8,5	8	1	0,1	1	0,1
8,5-9,5	9	6	0,4	7	0,5
9,5-10,5	10	3	0,2	10	0,7
10,5-11,5	11	3	0,2	13	0,9
11,5-12,5	12	2	0,1	15	1,0

Fuente: Elaboración propia

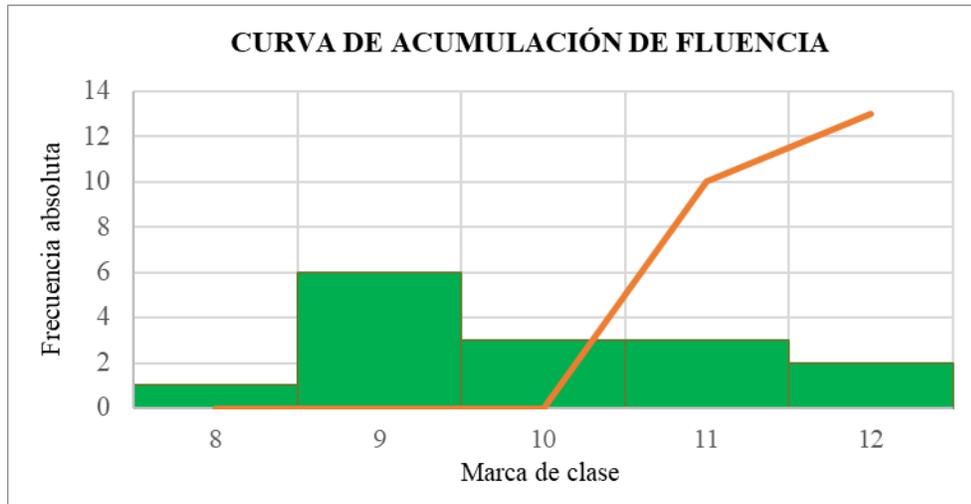
Determinación de los histogramas para la fluencia

Gráfico 32. Histograma de frecuencias de fluencia



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 33. Curva de acumulación de fluencia



Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Cálculos de medida de tendencia central

Para la mezcla densa caliente

Tabla 56. Medidas de tendencia central para mezcla densa caliente

Briqueta	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01in)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
Media=	2,35	2367,6	10,33	3,75	76,73	16,10
Moda=	2,34	2337,98	10,00	3,79	-	-
Mediana=	2,34	2351,44	10,00	3,79	76,53	16,13

Fuente: Elaboración propia

Para la mezcla densa tibia

Tabla 57. Medidas de tendencia central para mezcla densa tibia

Briqueta	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01in)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
Media=	2,35	2002,99	9,93	3,68	77,06	16,05
Moda=	-	2001,38	9,00	-	-	-
Mediana=	2,35	2006,76	10,00	3,67	77,10	16,03

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Cálculos de medidas de dispersión

Para la mezcla densa caliente

Tabla 58. Medidas de dispersión para mezcla densa caliente

Briqueta	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01in)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
Desviación estándar =	0,008	83,69	0,98	0,32	1,60	0,28
Varianza=	7E-05	7003,49	0,95	0,10	2,57	0,07

Fuente: Elaboración propia

Para la mezcla densa tibia

Tabla 59. Medidas de dispersión para mezcla densa tibia

Briqueta	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (0,01in)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
Desviación estándar =	0,008	57,75	1,22	0,36	1,83	0,32
Varianza=	7,977	3335,33	1,49	0,13	3,35	0,10

Fuente: Elaboración propia

4.3 Estadística inferencial

Serie de datos

Para la estabilidad

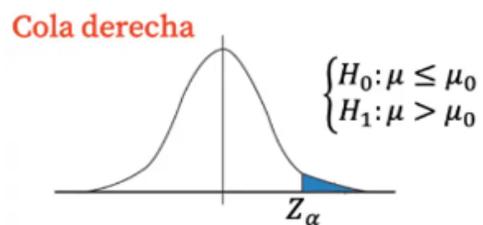
Tabla 60. Serie de datos para la estabilidad

Nº	Mezcla densa caliente	Mezcla densa tibia	d
1	2203,10	1856,15	347,0
2	2257,39	1898,06	359,3
3	2379,88	2103,90	276,0
4	2240,02	1943,32	296,7
5	2126,22	1894,95	231,3
6	2452,00	2068,71	383,3
7	2502,76	2070,50	432,3
8	2438,11	2058,10	380,0
9	2274,61	1981,36	293,2
10	2325,94	1919,07	406,9
11	2291,22	1961,35	329,9
12	2373,08	2009,29	363,8
13	2297,06	2000,75	296,3
14	2213,89	1872,58	341,3
15	2395,67	1786,11	609,6

Fuente: Elaboración propia

Prueba de hipótesis

Figura 55. Prueba de hipótesis con cola derecha



Fuente: Elaboración propia

4.3.1 Prueba de hipótesis para la estabilidad

$$H_0 : \mu \leq \mu_0$$

$$H_1 : \mu > \mu_0$$

Donde:

H₀= Hipótesis nula

La mezcla asfáltica densa caliente no tiene mejores características en estabilidad frente a la mezcla densa tibia.

H₁= Hipótesis alternativa

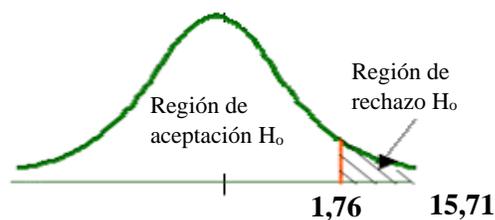
La mezcla asfáltica densa caliente sí tiene mejores características en estabilidad frente a la mezcla densa tibia.

Tabla 61. Resumen estadístico de datos calculados

Promedio (d)=	356,45
N° datos (n)=	15
Desviación est.(Sd)=	87,85
Estadístico de prueba(t)=	15,71
Grados de libertad(gl)=	14
Nivel de significancia(α)=	0,05
Valor crítico=	1,76
p-valor=	4,1E-10

Fuente: Elaboración propia

Figura 56. Regiones de aceptación y rechazo para la hipótesis



Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Comprobación de la hipótesis para la estabilidad

$$\begin{array}{ccc} t & & t(1-\alpha) \\ 15,71 & > & 1,76 \\ \text{Estadístico de prueba} & & \text{Valor crítico} \end{array}$$

Se observa que en la gráfica de regiones de aceptación y de rechazo, el valor del estadístico de prueba (t) se encuentra en la región de rechazo de la hipótesis nula (H₀) muy por delante del valor límite crítico por lo tanto la hipótesis nula se rechaza.

Para la fluencia

Tabla 62. Serie de datos para la fluencia

N°	Mezcla densa caliente	Mezcla densa tibia	d
1	11	9	2
2	10	10	0
3	9	9	0
4	10	12	-2
5	9	11	-2
6	9	9	0
7	10	9	1
8	11	12	-1
9	10	10	0
10	10	11	-1
11	10	10	0
12	12	8	4
13	11	9	2
14	12	9	3
15	11	11	0

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Prueba de hipótesis para la fluencia

$$H_0 : \mu \leq \mu_0$$

$$H_1 : \mu > \mu_0$$

Donde:

H₀= Hipótesis nula

La mezcla asfáltica densa caliente no tiene mejores características en fluencia frente a la mezcla densa tibia.

H₁= Hipótesis alternativa

La mezcla asfáltica densa caliente sí tiene mejores características en fluencia frente a la mezcla densa tibia.

Tabla 63. Resumen estadístico de datos calculados

Promedio (d)=	0,40
N° datos (n)=	15
Desviación est.(Sd)=	1,72
Estadístico de prueba(t)=	2,90
Grados de libertad(gl)=	14
Nivel de significancia(α)=	0,05
Valor crítico=	1,76
p-valor=	0,192

Fuente: Elaboración propia

4.3.4 Comprobación de la hipótesis para la fluencia

$$\begin{array}{ccc} t & & t(1-\alpha) \\ 2,90 & > & 1,76 \end{array}$$

Estadístico de prueba Valor crítico

Se observa que en la gráfica de regiones de aceptación y de rechazo, el valor del estadístico de prueba (t) se encuentra en la región de rechazo de la hipótesis nula (H₀) muy por delante del valor límite crítico por lo tanto la hipótesis nula se rechaza.

4.4 Especificaciones técnicas

4.4.1 Especificación técnica de la carpeta asfáltica en mezclas calientes

Descripción

A continuación, se describirá la colocación de una capa asfáltica fabricada en caliente y, construida sobre una superficie debidamente preparada e imprimada, de acuerdo con la presente especificación. Las mezclas asfálticas para empleo en pavimentación en caliente se compondrán de agregados minerales gruesos, finos, filler mineral y material bituminoso.

Materiales

Agregado grueso

El agregado grueso empleado para la ejecución de mezcla bituminosa deberá poseer una naturaleza tal, que, al aplicársele una capa del material asfáltico por utilizar en el trabajo, ésta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito. Sólo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas.

El agregado grueso deberá proceder de la trituración de roca o de grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables. Estarán exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias objetables que puedan impedir la adhesión completa del asfalto. Sus requisitos básicos de calidad se presentan en cada especificación.

Agregado fino

El agregado fino empleado para la ejecución de mezcla bituminosa deberá poseer una naturaleza tal, que, al aplicársele una capa del material asfáltico por utilizar en el trabajo, ésta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito. Sólo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas.

El agregado fino estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. La proporción admisible de esta última dentro del conjunto se encuentra definida en la respectiva especificación. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto y deberá satisfacer los requisitos de calidad indicados en cada especificación.

Filler o polvo mineral

El polvo mineral o filler se denomina al que pasa el tamiz N° 200 el cual provendrá de los procesos de trituración de los agregados pétreos o podrá ser de aporte de productos comerciales, generalmente cal hidratada o cemento Pórtland. Podrá usarse una fracción del material proveniente de la clasificación, siempre que se verifique que no tenga actividad y que sea no plástico que deberá cumplir la norma. El filler se describirá todas sus características. De no ser cal, será polvo de roca o cemento hidráulico. La cantidad a utilizar se definirá en la fase de diseños de mezcla según el método Marshall.

Cemento asfáltico

El cemento asfáltico a emplear en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente será clasificado por penetración, o por viscosidad absoluta. Su empleo será según las características climáticas de la región y las condiciones de operación de la carretera.

El cemento asfáltico debe presentar un aspecto homogéneo, libre de agua y no formará espuma cuando sea calentado.

Los ensayos a realizar para caracterizar el cemento asfáltico son los siguientes:

Ensayo de ductilidad

Este método de prueba describe el procedimiento para determinar la ductilidad de un material de asfalto medido por la distancia a la que se alargará antes de romperse cuando dos extremos de una muestra de briquetas del material se separan a una velocidad especificada y a una temperatura especificada. El ensayo se realizará a una temperatura de 25 °C y con una velocidad de 5 cm/min.

Ensayo de punto de ablandamiento

También conocido como el ensayo del anillo y bola, el resultado de este ensayo nos permite determinar dos cosas; asegura la uniformidad del asfalto durante su transporte, indicador de su tendencia al flujo en bajas temperaturas.

Ensayo de penetración

La consistencia de un cemento asfáltico se mide mediante el ensayo de penetración durante este ensayo se introduce una aguja de dimensiones específicas en una muestra de cemento asfáltico bajo una carga conocida a una temperatura fija durante un plazo de tiempo predeterminando.

Ensayo densidad del asfalto

La densidad relativa de un material bituminoso se define como la relación entre el peso de un volumen dado de una sustancia a 25°C y el peso de un volumen de agua a la misma temperatura. Determinar el peso de los picnómetros y registrar el peso y designar a este dato la letra A después llenar los picnómetros con agua destilada para posteriormente sumergir totalmente en un vaso precipitado con agua destilada y dejar en baño maría por 30 minutos para calibrar después transcurrido el tiempo extraer los picnómetros secar superficialmente y pesar para designar con la letra B. Seguidamente verter el cemento asfáltico aproximadamente a $\frac{3}{4}$ del picnómetro y dejar que alcance la temperatura ambiente. Posteriormente pesar los picnómetros más las muestras designadas con la letra C. Después llenar los picnómetros con agua destilada y sumergir en la misma y dejar por 30 minutos para luego secar y pesar y obtener el último dato y designar con la letra D.

Ensayo de inflamación

El ensayo es el más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el vaso abierto de Cleveland que consiste en llamar un vaso de bronce con determinado volumen de asfalto y calentarlo con un aumento de temperatura normalizados pasa una llama instantánea sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados el punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes volátiles como para provocar una inflamación. Este ensayo resulta necesario para fines prácticos de seguridad puesto que los resultados que arroja permiten conocer la temperatura a la cual el bitumen podría entrar en combustión.

Equipos

Todos los equipos empleados deberán ser compatibles con los procedimientos de construcción adoptados y requieren la aprobación previa del Supervisor teniendo en cuenta que su capacidad y eficiencia se ajusten al programa de ejecución de las obras y al cumplimiento de las exigencias de calidad de la presente especificación y de la correspondiente a la respectiva partida de trabajo.

Planta mezcladora

Las plantas productoras de mezcla asfáltica deberán cumplir con lo establecido en la reglamentación vigente sobre protección y control de calidad del aire.

Las tolvas de agregados deberán tener paredes resistentes y estar provistas de dispositivos de salida que puedan ser ajustados exactamente y mantenidos en cualquier posición. El número mínimo de tolvas será función del número de fracciones de agregados por emplear y deberá tener aprobación del Supervisor.

La planta estará dotada de un secador que permita el secado correcto de los agregados y su calentamiento a la temperatura adecuada para la fabricación de la mezcla. El sistema de extracción de polvo deberá evitar su emisión a la atmósfera o el vertido de lodos a cauces de agua o instalaciones sanitarias

La instalación deberá estar provista de indicadores de la temperatura de los agregados, situados a la salida del secador y en las tolvas en caliente. El sistema de almacenamiento, calefacción y alimentación del asfalto deberá permitir su recirculación y su calentamiento a la temperatura de empleo. En el calentamiento del asfalto se emplearán, preferentemente, serpentines de aceite o vapor, evitándose en todo caso el contacto del ligante con elementos metálicos de la caldera que estén a temperatura muy superior a la de almacenamiento

La instalación estará dotada de sistemas independientes de almacenamiento y alimentación de la llenante de recuperación y adición, los cuales deberán estar protegidos contra la humedad.

Antes de la instalación de la planta mezcladora, el contratista deberá solicitar a las autoridades correspondientes, los permisos de localización, concesión de aguas, disposición de sólidos, funcionamiento de para emisiones atmosféricas, vertimiento de aguas y permiso por escrito al dueño o representante legal.

Para la ubicación se debe considerar dirección de los vientos, proximidad a las fuentes de materiales, fácil acceso. Los trabajadores y operarios más expuestos al ruido, gases tóxicos y partículas deberán estar dotados con elementos de seguridad industrial y adaptados a las condiciones climáticas tales como: gafas, tapaoídos, tapabocas, casco, guantes, botas y otras.

Equipo para el transporte

Tanto los agregados como las mezclas se transportarán en volquetes acondicionadas para tal fin. La forma y altura de la tolva será tal, que, durante el vertido en la terminadora, el volquete sólo toque a ésta a través de los rodillos previstos para ello.

Los volquetes deberán estar siempre provistos de una lona o cobertor adecuado, debidamente asegurado, tanto para proteger los materiales que transporta, como para prevenir emisiones contaminantes.

Equipo para la extensión de la mezcla

La extensión y terminación de las mezclas densas en caliente se hará con una pavimentadora autopropulsada, adecuada para extender y terminar la mezcla con un mínimo de precompactación de acuerdo con los anchos y espesores especificados. La pavimentadora estará equipada con un vibrador y un distribuidor de tornillo sinfín, de tipo reversible, capacitado para colocar la mezcla uniformemente por delante de los enrasadores. Poseerá un equipo de dirección adecuado y tendrá velocidades para retroceder y avanzar. La pavimentadora tendrá dispositivos mecánicos compensadores para obtener una superficie pareja y formar los bordes de la capa sin uso de formas. Será ajustable para lograr la sección transversal especificada del espesor de diseño u ordenada por el Supervisor.

Asimismo, deberá poseer sensores electrónicos para garantizar la homogeneidad de los espesores. Si se determina que el equipo deja huellas en la superficie de la capa, áreas defectuosas u otras irregularidades objetables que no sean fácilmente corregibles durante la construcción, el Supervisor exigirá su inmediata reparación o cambio.

Equipo de compactación

Se deberán utilizar rodillos autopropulsados de cilindros metálicos, estáticos o vibratorios, triciclos o tándem y de neumáticos. El equipo de compactación será aprobado por el Supervisor, a la vista de los resultados obtenidos en la fase de experimentación.

Los compactadores de rodillos no deberán presentar surcos ni irregularidades. Los compactadores vibratorios dispondrán de dispositivos para eliminar la vibración al invertir la marcha, siendo aconsejable que el dispositivo sea automático. Además, deberán poseer controladores de vibración y de frecuencia independientes. Los de neumáticos tendrán ruedas lisas, en número, tamaño y disposición tales, que permitan el traslape de las huellas delanteras y traseras y, en caso necesario, faldones de lona protectora contra el enfriamiento de los neumáticos.

Tramo de prueba

Antes de iniciar los trabajos, el Contratista emprenderá un tramo de prueba para verificar el estado de los equipos y determinar, en secciones de ensayo de ancho y longitud definidos de acuerdo con el Supervisor, el método definitivo de preparación, transporte, colocación y compactación de la mezcla o tratamiento, de manera que se cumplan los requisitos de la respectiva especificación.

En el caso de la construcción de lechadas asfálticas, el proceso no incluirá la etapa de compactación. El Supervisor tomará muestras de la mezcla, para determinar su conformidad con las condiciones especificadas que correspondan. En caso de que el trabajo elaborado no se ajuste a dichas condiciones, el Contratista deberá efectuar inmediatamente las correcciones requeridas en los equipos y sistemas o, si llega a ser necesario, en la fórmula de trabajo, repitiendo las secciones de ensayo una vez efectuadas las correcciones.

El Supervisor determinará si es aceptable la ejecución de los tramos de prueba como parte integrante de la obra en construcción. En caso que los tramos de prueba sean rechazados o resulten defectuosos el Contratista deberá levantarlo totalmente, transportando los residuos a las zonas de depósito indicadas en el Proyecto u ordenados por el Supervisor. Durante la aplicación del material bituminoso, el contratista deberá contar con extintores, dispuestos en lugares de fácil accesibilidad para el personal de obra, debido a que las temperaturas en las que se trabajan pueden generar incendios. En las áreas que han sido tratadas, no se debe permitir el paso de vehículos, para lo cual se instalarán las señalizaciones y desvíos correspondientes, sin que perturbe en gran medida el normal tránsito de los vehículos.

Transporte de la mezcla

La mezcla se transportará a la obra en volquetes hasta una hora de día en que las operaciones de extensión y compactación se puedan realizar correctamente con luz solar. Sólo se permitirá el trabajo en horas de la noche si, a juicio del Supervisor, existe una iluminación artificial que permita la extensión y compactación de manera adecuada. Durante el transporte de la mezcla deberán tomarse las precauciones necesarias para que al descargarla sobre la máquina pavimentadora.

Al realizar estas labores, se debe tener mucho cuidado que no se manche la superficie por ningún tipo de material, si esto ocurriese se deberá de realizar las acciones correspondientes para la limpieza del mismo por parte y responsabilidad del contratista.

Extensión de la mezcla

La mezcla se extenderá con la máquina pavimentadora, de modo que se cumplan los alineamientos, anchos y espesores señalados en los planos o determinados por el Supervisor. A menos que se ordene otra cosa, la extensión comenzará a partir del borde de la calzada en las zonas por pavimentar con sección bombeada, o en el lado inferior en las secciones peraltadas.

Tras la pavimentadora se deberá disponer un número suficiente de obreros especializados, agregando mezcla caliente y enrasándola, según se precise, con el fin de obtener una capa que, una vez compactada, se ajuste enteramente a las condiciones impuestas en esta especificación. En los sitios en los que a juicio del Supervisor no resulte posible el empleo de máquinas pavimentadoras, la mezcla podrá extenderse a mano. La mezcla se descargará fuera de la zona que se vaya a pavimentar, y distribuirá en los lugares correspondientes por medio de palas y rastrillos calientes, en una capa uniforme y de espesor tal que, una vez compactada, se ajuste a los planos o instrucciones del Supervisor, con las tolerancias establecidas en la presente especificación. Al realizar estas labores, se debe tener mucho cuidado que no se manche la superficie por ningún tipo de material, si esto ocurriese se deberá de realizar las acciones correspondientes para la limpieza del mismo por parte y responsabilidad del contratista.

Compactación de la mezcla

La compactación deberá comenzar, una vez extendida la mezcla, a la temperatura más alta posible con que ella pueda soportar la carga a que se somete sin que se produzcan agrietamientos o desplazamientos indebidos, según haya sido dispuesto durante la ejecución del tramo de prueba. La compactación deberá empezar por los bordes y avanzar gradualmente hacia el centro, excepto en las curvas peraltadas en donde el cilindrado avanzará del borde inferior al superior, paralelamente al eje de la vía y traslapando a cada paso en la forma aprobada por el Supervisor, hasta que la superficie total haya sido compactada. Los rodillos deberán llevar su llanta motriz del lado cercano a la pavimentadora, excepto en los casos que autorice el Supervisor, y sus cambios de

dirección se harán sobre la mezcla ya compactada. Se tendrá cuidado en el cilindrado para no desplazar los bordes de la mezcla extendida; aquellos que formarán los bordes exteriores del pavimento terminado, serán chaflanados ligeramente. La compactación se deberá realizar de manera continua durante la jornada de trabajo y se complementará con el trabajo manual necesario para la corrección de todas las irregularidades que se puedan presentar. Se cuidará que los elementos de compactación estén siempre limpios y, si es preciso, húmedos. No se permitirán, sin embargo, excesos de agua. La compactación se continuará y se concluirá con un apisonado final que borre las huellas dejadas por los compactadores precedentes.

Medición

La carpeta asfáltica, se medirá en metros cúbicos (m^3) del espesor compactado especificado y aceptado, por el Supervisor, de acuerdo a los planos y presentes especificaciones. El volumen se determinará multiplicando la longitud real, medida a lo largo del eje del trabajo, por el ancho y el espesor especificado en los planos u ordenado por el Supervisor. No se medirá ningún volumen por fuera de tales límites.

Pago

El pago se efectuará al precio unitario del Contrato por metro cúbico (m^3), aceptada a satisfacción por el Supervisor, entendiéndose que dicho pago constituirá compensación total por los trabajos prescritos y cubrirá los costos de materiales, mano de obra en trabajos diurnos y nocturnos, herramientas, equipos pesados, transporte y todos los gastos que demande el cumplimiento satisfactorio del contrato, incluyendo los imprevistos.

El precio deberá incluir todos los costos de adquisición, obtención de permisos y derechos de explotación o alquiler de fuentes de materiales y canteras; obtención de licencias ambientales para la explotación de los agregados y la elaboración de las mezclas; las instalaciones provisionales, los costos de arreglo o construcción de las vías de acceso a las fuentes y canteras.

4.4.2 Especificación técnica de la carpeta asfáltica en mezclas tibias

Descripción

A continuación, se describirá la colocación de una capa asfáltica fabricada en tibio y, construida sobre una superficie debidamente preparada e imprimada, de acuerdo con la presente especificación. Las mezclas asfálticas para empleo en pavimentación tibia se compondrán de agregados minerales gruesos, finos, filler mineral y material bituminoso.

Materiales

Agregado grueso

El agregado grueso empleado para la ejecución de mezcla bituminosa deberá poseer una naturaleza tal, que, al aplicársele una capa del material asfáltico por utilizar en el trabajo, ésta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito. Sólo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas.

El agregado grueso deberá proceder de la trituración de roca o de grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables. Estarán exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias objetables que puedan impedir la adhesión completa del asfalto. Sus requisitos básicos de calidad se presentan en cada especificación.

Agregado fino

El agregado fino empleado para la ejecución de mezcla bituminosa deberá poseer una naturaleza tal, que, al aplicársele una capa del material asfáltico por utilizar en el trabajo, ésta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito. Sólo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas.

El agregado fino estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. La proporción admisible de esta última dentro del conjunto se encuentra definida en la respectiva especificación. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto y deberá satisfacer los requisitos de calidad indicados en cada especificación.

Filler o polvo mineral

El polvo mineral o filler se denomina al que pasa el tamiz N° 200 el cual provendrá de los procesos de trituración de los agregados pétreos o podrá ser de aporte de productos

comerciales, generalmente cal hidratada o cemento Pórtland. Podrá usarse una fracción del material proveniente de la clasificación, siempre que se verifique que no tenga actividad y que sea no plástico que deberá cumplir la norma. El filler se describirá todas sus características. De no ser cal, será polvo de roca o cemento hidráulico. La cantidad a utilizar se definirá en la fase de diseños de mezcla según el método Marshall.

Cemento asfáltico

El cemento asfáltico a emplear en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente será clasificado por penetración, o por viscosidad absoluta. Su empleo será según las características climáticas de la región y las condiciones de operación de la carretera.

El cemento asfáltico debe presentar un aspecto homogéneo, libre de agua y no formará espuma cuando sea calentado.

Los ensayos a realizar para caracterizar el cemento asfáltico son los siguientes:

Ensayo de ductilidad

Este método de prueba describe el procedimiento para determinar la ductilidad de un material de asfalto medido por la distancia a la que se alargará antes de romperse cuando dos extremos de una muestra de briquetas del material se separan a una velocidad especificada y a una temperatura especificada. El ensayo se realizará a una temperatura de 25 °C y con una velocidad de 5 cm/min.

Ensayo de punto de ablandamiento

También conocido como el ensayo del anillo y bola, el resultado de este ensayo nos permite determinar dos cosas; asegura la uniformidad del asfalto durante su transporte, indicador de su tendencia al flujo en bajas temperaturas.

Ensayo de penetración

La consistencia de un cemento asfáltico se mide mediante el ensayo de penetración durante este ensayo se introduce una aguja de dimensiones específicas en una muestra de cemento asfáltico bajo una carga conocida a una temperatura fija durante un plazo de tiempo predeterminando.

Ensayo densidad del asfalto

La densidad relativa de un material bituminoso se define como la relación entre el peso de un volumen dado de una sustancia a 25°C y el peso de un volumen de agua a la misma temperatura. Determinar el peso de los picnómetros y registrar el peso y designar a este

dato la letra A después llenar los picnómetros con agua destilada para posteriormente sumergir totalmente en un vaso precipitado con agua destilada y dejar en baño maría por 30 minutos para calibrar después transcurrido el tiempo extraer los picnómetros secar superficialmente y pesar para designar con la letra B. Seguidamente verter el cemento asfáltico aproximadamente a $\frac{3}{4}$ del picnómetro y dejar que alcance la temperatura ambiente. Posteriormente pesar los picnómetros más las muestras designadas con la letra C. Después llenar los picnómetros con agua destilada y sumergir en la misma y dejar por 30 minutos para luego secar y pesar y obtener el último dato y designar con la letra D.

Ensayo de inflamación

El ensayo es el más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el vaso abierto de Cleveland que consiste en llamar un vaso de bronce con determinado volumen de asfalto y calentarlo con un aumento de temperatura normalizados pasa una llama instantánea sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados el punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes volátiles como para provocar una inflamación. Este ensayo resulta necesario para fines prácticos de seguridad puesto que los resultados que arroja permiten conocer la temperatura a la cual el bitumen podría entrar en combustión.

Equipos

Todos los equipos empleados deberán ser compatibles con los procedimientos de construcción adoptados y requieren la aprobación previa del Supervisor teniendo en cuenta que su capacidad y eficiencia se ajusten al programa de ejecución de las obras y al cumplimiento de las exigencias de calidad de la presente especificación y de la correspondiente a la respectiva partida de trabajo.

Mezclado con Zycotherm

Para agregar el aditivo zycotherm en la mezcla asfáltica se lo realiza mediante la siguiente manera:

Inyección por goteo antes que el tanquero cargue en la refinería.

Inyección por goteo, antes que el asfalto sea almacenado en la planta, deben recircular el tanque para lograr una mejor mezcla.

Planta mezcladora

Las plantas productoras de mezcla asfáltica deberán cumplir con lo establecido en la reglamentación vigente sobre protección y control de calidad del aire.

Las tolvas de agregados deberán tener paredes resistentes y estar provistas de dispositivos de salida que puedan ser ajustados exactamente y mantenidos en cualquier posición. El número mínimo de tolvas será función del número de fracciones de agregados por emplear y deberá tener aprobación del Supervisor.

La planta estará dotada de un secador que permita el secado correcto de los agregados y su calentamiento a la temperatura adecuada para la fabricación de la mezcla. El sistema de extracción de polvo deberá evitar su emisión a la atmósfera o el vertido de lodos a cauces de agua o instalaciones sanitarias

La instalación deberá estar provista de indicadores de la temperatura de los agregados, situados a la salida del secador y en las tolvas en caliente. El sistema de almacenamiento, calefacción y alimentación del asfalto deberá permitir su recirculación y su calentamiento a la temperatura de empleo. En el calentamiento del asfalto se emplearán, preferentemente, serpentines de aceite o vapor, evitándose en todo caso el contacto del ligante con elementos metálicos de la caldera que estén a temperatura muy superior a la de almacenamiento

La instalación estará dotada de sistemas independientes de almacenamiento y alimentación de la llenante de recuperación y adición, los cuales deberán estar protegidos contra la humedad.

Antes de la instalación de la planta mezcladora, el contratista deberá solicitar a las autoridades correspondientes, los permisos de localización, concesión de aguas, disposición de sólidos, funcionamiento de para emisiones atmosféricas, vertimiento de aguas y permiso por escrito al dueño o representante legal.

Para la ubicación se debe considerar dirección de los vientos, proximidad a las fuentes de materiales, fácil acceso. Los trabajadores y operarios más expuestos al ruido, gases tóxicos y partículas deberán estar dotados con elementos de seguridad industrial y adaptados a las condiciones climáticas tales como: gafas, tapaoídos, tapabocas, casco, guantes, botas y otras.

Equipo para el transporte

Tanto los agregados como las mezclas se transportarán en volquetes acondicionadas para tal fin. La forma y altura de la tolva será tal, que, durante el vertido en la terminadora, el volquete sólo toque a ésta a través de los rodillos previstos para ello.

Los volquetes deberán estar siempre provistos de una lona o cobertor adecuado, debidamente asegurado, tanto para proteger los materiales que transporta, como para prevenir emisiones contaminantes.

Equipo para la extensión de la mezcla

La extensión y terminación de las mezclas densas en caliente se hará con una pavimentadora autopropulsada, adecuada para extender y terminar la mezcla con un mínimo de precompactación de acuerdo con los anchos y espesores especificados. La pavimentadora estará equipada con un vibrador y un distribuidor de tornillo sinfín, de tipo reversible, capacitado para colocar la mezcla uniformemente por delante de los enrasadores. Poseerá un equipo de dirección adecuado y tendrá velocidades para retroceder y avanzar. La pavimentadora tendrá dispositivos mecánicos compensadores para obtener una superficie pareja y formar los bordes de la capa sin uso de formas. Será ajustable para lograr la sección transversal especificada del espesor de diseño u ordenada por el Supervisor.

Asimismo, deberá poseer sensores electrónicos para garantizar la homogeneidad de los espesores. Si se determina que el equipo deja huellas en la superficie de la capa, áreas defectuosas u otras irregularidades objetables que no sean fácilmente corregibles durante la construcción, el Supervisor exigirá su inmediata reparación o cambio.

Equipo de compactación

Se deberán utilizar rodillos autopropulsados de cilindros metálicos, estáticos o vibratorios, triciclos o tándem y de neumáticos. El equipo de compactación será aprobado por el Supervisor, a la vista de los resultados obtenidos en la fase de experimentación.

Los compactadores de rodillos no deberán presentar surcos ni irregularidades. Los compactadores vibratorios dispondrán de dispositivos para eliminar la vibración al invertir la marcha, siendo aconsejable que el dispositivo sea automático. Además, deberán poseer controladores de vibración y de frecuencia independientes. Los de neumáticos tendrán ruedas lisas, en número, tamaño y disposición tales, que permitan el traslape de las huellas

delanteras y traseras y, en caso necesario, faldones de lona protectora contra el enfriamiento de los neumáticos.

Tramo de prueba

Antes de iniciar los trabajos, el Contratista emprenderá un tramo de prueba para verificar el estado de los equipos y determinar, en secciones de ensayo de ancho y longitud definidos de acuerdo con el Supervisor, el método definitivo de preparación, transporte, colocación y compactación de la mezcla o tratamiento, de manera que se cumplan los requisitos de la respectiva especificación.

En el caso de la construcción de lechadas asfálticas, el proceso no incluirá la etapa de compactación. El Supervisor tomará muestras de la mezcla, para determinar su conformidad con las condiciones especificadas que correspondan. En caso de que el trabajo elaborado no se ajuste a dichas condiciones, el Contratista deberá efectuar inmediatamente las correcciones requeridas en los equipos y sistemas o, si llega a ser necesario, en la fórmula de trabajo, repitiendo las secciones de ensayo una vez efectuadas las correcciones.

El Supervisor determinará si es aceptable la ejecución de los tramos de prueba como parte integrante de la obra en construcción. En caso que los tramos de prueba sean rechazados o resulten defectuosos el Contratista deberá levantarlo totalmente, transportando los residuos a las zonas de depósito indicadas en el Proyecto u ordenados por el Supervisor. Durante la aplicación del material bituminoso, el contratista deberá contar con extintores, dispuestos en lugares de fácil accesibilidad para el personal de obra, debido a que las temperaturas en las que se trabajan pueden generar incendios. En las áreas que han sido tratadas, no se debe permitir el paso de vehículos, para lo cual se instalarán las señalizaciones y desvíos correspondientes, sin que perturbe en gran medida el normal tránsito de los vehículos.

Transporte de la mezcla

La mezcla se transportará a la obra en volquetes hasta una hora de día en que las operaciones de extensión y compactación se puedan realizar correctamente con luz solar. Sólo se permitirá el trabajo en horas de la noche si, a juicio del Supervisor, existe una iluminación artificial que permita la extensión y compactación de manera adecuada.

Durante el transporte de la mezcla deberán tomarse las precauciones necesarias para que al descargarla sobre la máquina pavimentadora.

Al realizar estas labores, se debe tener mucho cuidado que no se manche la superficie por ningún tipo de material, si esto ocurriese se deberá de realizar las acciones correspondientes para la limpieza del mismo por parte y responsabilidad del contratista.

Extensión de la mezcla

La mezcla se extenderá con la máquina pavimentadora, de modo que se cumplan los alineamientos, anchos y espesores señalados en los planos o determinados por el Supervisor. A menos que se ordene otra cosa, la extensión comenzará a partir del borde de la calzada en las zonas por pavimentar con sección bombeada, o en el lado inferior en las secciones peraltadas.

Tras la pavimentadora se deberá disponer un número suficiente de obreros especializados, agregando mezcla caliente y enrasándola, según se precise, con el fin de obtener una capa que, una vez compactada, se ajuste enteramente a las condiciones impuestas en esta especificación. En los sitios en los que a juicio del Supervisor no resulte posible el empleo de máquinas pavimentadoras, la mezcla podrá extenderse a mano. La mezcla se descargará fuera de la zona que se vaya a pavimentar, y distribuirá en los lugares correspondientes por medio de palas y rastrillos calientes, en una capa uniforme y de espesor tal que, una vez compactada, se ajuste a los planos o instrucciones del Supervisor, con las tolerancias establecidas en la presente especificación. Al realizar estas labores, se debe tener mucho cuidado que no se manche la superficie por ningún tipo de material, si esto ocurriese se deberá de realizar las acciones correspondientes para la limpieza del mismo por parte y responsabilidad del contratista.

Compactación de la mezcla

La compactación deberá comenzar, una vez extendida la mezcla, a la temperatura más alta posible con que ella pueda soportar la carga a que se somete sin que se produzcan agrietamientos o desplazamientos indebidos, según haya sido dispuesto durante la ejecución del tramo de prueba. La compactación deberá empezar por los bordes y avanzar gradualmente hacia el centro, excepto en las curvas peraltadas en donde el cilindrado avanzará del borde inferior al superior, paralelamente al eje de la vía y traslapando a cada paso en la forma aprobada por el Supervisor, hasta que la superficie total haya sido

compactada. Los rodillos deberán llevar su llanta motriz del lado cercano a la pavimentadora, excepto en los casos que autorice el Supervisor, y sus cambios de dirección se harán sobre la mezcla ya compactada. Se tendrá cuidado en el cilindrado para no desplazar los bordes de la mezcla extendida; aquellos que formarán los bordes exteriores del pavimento terminado, serán chaflanados ligeramente. La compactación se deberá realizar de manera continua durante la jornada de trabajo y se complementará con el trabajo manual necesario para la corrección de todas las irregularidades que se puedan presentar. Se cuidará que los elementos de compactación estén siempre limpios y, si es preciso, húmedos. No se permitirán, sin embargo, excesos de agua. La compactación se continuará y se concluirá con un apisonado final que borre las huellas dejadas por los compactadores precedentes.

Medición

La carpeta asfáltica, se medirá en metros cúbicos (m^3) del espesor compactado especificado y aceptado, por el Supervisor, de acuerdo a los planos y presentes especificaciones. El volumen se determinará multiplicando la longitud real, medida a lo largo del eje del trabajo, por el ancho y el espesor especificado en los planos u ordenado por el Supervisor. No se medirá ningún volumen por fuera de tales límites.

Pago

El pago se efectuará al precio unitario del Contrato por metro cúbico (m^3), aceptada a satisfacción por el Supervisor, entendiéndose que dicho pago constituirá compensación total por los trabajos prescritos y cubrirá los costos de materiales, mano de obra en trabajos diurnos y nocturnos, herramientas, equipos pesados, transporte y todos los gastos que demande el cumplimiento satisfactorio del contrato, incluyendo los imprevistos.

El precio deberá incluir todos los costos de adquisición, obtención de permisos y derechos de explotación o alquiler de fuentes de materiales y canteras; obtención de licencias ambientales para la explotación de los agregados y la elaboración de las mezclas; las instalaciones provisionales, los costos de arreglo o construcción de las vías de acceso a las fuentes y canteras.

4.5 Costos de las mezclas asfálticas

4.5.1 Precio unitario de la mezcla densa caliente

Tabla 64. Precio unitario de la mezcla asfáltica densa caliente

1. Materiales					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total
1	Diesel	lt	25,00	3,74	93,50
2	Cemento asfáltico 85-100	kg	133,40	10,42	1390,03
3	Grava 3/4	m³	0,33	150,00	49,50
4	Grava 3/8	m³	0,21	160,00	33,60
5	Arena	m³	0,25	180,00	45,00
6	filler natural	kg	0,03	136,50	4,09
Total materiales					1615,72
2. Mano de obra					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Ayudante	hr	0,07	10,0	0,7
2	Capataz	hr	1,80	18,0	32,4
3	Chofer	hr	1,50	18,0	27,0
4	Operador camión dist. de asfaltos	hr	1,50	10,0	15,0
5	Operador b	hr	0,08	10,0	0,8
Subtotal mano de obra					75,9
Cargas sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71,18%)				67,0	50,85
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	18,94
Total mano de obra					145,69
3. Equipo, maquinaria y herramientas					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Camión distribuidor de asfalto	hr	1,50	159,9	239,85
2	Cargador frontal sobre ruedas	hr	0,05	317,4	15,87
3	Compactador de neumáticos	hr	0,04	191,9	7,67
4	Compactador manual de rodillo liso	hr	0,08	21,2	1,69
5	Planta diluidora de asfalto	hr	0,09	106,6	9,59
Herramientas = (% del total de mano de obra)				5,0	7,28
Total equipo, maquinaria y herramientas					281,97
4. Gastos generales y administrativos					
				Precio productivo	Costo total
Gastos generales = % de 1+2+3				10,0	204,34
Total gastos generales y administrativos					204,34
5. Utilidad					
				Precio productivo	Costo total
Utilidad= % de 1+2+3+4				8,0	179,82
Costo total utilidad					179,82
6. Impuestos					
				Precio productivo	Costo total
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	75,01
costo total impuestos					75,01
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6) =					2502,55
Total precio unitario adoptado (en bolivianos) =					2502,55

Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Precio unitario de la mezcla densa tibia

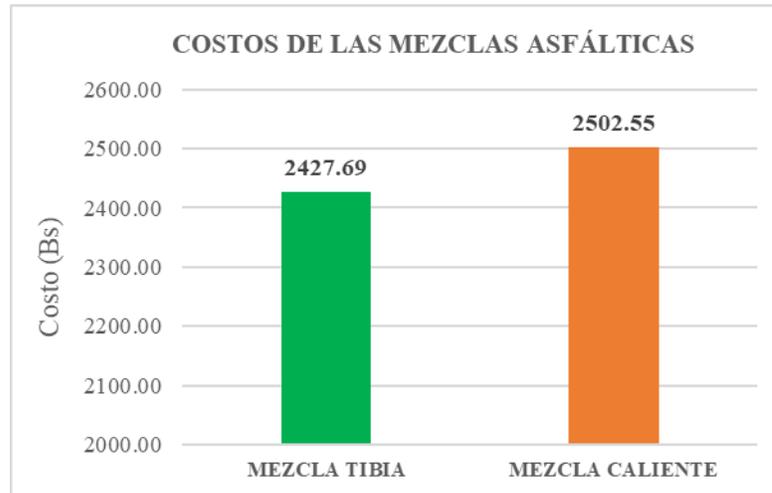
Tabla 65. Precio unitario de la mezcla asfáltica densa tibia

1. Materiales					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Diesel	lt	18,00	3,74	67,32
2	Cemento asfáltico 85-100	kg	133,34	10,42	1389,40
3	Grava 3/4	m³	0,33	152,00	50,16
4	Grava 3/8	m³	0,21	162,00	34,02
5	Arena	m³	0,25	180,00	45,00
6	filler natural	kg	0,01	136,50	1,36
8	Aditivo Zycotherm	lt	7,00	20,00	140,00
Total materiales					1727,28
2. Mano de obra					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Ayudante	hr	0,05	10,0	0,5
2	Capataz	hr	1,30	18,0	23,4
3	Chofer	hr	1,00	18,0	18,0
4	Operador camión dist. de asfaltos	hr	0,80	10,0	8,0
5	Operador b	hr	0,06	10,0	0,6
Subtotal mano de obra					50,5
Cargas sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71,18%)				67,00	33,84
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	12,60
Total mano de obra					96,93
3. Equipo, maquinaria y herramientas					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Camión distribuidor de asfalto	hr	0,80	159,9	127,92
2	Cargador frontal sobre ruedas	hr	0,03	317,4	9,52
3	Compactador de neumáticos	hr	0,04	191,9	7,67
4	Compactador manual de rodillo liso	hr	0,08	21,2	1,69
5	Planta diluidora de asfalto	hr	0,06	106,6	6,39
Herramientas = (% del total de mano de obra)				5,0	4,85
Total equipo, maquinaria y herramientas					158,06
4. Gastos generales y administrativos					
				Precio productivo	Costo total
Gastos generales = % de 1+2+3				10,0	198,23
Total gastos generales y administrativos					198,23
5. Utilidad					
				Precio productivo	Costo total
Utilidad= % de 1+2+3+4				8,0	174,44
Costo total utilidad					174,44
6. Impuestos					
				Precio productivo	Costo total
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	72,77
Costo total impuestos					72,77
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6) =					2427,69
Total precio unitario adoptado (En bolivianos) =					2427,69

Fuente: Elaboración propia

4.5.3 Análisis de los costos de las mezclas densa tibia y caliente

Gráfico 34. Costos de las mezclas asfálticas densa tibia y caliente



Fuente: Elaboración propia

4.5.4 Análisis técnico de las mezclas asfálticas

El análisis técnico de las mezclas asfálticas calientes y tibias se enfoca en la determinación de las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas a diferentes temperaturas. La principal diferencia radica en que las mezclas densas calientes se analizan a temperaturas más altas, mientras que las mezclas densas tibias se analizan a temperaturas más bajas ambas teniendo propiedades mecánicas aceptables.

Estableciendo que la mezcla densa caliente es técnicamente mejor en sus propiedades mecánicas frente a la mezcla densa tibia.

4.5.5 Análisis económico de las mezclas asfálticas

El análisis económico de la mezcla asfáltica densa caliente es un estudio que se realiza para determinar el costo-beneficio de la producción y colocación de este tipo de mezcla en comparación con otras alternativas. Teniendo una diferencia de cinco por ciento en costo económico pudiendo reducir este porcentaje con el equipo más adecuado. Por lo tanto, realizado el análisis económico se escoge la mezcla densa tibia como la mezcla más económica.

4.5.6 Análisis técnico – económico de las mezclas asfálticas

Realizado el análisis técnico y económico se determina que la mezcla asfáltica densa tibia es más económica que una mezcla densa caliente y que la mezcla asfáltica densa caliente es mejor técnicamente frente a la mezcla densa tibia.

4.6 Aplicabilidad de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas densas tibias se pueden diseñar y aplicar para todo tipo de tráfico ya sea para un tráfico liviano, mediano y pesado. Además de que las mismas pueden ofrecer múltiples beneficios en el proceso de mezcla, transporte, tendido y compactación de la mezcla asfáltica, además permite menores temperaturas de mezclado. Por su parte las mezclas asfálticas densas calientes de igual manera pueden ser aplicadas para todo tipo de tráfico ya sea para un tráfico liviano, mediano y pesado.

4.7 Ventajas y desventajas de las mezclas densa tibia y caliente

Tabla 66. Ventajas y desventajas de las mezclas densa tibia y caliente

	Mezcla asfáltica densa caliente	Mezcla asfáltica densa tibia
Temperatura	Temperaturas mayores de mezclado (145-160) °C	Temperaturas menores de mezclado (110-140) °C
Estabilidad	Mayor estabilidad (2011-2340) lb	Menor estabilidad (1840-2268) lb
Fluencia	Fluencia estable.	Fluencia estable.
Ventajas	Técnicamente mejores propiedades.	Económicamente más baratas.
	Mayor información sobre las mezclas calientes.	Incremento adherencia agregado – asfalto.
	Menor porcentaje de vacíos (3,02-3,65) %	Mejora de la seguridad laboral.
	Límites de intervalos de confianza.	Mejor trabajabilidad para el operador.
		Mejor durabilidad.
Desventajas	Económicamente más costosas.	Mayor porcentaje de vacíos (3,18-4,62) %
	Mayor emisión de gases.	Control riguroso de la temperatura.
	Mayor golpe de calor al operador.	Menor información sobre las mezclas tibias.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se concluye que en la comparación de mezclas asfálticas densa caliente y mezclas asfálticas densa tibia realizada en la investigación, la mezcla asfáltica densa caliente ofrece mejores características en cuanto a sus propiedades mecánicas de estabilidad y fluencia a diferencia de las mezclas asfálticas densa tibia realizando la comparación entre ambas mezclas, determinando la mezcla óptima de temperatura para cada diseño, pudiendo así realizar una diferencia entre las mismas, se realizó la validación de la hipótesis planteada en la investigación ya que las mezclas asfálticas densa caliente son mejores en cuanto a sus propiedades mecánicas de estabilidad y fluencia, pero a su vez las mezclas asfálticas densa tibia son mezclas con resultados interesantes a tomar en cuenta, si bien no son superiores a las mezclas asfálticas densa caliente son mezclas que cumplen con las normativas Marshall por lo cual estas mezclas pueden ser utilizadas y operadas siempre y cuando se considere la temperatura de aplicación y el aditivo correspondiente a utilizar.

Se demostró que un mismo cemento asfáltico puede ser utilizado en mezclas asfálticas densas calientes y mezclas asfálticas densas tibias incorporando aditivo zycotherm en el cemento asfáltico para el diseño Marshall obteniendo resultados considerablemente positivos en las propiedades mecánicas para las mezclas asfálticas densa tibia, mismas que se elaboraron a temperaturas menores que las mezclas densas calientes.

Analizando las temperaturas de elaboración de las mezclas, usando el aditivo Zycotherm para la mezcla asfáltica densa tibia a una temperatura de 100°C, sus propiedades mecánicas reducen, lo cual nos dice que el aditivo trabaja mejor a mayores temperaturas, en la mezcla densa caliente a una temperatura de 143°C, se mejoró sus propiedades mecánicas, logrando demostrar que el aditivo funciona para las mezclas calientes y que a una temperatura elevada de 170°C, sin utilizar el aditivo, la mezcla densa caliente pierde sus propiedades mecánicas, por lo tanto, no es muy efectiva a temperaturas elevadas por encima del rango establecido de temperaturas de elaboración de mezclas asfálticas.

5.2 Recomendaciones

Concluido el trabajo de investigación se debe considerar las siguientes recomendaciones:

- Es muy importante controlar el diseño de las mezclas asfálticas densa caliente y tibia según las normativas: AASTHO y ASTM, así como también para los agregados pétreos y el cemento asfáltico para que se pueda realizar un buen diseño acorde a las normativas y que cumpla con las especificaciones correspondientes.
- Controlar la temperatura de la mezcla, es importante que la temperatura de la mezcla no sea demasiado alta ni demasiado baja, ya que esto puede afectar su calidad y desempeño.
- Evitar en lo posible el enfriamiento de la mezcla asfáltica en el momento de realizar el moldeo, para evitar la pérdida de la temperatura adecuada y por correspondiente evitar resultados alterados.
- Ajustar el diseño de la mezcla, el diseño de la mezcla debe ser ajustado para tener en cuenta las propiedades específicas de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas densa tibia, como la viscosidad y la densidad.
- Tener mucho cuidado y estar muy atento al momento de manipular el cemento asfáltico al momento de calentarlo ya que si no se consideran las medidas de seguridad apropiadas pueden provocar quemaduras.