

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras son de vital importancia para el departamento de Tarija, y la gran mayoría están hechas de pavimentos flexibles, es por esto que el desempeño de las mismas depende de la calidad de los materiales, procesos constructivos y también de un buen diseño. El diseño de la mezcla asfáltica utilizada en la capa de rodadura es lo que nos concierne para ello se deberá estudiar y desarrollar la selección de los materiales para el diseño de las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) para diferentes regiones del departamento.

Debido que nuestro departamento hay diversidad de climas y temperaturas extremas, afectan la estructura del pavimento, por ello es necesario determinar los tipos de cementos asfálticos requeridos de acuerdo a la clasificación por grado de desempeño, que sería necesario utilizar en cada zona del departamento.

En nuestro medio la selección del cemento asfáltico no considera de forma directa las variaciones de temperaturas por ello es inevitable que no se presenten las fallas por ahuellamiento, agrietamiento térmico y fatiga debido a la exposición que sufren mediante el clima extremo durante su vida útil los pavimentos flexibles, lo que producen dichas fallas.

En el presente trabajo se pretende realizar una zonificación SUPERPAVE en el grado de desempeño del cemento asfáltico, utilizando registros de temperaturas ambientales extremas del departamento de Tarija, con la finalidad de determinar el tipo de cemento asfáltico a utilizar en las distintas regiones del departamento.

Dentro del aporte teórico se logrará por medio de la teoría desarrollada por parte del método SUPERPAVE, información de estaciones climatológicas del SENAMHI

(Servicio Nacional de meteorología e Hidrología) y AASANA (Administración de Aeropuertos y Servicios Auxiliares de la Navegación Aérea).y el programa ArcGIS, para representar la información obtenida mediante un mapa, esto permitirá que se pueda seleccionar el cemento asfáltico apropiado para las diversas zonas en función a sus temperaturas extremas de cada región del departamento; la aplicación práctica será la utilización de los cementos asfálticos por grado de desempeño en los diversos usos tanto en construcción, mantenimiento de los pavimentos flexibles; la relevancia social será la utilización del cemento asfáltico adecuado para las diversas regiones evitando fallas por temperaturas, debido a que el desempeño del cemento asfáltico depende fuertemente de las temperaturas a la que va a estar expuesta.

1.2. SITUACIÓN PROBLÉMICA

Uno de los componentes de la mezcla asfáltica es el cemento asfáltico, que aunque no es el que se encuentra en mayor proporción, cumple con varias de las funciones principales de la mezcla asfáltica: cohesión, flexibilidad y durabilidad. Estas características se ven afectadas directamente por las condiciones de tránsito y las condiciones climáticas a las que se va a someter la mezcla asfáltica.

En las diferentes regiones del departamento es muy frecuente encontrar pavimentos flexibles fisurados, deformados o con cierto tipo de fallas, a los pocos años de su construcción o rehabilitación, siendo la causa más importante en estos deterioros la carga actuante, aunque el efecto de la temperatura también debe ser considerado y no solo sobre el pavimento construido, sino en los procesos previos de selección de los cementos asfálticos y en los aspectos relacionados con el diseño de la mezcla asfáltica.

Debido que nuestro departamento hay diversidad de climas y temperaturas extremas, afectan la estructura del pavimento, por ello es necesario determinar los tipos de cementos asfálticos requeridos de acuerdo a la clasificación por grado de desempeño, que sería necesario utilizar en cada zona del departamento.

En nuestro medio la selección del cemento asfáltico no considera de forma directa las variaciones de temperaturas por ello es inevitable que no se presenten las fallas por ahuellamiento, agrietamiento térmico y fatiga debido a la exposición que sufren mediante el clima extremo durante su vida útil los pavimentos flexibles, lo que producen dichas fallas.

Mediante una zonificación SUPERPAVE en el grado de desempeño del cemento asfáltico para el departamento de Tarija en función a las temperaturas extremas se podría facilitar la utilización del cemento asfáltico en la elaboración de mezclas asfálticas que sean adecuados para las diferentes regiones y usos en las carreteras del departamento de Tarija, así poder reducir los tipos de fallas debido al clima y a las cargas el tráfico en las carreteras, dando mayor durabilidad, comodidad y seguridad.

1.3. PROBLEMA

¿Cuál será la incidencia que puede tener una zonificación SUPERPAVE en la selección del cemento asfáltico por grado de desempeño a utilizar en la elaboración de mezclas asfálticas para las distintas regiones del departamento de Tarija?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Realizar una zonificación SUPERPAVE, utilizando registros de temperaturas ambientales extremas del departamento de Tarija, con la finalidad de determinar los cementos asfálticos por grado de desempeño a utilizar en nuestro departamento.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar el método SUPERPAVE en el grado de desempeño del cemento asfáltico.
- Analizar la consistencia de los datos de las estaciones meteorológicas.

- Aplicar el modelo SHRP del método SUPERPAVE, para determinar las temperaturas del pavimento.
- Elaborar Mezclas asfálticas Marshall para la zona fría del departamento con granulometría SUPERPAVE y cementos asfálticos correspondientes para esta zona según la zonificación con una confiabilidad del 98%.
- Elaborar Mezclas asfálticas Marshall para la zona templada del departamento con granulometría SUPERPAVE y cementos asfálticos correspondientes para esta zona según la zonificación con una confiabilidad del 98%.
- Elaborar Mezclas asfálticas Marshall para la zona cálida del departamento con granulometría SUPERPAVE y cementos asfálticos correspondientes para esta zona según la zonificación con una confiabilidad del 98%.
- Realizar el mapa de zonificación usando el programa ArcGIS, que identifique el cemento asfáltico PG adecuado para las distintas regiones del departamento de Tarija con una confiabilidad del 50% y del 98%.
- Validación del mapa mediante datos de otras estaciones meteorológicas y otros bancos de agregados del departamento.
- Extrapolación de parámetros obtenidos a otras zonas del departamento con similitud de condiciones.

1.5. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis

Es posible realizar la zonificación SUPERPAVE para determinar los cementos asfálticos por grado de desempeño a utilizar en nuestro departamento.

1.5.2. Identificación de variables

Variable Dependiente:

- Cemento asfáltico por grado de desempeño.

Variable Independiente:

- Temperaturas extremas: Temperatura máxima del pavimento, temperatura intermedia del pavimento y temperatura mínima del pavimento.

1.5.3. Conceptualización y operacionalidad de las variables

❖ **Variable Dependiente:**

Tabla 1. *Variable Dependiente*

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/ Acción
Cemento asfáltico por grado de desempeño	El grado de desempeño es el rango de temperaturas, máximas a mínimas, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El Grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta	Tipos de ensayos	Experimental	100% Laboratorio
			Teóricos	Teoría
		Tipos de cementos asfálticos	Especificación SUPERPAVE	PG
		Tipos de temperaturas	Temperaturas máximas de la zona	°C
			Temperaturas intermedias de la zona	°C
			Temperaturas mínimas de la zona	°C

	durante su vida útil.			
--	-----------------------	--	--	--

Fuente: Elaboración propia

❖ **Variables Independientes:**

Tabla 2. *Variables independientes*

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/ Acción
Temperatura máxima del pavimento	Es la temperatura máxima a 20 milímetros de profundidad bajo la superficie del pavimento obtenida mediante fórmula que está en función a la temperatura promedio máxima y latitud del lugar de la obra, y la confiabilidad.	Tipos de temperatura ambiente	Máxima extrema de la zona	°C
		Confiabilidad	Porcentaje	%
Temperatura intermedia del pavimento	Es la temperatura intermedia del pavimento obtenida mediante fórmula que está en función a la temperatura máxima del pavimento y temperatura	Tipos de temperatura ambiente	Media de las temperaturas máximas y mínimas del pavimento.	°C
		Confiabilidad	Porcentaje	%

	mínima del pavimento.			
Temperatura mínima del pavimento	Es la temperatura mínima en el pavimento obtenida mediante fórmula que está en función a la temperatura mínima diaria de todos los años y latitud del lugar de la obra, y la confiabilidad.	Tipos de temperatura ambiente	Mínima extrema de la zona	°C
		Confiabilidad	Porcentaje	%

Fuente: Elaboración propia

1.6. ALCANCE DEL TRABAJO

- La presente investigación se realizará para el departamento de Tarija,
- La información de las temperaturas extremas de las estaciones meteorológicas del departamento de Tarija, deberán tener un periodo no menor a veinte años de servicio y se realizar su análisis de consistencia.
- Para transformar las temperaturas ambientales a temperaturas del pavimento aplicar las ecuaciones del modelo SHRP del método SUPERPAVE.
- Los cementos asfálticos por grado de desempeño se selecciona para cada estación meteorológica, de acuerdo a las condiciones de las temperaturas de la zona.
- El programa ArcGIS se utiliza para la elaboración de los mapas de la zonificación SUPERPAVE para una confiabilidad del 50% y del 98%.
- Debido que en nuestro país no existe conocimiento para el uso del cemento asfáltico por grado de desempeño se utilizara cementos asfálticos por

equivalencias de acuerdo a la clasificación por penetración para el diseño de las mezclas asfálticas.

- Los agregados para el diseño de las mezclas asfálticas serán de bancos de las zonas.
- Las mezclas asfálticas se diseñara en caliente, para tráfico pesado.
- La rotura de las briquetas se realizará a las temperaturas máximas a la que el pavimento flexible estará expuesto durante su funcionamiento para así obtener la resistencia del pavimento a altas temperaturas.
- En Bolivia la información sobre el método SUPERPAVE es mínima, este método requiere de laboratorios especializados y en el país no se cuenta con estos por lo tanto se realizaran los ensayos que se realiza en nuestro departamento para la caracterización del cemento asfáltico.

Los ensayos del método SUPERPAVE son:

- Viscosímetro Rotacional Brookfield (RV)
- Reómetro de Corte Dinámico (DSR)
- Reómetro de Viga de Flexión (BBR)
- Ensayo de Tracción Directa (DTT)
- Horno de Película Delgada Rotatoria (RTFO)
- Envejecimiento en Recipiente Presurizado (PAV)

Los ensayos que se realiza en nuestro medio son los que se realizará y son los siguientes:

- Penetración
- Viscosidad Saybolt-Furol
- Punto de inflamación
- Peso específico
- Punto de ablandamiento

1.7. UNIDAD DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL POR VARIABLES

1.7.1. Unidad de estudio

Tipos de cemento asfáltico por grado de desempeño de acuerdo a la zonificación SUPERPAVE para la elaboración de mezclas asfálticas.

1.7.2. Población

Diferentes grados de desempeño del cemento asfáltico para la elaboración de mezclas asfálticas para las regiones obtenidas de acuerdo a las temperaturas extremas del pavimento departamento de Tarija.

Dentro de la población se explica el método y los valores tanto de la población como de la muestra en el siguiente punto.

1.7.3. Selección de las técnicas de muestreo

Se utilizara la técnica de muestreo estratificado donde:

Tabla 3. Datos de nivel de confianza de 95%

Datos de nivel de confianza de 95%	
Valor del nivel de confianza (z)	1,96
Probabilidad de que ocurra el suceso (p)	0,5
No probabilidad de que ocurra el suceso (q)	0,5
Error probable (e)	0,05

Fuente: Introducción a la probabilidad y estadística

- ❖ **Nivel de confianza (N.C.):** Es el grado en el que se justifica estimar que una muestra aleatoria indica el verdadero valor de la población. Por ejemplo: un N.C.

95% quiere decir que hay 95 posibilidades entre 100 de que los resultados de la muestra representen las condiciones verdaderas de la población.

- ❖ **Valor del nivel de confianza o coeficiente de confianza (z):** La probabilidad de que un intervalo de confianza contenga el parámetro estimado se denomina coeficiente de confianza.
- ❖ **Probabilidad de que ocurra el suceso (p):** Es la probabilidad de éxito que ocurra el suceso.
- ❖ **No probabilidad de que ocurra el suceso (q):** Es la probabilidad de que no ocurra el suceso.
- ❖ **Error probable (e):** Es el error que estamos dispuestos a aceptar de equivocarnos al seleccionar nuestra muestra.

Tabla 4. Niveles de confianza y coeficientes de confianza

Nivel de Confianza(N.C.)	Coeficiente de Confianza (z)
50%	0,574
85%	1,44
90%	1,64
95%	1,96
98%	2,33
99%	2,58

Fuente: Introducción a la probabilidad y estadística

➤ **Población:**

Ecuación 1. Obtención del número de ensayos de la población

$$N = \frac{z^2 * p * q}{e^2}$$

$$N = \frac{1,96^2 * 0,05 * 0,05}{0,05^2}$$

$$N = 384,16 \text{ ensayos}$$

Entonces se asume: $N = 384$ ensayos

➤ **Muestra:**

Ecuación 2. Obtención del número de ensayos de la muestra

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i * p_i * q_i}{N * \frac{e^2}{z^2} + \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n N_i * p_i * q_i}$$

$$n = 196 \text{ Ensayos}$$

Tabla 5. *Números de ensayos a realizar para una confiabilidad de 95%*

Ensayos	Cantidad Ni	Pi	Qi	Ni*pi*qi	Wi	Ni	Asumido
Caracterización de los agregados							
Granulometría de los agregados	18	0,5	0,5	4,5	0,047	9,0	9

Equivalente de arena	12	0,5	0,5	3	0,031	6,0	6
Desgaste de los ángeles	12	0,5	0,5	3	0,031	6,0	6
Durabilidad a los sulfatos	12	0,5	0,5	3	0,031	6,0	6
Caras fracturadas	12	0,5	0,5	3	0,031	6,0	6
Caracterización del cemento asfáltico							
Viscosidad Saybolt Furol	12	0,5	0,5	3	0,031	6	6
Penetración	18	0,5	0,5	4,5	0,047	9	9
Puntos de inflamación	12	0,5	0,5	3	0,031	6	6
Punto de ablandamiento	12	0,5	0,5	3	0,031	6	6
Peso específico	12	0,5	0,5	3	0,031	6	6
Mezclas asfálticas							
Briquetas con cemento asfáltico PG 58-28	84	0,5	0,5	21	0,219	42	42
Briquetas con cemento asfáltico PG 64-22	84	0,5	0,5	21	0,219	42	42
Briquetas con cemento asfáltico PG 70-22	84	0,5	0,5	21	0,219	42	42
TOTAL	384			96	1		192

Fuente: Elaboración propia

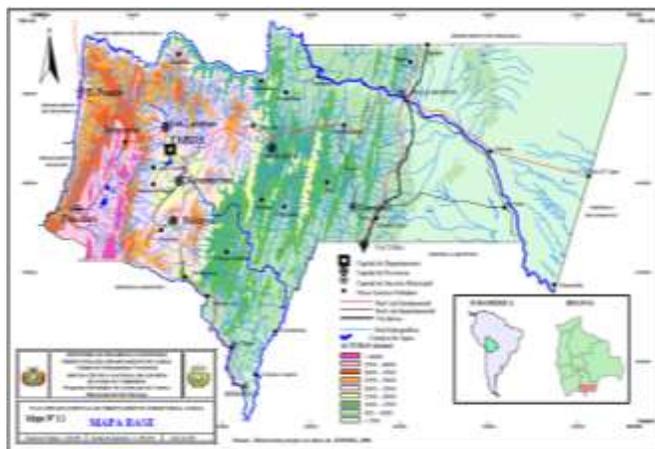
MARCO TEÓRICO

2.1. RECONOCIMIENTO DE LA ZONA EN ESTUDIO

2.1.1. Ubicación y límites geográficos del departamento de Tarija

El Departamento de Tarija, ubicado al sur de Bolivia, limita al norte con el Departamento de Chuquisaca, al sur con la República Argentina, al este con la República del Paraguay y al oeste con los Departamentos de Chuquisaca y Potosí. Geográficamente se encuentra entre los paralelos 20°50' y 22°50' de latitud sur y los meridianos 62°15' a 65°20' de longitud oeste. Tiene una extensión territorial de 37.623 km², que representan 3,4% del territorio nacional. (Figura 1).

Figura 1. Ubicación y límites geográficos del departamento de Tarija



Fuente: Unidad de Planificación y Programación de Operaciones

2.1.2. El clima de del departamento de Tarija

El departamento de Tarija presenta diferentes regiones o zonas bioclimáticas con temperaturas que fluctúan alrededor de los 20°C y precipitaciones medias anuales de 500 a 600 mm. El clima es frío y seco en la zona andina, con una temperatura media anual de 9,5°C.

La zona de los valles tiene clima templado y temporalmente húmedo, con temperatura media anual de 17,5°C. El frente subandino, las temperaturas sobrepasan los 20°C como media anual y los índices de humedad van aumentando hacia la región Sur-Este. La zona de las llanuras chaqueñas la temperatura media anual superan los 25°C.

Tabla 6. Características de las zonas del departamento de Tarija

Fuente: Unidad de Planificación y Programación de Operaciones

ZONA	CLIMA	ALTURA m.s.n.m.	TEMPERATURA PROMEDIO °C
Alta (Andina, montañosa)	Frio	2300 a 4600	9,5
Valle Central	Templado Semiárido	1200 a 2200	17,5
Subandina	Semiárido Húmedo	560 a 2600	20,9
Llanura Chaqueña	Cálido Seco y Húmedo	400 a 1000	25

Figura 2. Zonas del departamento de Tarija



Fuente: Unidad de Planificación y Programación de Operaciones

2.1.3. Efectos de la temperatura en los pavimentos flexibles

La temperatura es un factor climático principal por su afectación en los pavimentos, principalmente para los flexibles, ya que las capas asfálticas varían su módulo de

rigidez y su comportamiento en general de acuerdo con las variaciones de los cambios de temperatura.

En climas cálidos, la deformación permanente del pavimento flexible se origina por los cambios de temperaturas, comportándose el asfalto como un material viscoso, obligando a una buena selección de material asfáltico en condiciones imperantes.

En los climas de temperaturas bajas, el pavimento puede presentar agrietamientos térmicos debido a la utilización de cementos asfálticos muy duros, generándose una contracción de la carpeta asfáltica; y en temperaturas intermedias actúa como una combinación de los dos fenómenos.

A continuación se explica su comportamiento en sus tres condiciones climáticas:

2.1.3.1. Comportamiento del cemento asfáltico a alta temperatura

En las condiciones de climas cálidos o bajo cargas vehiculares con movimientos despacio de vehículos pesados, el asfalto actúa como un líquido viscoso. En estas circunstancias, el agregado de la mezcla asfáltica es la que soporta la carga vehicular más que el asfalto. En los asfaltos líquidos recibe un comportamiento plástico cuando comienza a fluir y no retorna a su posición original, por tal motivo en climas calientes, algunas mezclas asfálticas menos estables, fluyen bajo cargas repetidas, se producen una acumulación de deformación al paso de vehículos llamado ahuellamiento en función también de las características del agregado.

2.1.3.2. Comportamiento del cemento asfáltico a bajas temperatura

En épocas frías o bajo cargas que actúan rápidamente, el asfalto se comportará como un sólido elástico que posee un esfuerzo último, que siendo cargado más de su nivel de carga máxima puede fracturarse. Estas grietas por temperatura pueden ocurrir en los pavimentos asfálticos en épocas frías, cuando la carga térmica es aplicada por esfuerzos de tensión internos que pueden suceder en pavimentos cuando se contrae, siendo limitada por las capas inferiores base y subbase.

2.1.3.3. Comportamiento del cemento asfáltico a temperatura intermedias

En la mayor cantidad de pavimentos son construidos en lugar con climas que experimentan temperaturas bajas o altas en periodos cortos de tiempo diarios. A estas temperaturas, los ligantes asfálticos tienen comportamiento de un líquido viscoso y de un sólido elástico.

También en ocasiones el gradiente térmico produce diariamente cambios volumétricos en el interior de la carpeta asfáltica, lo que produce esfuerzos cíclicos de tracción y compresión, provocando fallas por fatiga.

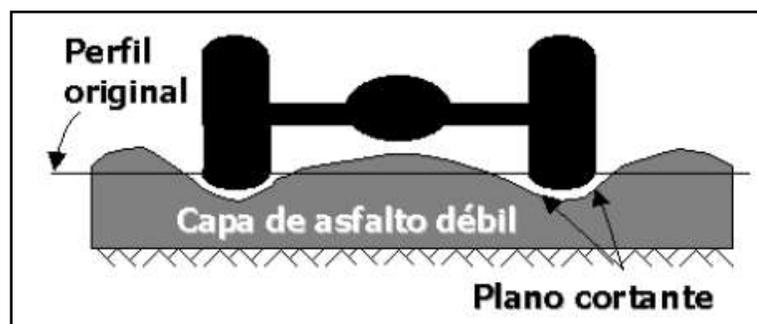
2.1.4. Fallas del cemento asfáltico a distintas temperaturas

2.1.4.1. Deformaciones permanentes debido a temperaturas altas

La deformación permanente es el deterioro caracterizado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original.

Este tipo de ahuellamiento es causado por una mezcla asfáltica cuya resistencia al corte es demasiado baja para soportar las cargas pesadas repetidas a las cuales está sometida (Figura 3).

Figura 3. Ahuellamiento de una mezcla asfáltica débil



Fuente: Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas SUPERPAVE

2.1.4.2. Agrietamiento térmico debido a bajas temperaturas

El agrietamiento por baja temperatura es un deterioro causado más por las condiciones adversas del medio ambiente que por la aplicación de las cargas del tránsito. Se caracteriza por grietas transversales (es decir, perpendiculares a la dirección del tránsito) intermitentes que se producen con un espaciamiento notablemente uniforme (Figura 4). Las grietas por baja temperatura se forman cuando una capa de pavimento asfáltico se contrae en climas fríos.

Figura 4. *Grietas por baja temperatura*



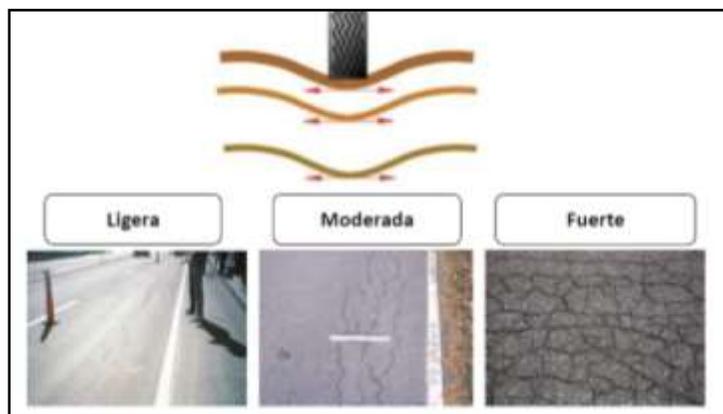
Fuente: Propia

2.1.4.3. Fatiga debido a temperaturas intermedias

Como el ahuellamiento, la fisuración por fatiga es un tipo de deterioro que con mucha frecuencia se produce en la huella donde las cargas pesadas son aplicadas.

Las fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella (esto en la dirección del tránsito) son un signo prematuro de la fisuración por fatiga. Esta es un deterioro de tipo progresivo porque, en algún momento, las fisuras iniciales se unirán con otras, causando aún más fisuras. Como se puede observar en la (Figura 5).

Figura 5. *Fisuración por fatiga*



Fuente: Propia

2.1.5. Mezclas asfálticas

2.1.5.1. Definición de mezcla asfáltica

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

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

2.1.6. Método SUPERPAVE para la selección de los materiales para las mezclas asfálticas en caliente

Según los investigadores del programa SHRP, las propiedades medidas de los ligantes asfálticos mediante los ensayos SUPERPAVE, pueden ser relacionadas directamente con su comportamiento en servicio por principios de ingeniería. Los ensayos se realizan

a las temperaturas que se encuentran los pavimentos asfálticos en servicio, para proveer mejor comportamiento del mismo en regiones climáticas específicas. Básicamente la estructura del pavimento, el diseño de la mezcla y las propiedades de la carpeta tal como fue construida junto con las propiedades del ligante, determinan el comportamiento del pavimento durante su vida útil. Por esto, el método busca principalmente la selección adecuada de los ligantes asfálticos en función del clima y la carga. SUPERPAVE intenta mejorar el comportamiento de los asfaltos para evitar que contribuya a producir en los pavimentos deformaciones permanentes, agrietamiento por fatiga y agrietamiento por bajas temperaturas. Para conseguir este objetivo es que se realizan una serie de ensayos.

El Método SUPERPAVE está conformado por tres componentes básicos:

- Las especificaciones para los cementos asfálticos fundamentados en el desempeño.
- El procedimiento de diseño de las mezclas asfálticas.
- La técnica de análisis de mezclas para predecir su desempeño.

Estos componentes fueron creados para aplicarse de manera conjunta, especialmente las especificaciones de los ligantes que se lo realizaron primero, seguido después por el procedimiento de diseño de la mezclas asfálticas, mientras que las técnicas de análisis de mezcla solo se lo ha realizado de manera limitada para algunos ensayo y proyectos experimentales o para la realización de otras aplicaciones especiales, manteniéndose esta situación hasta el presente.

Por este motivo, se puede decir que muchos países es habitual encontrar para el análisis de mezclas asfálticas el empleo de pruebas de desempeño no correspondientes al Método del SUPERPAVE.

Adicionalmente el método SUPERPAVE, clasifica a los ligantes en función de un rango de temperatura, el cual el pavimento tendrán propiedades físicas adecuadas para así tener un buen comportamiento a las diferentes formas de fallas relacionadas al tipo

de ligante. Por eso es necesario determinar las temperaturas extremas a la que los pavimentos asfálticos estarán sometidos de acuerdo a su ubicación geográfica.

El Método SUPERPAVE tiene como finalidad controlar la deformación permanente, el agrietamiento por fatiga y el agrietamiento a bajas temperaturas, ocasionadas por el cambio de temperaturas tanto altas como mínimas, presentadas en el pavimento para modelar su comportamiento, considerando que el ligante asfáltico es un material susceptible a las variaciones térmicas en los pavimentos.

2.1.7. Selección de materiales

2.1.7.1. Agregados pétreos

Los agregados pétreos son materiales granulares sólidos inertes, usados para ser mezclado en diferentes tamaños de partículas graduadas, como parte de una mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen la arena, la grava, la escoria de alto horno, o la roca triturada y polvo de roca. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad soportante.

2.1.7.2. Importancia del agregado en una mezcla asfáltica

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados pétreos y el asfalto; los agregados por su parte son de gran importancia ya que en una mezcla asfáltica constituyen entre el 90 y el 95 por ciento en peso, y entre el 75 y 85 por ciento en volumen; es de mencionar que la calidad de la mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales constituyentes y la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los materiales pétreos que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica, específicamente en lo que se refiere a una buena distribución granulométrica.

2.1.7.3. Agregados minerales SUPERPAVE

Los diferentes criterios establecidos por el método SUPERPAVE para la evaluación de los agregados minerales para mezclas asfálticas en caliente, los cuales forma parte del programa estratégico de investigación en carreteras (Strategic Highway Research Program, SRHP), el cual está dirigido a mejorar el desempeño y vida útil de los pavimentos. Los investigadores de SHRP confiaron en la experiencia de esos expertos y en la suya propia para identificar dos categorías de propiedades de los agregados que se necesitan en el sistema de SUPERPAVE, si bien no se desarrolló ningún nuevo procedimiento para ensayar agregados, si se refinaron los procedimientos existentes para adaptarlos al sistema, estas propiedades son: las propiedades de consenso y las propiedades de la fuente de origen; así como también una nueva forma de especificación granulométrica del agregado; esto se llama estructura del agregado de diseño.

2.1.7.3.1. Propiedades de Consenso

Las propiedades de consenso son consideradas críticas para alcanzar un alto comportamiento de la mezcla asfáltica y se asocian a la calidad del agregado para producir una mezcla resistente y durable. Estas propiedades son:

- Angularidad del agregado grueso (Caras fracturadas).
- Angularidad del agregado fino (Vacíos sin compactar).
- Partículas planas y alargadas.
- Contenido de arcilla.

2.1.7.3.1.1. Angularidad del Agregado Grueso

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado y resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje en peso del agregado mayor de 4.75 mm con una o más caras fracturadas (Norma ASTM D 5821-95).

2.1.7.3.1.2. Contenido de Arcilla

El contenido de arcilla, es el porcentaje de material arcilloso presente en la fracción de agregado menor de 4.75 mm (norma ADTEM D T 2419 "Finos plásticos en agregados graduados y suelos usando el ensayo del equivalente de arena").

2.1.7.3.2. Propiedades de la fuente de origen

Además de las propiedades de consenso, los expertos pensaron que habría otras características críticas del agregado. Valores específicos son establecidos por las características de la zona, aun cuando esas propiedades son relevantes durante el proceso de diseño de la mezcla, podrían también ser utilizadas como un control de aceptación de la fuente de origen, estas propiedades son: la Tenacidad y Durabilidad.

2.1.7.3.2.1. Tenacidad

La tenacidad es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de abrasión de los Ángeles. La norma es ASTM C-131. Este ensayo estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante el manipuleo, construcción y servicio. Los valores de pérdida máximos están aproximadamente entre 35 y 45%.

2.1.7.3.2.2. Durabilidad

Es el porcentaje de pérdida del material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los áridos sometidos al ataque con sulfato de sodio o sulfato de magnesio. La norma es la AASHTO T 104 ". Los valores máximos de pérdida son aproximadamente de 10 a 20% para cinco ciclos.

2.1.7.3.3. Granulometría SUPERPAVE

Para especificar la granulometría, SUPERPAVE ha modificado un enfoque ya en uso en algunas agencias. Utiliza el exponencial 0.45 en la carta granulométrica para definir una granulometría permitida. Ver la figura 6.

Figura 6. Ilustración de cómo se grafican las abscisas



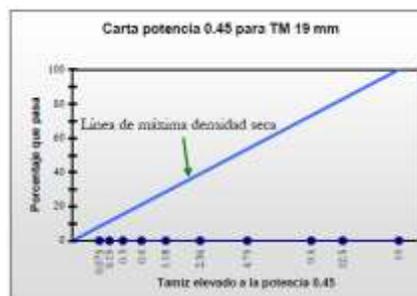
Fuente: Instituto mexicano del transporte

SUPERPAVE emplea la serie estándar de tamices de ASTM y las siguientes definiciones con respecto al tamaño del agregado:

- Tamaño máximo nominal: Tamaño de tamiz mayor que el primer tamiz que retiene más del 10%.
- Tamaño máximo: Tamaño de tamiz mayor que el tamaño máximo nominal.

La granulometría de máxima densidad (Figura 7) representa la graduación para la cual las partículas del agregado se acomodan entre si conformando el arreglo volumétrico más compacto posible.

Figura 7. Graduación de máxima densidad para tamaño máximo de 19 mm



Fuente: Instituto mexicano del transporte

2.1.7.3.3.1. Mecanismos de Control de la Granulometría

Históricamente las especificaciones de las granulometrías han consistido en bandas de trabajo (límite superior e inferior) en los cuales se especifica el máximo y mínimo porcentaje que pasa para cada malla. Para especificar la granulometría del agregado, se emplearon dos conceptos: los puntos de control y la zona restringida. El valor máximo y mínimo que se requiere para los puntos de control y la zona restringida depende del tamaño máximo nominal.

2.1.7.3.3.1.1. Puntos de control

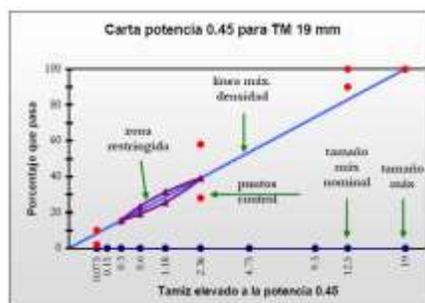
La gradación del agregado deberá estar dentro de los límites de los “puntos de control”. Los “puntos de control” aseguran la buena gradación del agregado evitando problemas de segregación y de mezcla, con el cemento asfáltico.

Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm).

2.1.7.3.3.1.2. Zona restringida

Para SUPERPAVE la zona restringida asegura que no se use mucha arena natural en la mezcla, y asegura un mínimo porcentaje de vacíos en el agregado mineral, vacíos del agregado mineral de la mezcla.

Figura 8. Límites de gradación SUPERPAVE para tamaño máximo de 19 mm



Fuente: Instituto mexicano del transporte.

2.1.8. Cemento asfáltico

2.1.8.1. Definición del cemento asfáltico

La ASTM define al asfalto o cemento asfáltico como “un cementante de color marrón oscuro a negro en el que sus componentes predominantes son los asfáltenos que pueden ser naturales u obtenidos como residuo en la refinación del petróleo crudo”. El asfalto posee características tanto químicas como físicas, que son los elementos que le proveen todas sus particularidades y hacen de éste el producto esencial que es hoy en la industria de la construcción.

2.1.8.2. Usos y función del asfalto

El uso principal del cemento asfáltico es para la producción de mezcla asfáltica, utilizada para la construcción de pavimentos flexibles. El cemento asfáltico es viscoso, altamente impermeable, adherente y su principal característica es que resiste altos refuerzos instantáneos. Los cementos asfálticos se usan para varios propósitos, carreteras, bacheo, aeropuertos, áreas de estacionamiento, calzadas, bordillos, bloques, bóvedas, entre otros.

2.1.8.3. Clasificación del cemento asfáltico

Para clasificar los cementos asfálticos se debe tener en cuenta la consistencia del cemento asfáltico a varias temperaturas, la susceptibilidad al envejecimiento y las propiedades relacionadas a la pureza. Los asfaltos se pueden clasificar en tres diferentes sistemas:

2.1.8.3.1. Clasificación por grados de penetración

En la clasificación por grados de penetración se mide la consistencia del cemento asfáltico. Para realizar este método se aplica la Norma AASHTO T-49 (Clasificación estándar por grado de penetración para cementos asfálticos utilizados en pavimentos). Al concluir el método de clasificación se obtienen cinco diferentes grados: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, 200-300.

2.1.8.3.2. Clasificación por grados de viscosidad

Para realizar este método, se debe aplicar la Norma ASTM D-3381, la cual especifica los ensayos y especificaciones requeridas del sistema de clasificación por viscosidad. Regularmente, los trabajos de pavimentos requieren ciertos valores de viscosidad a temperaturas de 60 y 135 °C. La unidad de medida a utilizar es el poise (P). La temperatura de 60 °C representa la temperatura típica máxima experimentada por el pavimento y la de 135 °C simula, en promedio, la temperatura que experimenta el pavimento durante la mezcla y la colocación en el campo.

La clasificación del asfalto es: AC-5, AC-10, AC-20, AC-30 y AC-40. La numeración indica la viscosidad a 60 °C en cientos de poises.

2.1.8.3.3. Clasificación por grados de desempeño

A diferencia de las especificaciones anteriores, la especificación del ligante SUPERPAVE se basa directamente en las propiedades físicas básicas del ligante y su comportamiento observado. El grado de comportamiento del ligante o grado de desempeño (PG) se selecciona basado en las temperaturas extremas de servicio del ligante.

La diferencia entre los diferentes tipos de PG o grados del ligante vienen a ser las temperaturas mínima y máxima de servicio. Por ejemplo, un ligante clasificado como PG 58-34 se le evaluará físicamente a 58°C y -34°C.

Debido a las deficiencias que mostraron los métodos de penetración y viscosidad, el programa de investigaciones SHRP (Strategic Highway Research Program) desarrolló un sistema llamado SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement), el cual contiene una amplia gama de ensayos y procedimientos, nuevos sistemas de diseño y análisis de mezcla asfáltica, nuevos equipos y una serie de especificaciones basadas en el grado de desempeño para cementos asfálticos se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Grados de desempeño del cemento asfáltico de SUPERPAVE

Alta Temperatura	Baja Temperatura
PG 46	34, 40, 46
PG 52	10,16, 22, 28, 34, 40, 46
PG 58	16, 22, 28, 34, 40
PG 64	10,16, 22, 28, 34, 40
PG 70	10,16, 22, 28, 34, 40
PG 76	10,16, 22, 28, 34
PG 82	10,16, 22, 28, 34

Fuente: Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas SUPERPAVE

El objetivo del sistema SUPERPAVE, por medio del grado de desempeño, es aumentar la resistencia a la fatiga y la deformación permanente, tomando en cuenta las diferentes condiciones que presenta el envejecimiento. El software SUPERPAVE es un programa de computación que auxilia al ingeniero en la selección de materiales y el diseño de mezclas. Sin embargo, el término SUPERPAVE tiene un alcance mayor que el de un simple programa de computación.

2.1.9. Ajustes del grado de desempeño del cemento asfáltico

Como se mencionó anteriormente el PG del cemento asfáltico está influido por el clima, altitud, latitud, etc. Existen también otros factores que implicarían hacer ajustes en el PG, como son el volumen y la velocidad del tránsito. En las especificaciones del SUPERPAVE existen cuatro posibles situaciones ver tabla 8:

- Frente a cargas lentas se debe incrementar un nivel a la temperatura alta de graduación.
- Frente a cargas estáticas se debe incrementar dos niveles la temperatura alta de graduación.
- Para volumen de tránsito medio, incrementar un nivel a la temperatura alta de graduación.

- Para volumen de tránsito alto, incrementar dos niveles a la temperatura alta de graduación.

Tabla 8. *Tabla para definir el aumento del PG para la temperatura máxima del pavimento*

Volumen de tránsito	Condiciones de velocidad de vehículo		
	Estacionaria (V = 20 Km/h)	Lento (V = 20 - 70 Km/h)	Rápida (V > 70 Km/h)
< 0,3	----	----	----
0,3 a < 3	2	1	----
3 a < 10	2	1	----
10 a < 30	2	1	----
≥ 30	2	1	1

Fuente: Instituto del Asfalto

Estas condiciones deben ser consideradas para incrementar el PG en particular en la zona de alta temperatura y se encuentran recogidas en el método SUPERPAVE. Para el caso de las bajas temperaturas no existe un ajuste como tal especificado en el método.

2.1.10. Ensayos de método SUPERPAVE en el cemento asfáltico

Los ensayos SUPERPAVE miden las propiedades físicas que se pueden relacionar directamente con el comportamiento en campo por principios ingenieriles. Los ensayos se realizan a la temperatura de servicio del pavimento. En la tabla 9 se listan los nuevos equipos y el propósito para los que se utilizan.

Tabla 9. *Equipos para Ensayos SUPERPAVE*

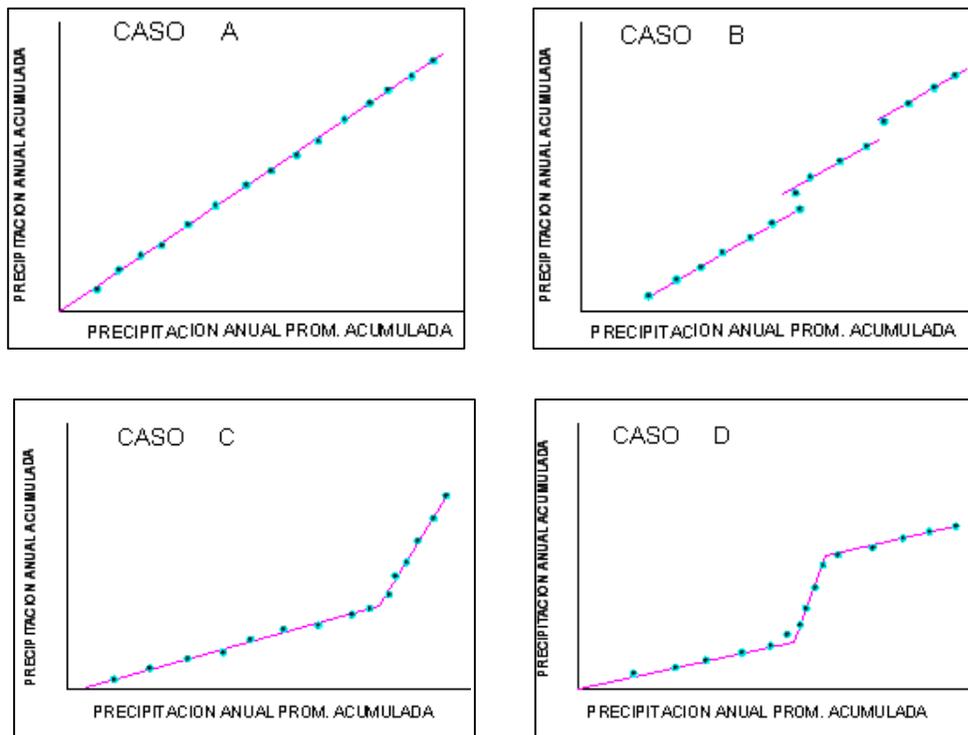
ENSAYOS DEL MÉTODO SUPERPAVE	PROPÓSITO
Viscosímetro Rotacional Brookfield (RV)	Mide las propiedades del cemento asfáltico a temperaturas altas
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	Mide las propiedades del cemento asfáltico a temperaturas altas e intermedias
Reómetro de Viga de Flexión (BBR)	Mide las propiedades del cemento asfáltico a temperaturas bajas
Ensayo de Tracción Directa (DTT)	
Horno de Película Delgada Rotatoria (RTFO)	Simula el envejecimiento inicial del cemento asfáltico
Envejecimiento en Recipiente Presurizado (PAV)	Simula el envejecimiento durante la vida de servicio del cemento asfáltico

Fuente: SUPERPAVE y el diseño de mezclas asfálticas

2.1.11. Análisis de consistencia curva doble masa

El análisis de consistencia de la curva doble masa, relaciona los valores anuales acumulados de una estación X (estación que se analiza) llevando en el eje de la ordenada con el correspondiente y en abscisas los valores anuales acumulados de una estación patrón. Si la estación que se analiza ha sido bien observada, los puntos deberán alinearse en una recta, pero si existe algún quiebre, o cambio de pendiente en la recta, ello indicará que la estadística de la estación analizada debe ser corregida. Los registros a corregir serán, por lo general, los más antiguos y se harán con base en los registros más recientes, ya que se considera que los datos de los últimos años son realizados con una mejor técnica que la empleada en sus predecesores. Los casos más frecuentes se ilustran a continuación:

Figura 9. Análisis de la curva Doble Masa



Fuente: Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología

Caso A: La serie de puntos encaja perfectamente en una línea recta: lo que indica proporcionalidad, y por lo tanto, la estación que se analiza es consistente.

Caso B: Series de rectas paralelas: Lo cual nos indica proporcionalidad, aunque existan años que estén medidos por exceso o defecto.

Caso C: Cuando se forman dos rectas de diferentes pendientes: Se tiene un caso típico de error sistemático. La corrección se realiza por la relación de pendientes del tramo más antiguo ya que la experiencia demuestra en un 80% el periodo más moderno es el correcto.

Caso D: La estación presenta un tramo central de mayor o menor pendiente: En el 95% de los casos, dicho tramo se midió incorrectamente, por lo que habrá que corregirlo para homogeneizar la serie.

2.2. MARCO NORMATIVO

Los cementos asfálticos deben ser seleccionados en función a las temperaturas a la que va a estar expuestos durante su vida de servicio, para ello debe cumplir con propiedades fundamentales que tiene que poseer los cementos asfálticos para su empleo en carretera.

Comportamiento del cemento asfáltico

Tres características del cemento asfáltico son importantes en el desempeño de una mezcla asfáltica:

- **Susceptibilidad a la temperatura:** El cemento asfáltico es más rígido entre menor sea su temperatura (tiempo de carga).
- **Viscoelasticidad:** Comportamiento viscoso (deformable) y elástico (sólido-recuperable).
- **Envejecimiento:** Cambia sus propiedades con el tiempo, debido a la pérdida de volátiles y oxidación lo que se traduce como un rigidización del asfalto.

2.2.1. Equivalencias entre diferentes grados de asfaltos para pavimento

Cumplen con la norma IRAM-IAPG A 6835:2002, que clasifica a los asfaltos según su rango de viscosidad, penetración y grado de desempeño. De acuerdo a las especificaciones SHRP (tabla 10), cumpliendo los siguientes grados de desempeño (PG):

Tabla 10. *Equivalencias entre diferentes grados de asfaltos para pavimento*

Cemento asfáltico para pavimento

Grados de Penetración	Grados de Viscosidad	Grado de desempeño (PG)
40-50; 70/100	AC-30	70 – 22
60-70	AC-20	64 – 22
85-100	AC-10	58 – 28
120-150	AC-5	52 – 28

Fuente: Manual centroamericano

2.2.2. Ensayos empíricos de consistencia de los materiales:

2.2.2.1. Ensayos tradicionales para determinar el cemento asfáltico según el método SUPERPAVE:

2.2.2.1.1. Penetración

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un cemento asfáltico. Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en las normas (AASHTO T-49 y en el ASTM D-5).

2.2.2.1.2. Viscosidad Saybolt-Furol

El ensayo de viscosidad Saybolt-Furol se emplea un viscosímetro Saybolt con un orificio Furol. Cuando más viscosos son los materiales más tiempo es necesario para que pasen a través del orificio. Los aparatos y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en la norma (ASTM E-102).

2.2.2.1.3. Punto de inflamación

El punto de inflamación del cemento asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Los aparatos y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en las normas (AASHTO T-48 y ASTM D-92).

2.2.2.1.4. Peso específico

Normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del cemento asfáltico que se emplea. Los materiales y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en las normas (AASHTO T-43 y ASTM D-70).

2.2.2.1.5. Punto de ablandamiento

Los cementos asfálticos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. Los materiales y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en las normas (AASHTO T-53 y ASTM D-36).

2.2.2.2. Ensayos para determinar el agregado pétreo según el método SUPERPAVE:

2.2.2.2.1. Granulometría

Una muestra de agregado seco de masa conocida es separada a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente menores, para la determinación de la distribución de tamaño de las partículas. Los materiales y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en la norma (ASTM D-422).

2.2.2.2.2. Partículas planas y alargadas agregado grueso

Este método de ensayo cubre la determinación de los porcentajes de partículas planas, alargadas en agregados gruesos. Los materiales y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en la norma (ASTM D 4791 – 99).

2.2.2.2.3. Equivalente de arena

La intención de éste ensayo es que sirva como una prueba de campo rápida para mostrar las proporciones relativas de polvo fino o material arcilloso en suelos o agregados graduados. Los materiales y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en la norma (ASTM D 2419).

2.2.2.2.4. Método de los sulfatos para determinar la desintegración

Este método permite determinar la resistencia a la desintegración por soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio que tendrán los agregados. Los materiales y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en las normas (ASTM C-88 y AASHTO T-104).

2.2.2.2.5. Peso específico y absorción del agregado fino

Este método nos permite conocer los pesos específicos del agregado fino: el peso específico agregado seco, peso específico saturado superficie seca y el peso específico aparente. Además del porcentaje de absorción, Los materiales y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en las normas (AASHTO T-84 y ASTM C-128).

2.2.2.2.6. Peso específico y absorción del agregado grueso

Este método nos permite conocer los pesos específicos y absorción del agregado grueso. Los materiales y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en las normas (AASHTO T 85 y ASTM C 127).

2.2.2.2.7. Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles

Este ensayo emplea para determinar la resistencia de los agregados triturados a una carga abrasiva, empleando la máquina de desgaste de los Ángeles. Los materiales y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en las normas (AASHTO T-96 y ASTM C-131).

2.2.2.2.8. Porcentaje de caras fracturadas de los áridos

Este método permite determinar el porcentaje, en peso de una muestra de agregado grueso con una, dos o más caras fracturadas. Los materiales y procedimiento de este ensayo se describen detalladamente en la norma (ASTM D 5821-95).

2.2.2.3. Diseño de mezclas asfálticas método Marshall

Un diseño de mezcla asfáltica en caliente es un proceso muy amplio y complementario en el cual intervienen varios factores de estudio. Los materiales y procedimiento de este ensayo se describen detalladamente en la norma (ASTM D-1559).

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. AASHTO:

American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte).

2.3.2. Agregado Grueso:

Agregado que pasa el tamiz de 3" y queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (N° 4). Para esta investigación debe ser procedente de trituración.

2.3.3. Agregado Fino:

Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y queda retenido en el tamiz de 75 μ m (N° 200). Para esta investigación debe ser procedente de trituración.

2.3.4. Agregados Naturales:

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento.

2.3.5. ArcGIS:

Es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG.

2.3.6. ASTM:

American Society for testing Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).

2.3.7. Cemento Asfáltico:

Material especialmente preparado en cuanto a calidad o consistencia para ser usado directamente en la construcción de pavimentos asfálticos.

2.3.8. Estación Meteorológica:

Instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas.

2.3.9. Grado de desempeño (PG):

Establece un rango de temperaturas dentro de las cuales el cemento asfáltico se comporta de manera adecuada. Este rango debe ser obtenido de acuerdo a las temperaturas extremas de la zona donde se ubicará el proyecto y de esta manera definir si el cemento asfáltico es apto para ser utilizado en el proyecto.

2.3.10. SHRP:

Strategic Highway Research Program (Programa Estratégico para la Investigación de Carreteras).

2.3.11. SUPERPAVE:

Superior Performing Asphalt Pavements (Pavimentos Asfálticos de Rendimiento Superior).

2.4. MARCO HISTÓRICO

En el año 1987, el Congreso Americano destinó un presupuesto inicial de 50 millones de dólares y se creó un organismo técnico con la finalidad de evaluar y proponer nuevos métodos de diseño. A la fecha, con inversiones de más de 500 millones de dólares se ha implementado en EE.UU. la metodología SUPERPAVE para selección de materiales y diseño de mezclas el cual es el Strategic Highway Research Program SHRP de los Estados Unidos comenzó el desarrollo de un nuevo sistema para especificación de materiales asfálticos. El producto final del proyecto de investigación fue un sistema conocido como Superpave (SUPERior PERforming Asphalt

PAVEments). Las principales diferencias y ventajas de las nuevas especificaciones respecto de las especificaciones tradicionales son las siguientes:

- Se especifica el material para las temperaturas esperadas en terreno.
- Se utilizan instrumentos que miden propiedades fundamentales del ligante (reómetros).
- Se considera el envejecimiento de largo plazo del material.
- Se considera el efecto del tiempo de carga (de manera indirecta).
- Se considera el efecto del volumen de tránsito (de manera indirecta)

Los ligantes son caracterizados de acuerdo al desempeño esperado ante tres tipos de deterioros: ahuellamiento, fatiga y agrietamiento térmico. Como cada una de estas fallas sucede a temperaturas distintas, la denominación de un asfalto cuenta con tres temperaturas características, expresadas en grados Celsius. Por ejemplo, un ligante etiquetado como PG 64-22 tiene las siguientes propiedades:

- Resiste ahuellamiento a temperaturas de hasta $T_{xx} = 64^{\circ}\text{C}$.
- Resiste agrietamiento térmico para temperaturas de hasta $T_{yy} = -22^{\circ}\text{C}$.
- Resiste fatiga para temperaturas menores o iguales a $T_{Inter.} = \frac{64-22}{2} + 4 = 25^{\circ}\text{C}$.

Una descripción detallada de las especificaciones, incluyendo los equipos a utilizar y los parámetros a controlar, puede encontrarse en diversas referencias [AASHTO 2015, Instituto de Asfalto 2003, ASTM 2015].

La utilización de las especificaciones SUPERPAVE requiere conocer las temperaturas que se esperan en el pavimento en la región donde será construido. Esto permite que se pueda seleccionar el ligante apropiado para esa zona climática. Esto es especialmente importante en un departamento con una diversidad climática tan amplia como Tarija.

2.5. TRABAJOS SIMILARES REALIZADOS EN OTROS PAISES

Como base de esta investigación se utilizó los siguientes trabajos realizados en otros países aplicando esta metodología para así obtener la zonificación SUPERPAVE para nuestro departamento:

- Clasificación de ligantes asfálticos por desempeño para las diferentes regiones climáticas del Perú.
- Aplicación del método MARSHALL y granulometría SUPERPAVE en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño
- Análisis de factores climáticos en las diferentes regiones del Ecuador para el diseño de pavimentos
- Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño para el diseño de la carpeta de rodadura, de acuerdo a la zonificación climática del país de Guatemala.
- Zonificación SUPERPAVE para Chile

2.6. PUNTO DE VISTA DEL INVESTIGADOR RESPECTO AL MARCO TEÓRICO

A partir de la teoría estudiada en el presente trabajo el cual está basado en la zonificación SUPERPAVE para el departamento de Tarija el cual se aplicara la teoría y diferentes ecuaciones proporcionadas por el método SUPERPAVE para determinar el tipo de cemento por grado de desempeño adecuado para las diversas regiones del departamento y conocer su diversidad climática del mismo. Después se aplicara los conocimientos teóricos para realizar mezclas asfálticas con granulometría SUPERPAVE y el tipo de cemento asfáltico por grado de desempeño seleccionado para las diferentes temperaturas extremas a la que el pavimento estará expuesto durante su vida de servicio, para ello se realizará la elaboración de mezclas asfálticas para las diferentes regiones del departamento.

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. CRITERIOS A UTILIZARSE EN LA ZONIFICACIÓN SUPERPAVE

3.1.1. Recolección de información de temperaturas del departamento de Tarija

La información disponible incluye un total de 38 estaciones climáticas con información de temperaturas extremas diarias del departamento de Tarija, tabla 11, obtenidas del SENAMHI (Servicio Nacional de meteorología e Hidrología) y AASANA (Administración de Aeropuertos y Servicios Auxiliares de la Navegación Aérea).

Tabla 11. Estaciones meteorológicas con información de temperaturas extremas diarias del departamento de Tarija

Estaciones meteorológicas			
Nº	Provincia	Estación	Operador
1	Cercado	Tarija - Aeropuerto	AASANA
2		San Andrés	SENAMHI
3		San Jacinto Sud	SENAMHI
4		Yesera Norte	SENAMHI
5		El Tejar Tarija	SENAMHI
6		Yesera Sur	SENAMHI
7		Las barrancas	SENAMHI
8		Turumayo	SENAMHI
9	Méndez	Campanario	SENAMHI
10		Coimata	SENAMHI
11		Sella Quebradas	SENAMHI
12		El Puente	SENAMHI
13		Trancas	SENAMHI
14		Tomayapo Pueblo	SENAMHI
15		Tucumillas	SENAMHI
16		El Molino – Iscayachi	SENAMHI
17		Paicho Centro	SENAMHI
18	Gran Chaco	Agüaraycito	SENAMHI
19		Palmar Grande	SENAMHI
20		Yacuiba – Aeropuerto	AASANA
21		Villa Montes – Aeropuerto	AASANA
22		Palmar Chico	SENAMHI
23		Ibibobo	SENAMHI

24	Gran Chaco	Itau	SENAMHI
25		Carapari	SENAMHI
26	Arce	Bermejo – Aeropuerto	AASANA
27		Cañas	SENAMHI
28		El 9 Bermejo	SENAMHI
29		Emborozú	SENAMHI
30		La Mamora	SENAMHI
31		La Merced	SENAMHI
32	Avilés	Ce.Na. Vit.	SENAMHI
33		Juntas	SENAMHI
34		La Angostura	SENAMHI
35		Chocloca	SENAMHI
36	O'Connor	Entre Ríos	SENAMHI
37		Saykan Perulas	SENAMHI
38		Tarupayo	SENAMHI

Fuente: SENAMHI Y AASANA

3.1.2. Criterios para la selección de la base de datos climáticos utilizados

Para la selección de la base de datos climáticos se realizaron los siguientes pasos:

- Recopilación de información de los anuarios proporcionados por AASANA (Administración de Aeropuertos y Servicios Auxiliares de la Navegación Aérea) y el SENAMHI (Servicio Nacional de meteorología e Hidrología) y en su página web SISMET. Sin embargo, para que la información sea representativa y tenga validez estadística para la determinación de las confiabilidades, se debe contar con un mínimo de veinte años de servicio de cada estación meteorológica.
- Se seleccionaron las estaciones climatológicas con la información más completa detallando así sus temperaturas extremas máximas y mínimas, también la máxima de las temperaturas medias, con sus respectivas altitudes y latitudes.
- Localización dispersa de las estaciones sobre el territorio departamental. Con los datos obtenidos del SENAMHI y AASANA, se logró abarcar gran parte del

territorio departamental; esto garantiza una buena zonificación climática del pavimento para el estudio.

3.1.3. Validación de las estaciones meteorológicas

Se realizó el análisis de consistencia a las estaciones meteorológicas mediante la curva doble masa. Las cuales se muestran a continuación el periodo de análisis:

Tabla 12. *Análisis de Consistencias de las estaciones meteorológicas utilizadas en la elaboración de los mapas de la zonificación*

Estaciones utilizadas en la elaboración de los mapas de zonificación		
Estación patrón	Estación en estudio	Periodo (años)
Aeropuerto Tarija	San Andrés	1997 - 2016
Aeropuerto Tarija	Yesera Norte	1995 - 2016
Aeropuerto Tarija	San Jacinto Sud	1985 - 2016
Aeropuerto Tarija	El Tejar Tarija	1992 - 2012
Aeropuerto Tarija	El Puente	1967 - 1987
Aeropuerto Tarija	Ce.Na.Vit.	1995 - 2016
Aeropuerto Tarija	Juntas	1992 - 2012
Aeropuerto Tarija	Cañas	1997 - 2016
Aeropuerto Tarija	Entre Ríos	1990 - 2012
Aeropuerto Tarija	Emborozú	1990 - 2000
Aeropuerto Tarija	Itau	1999 - 2013
Coimata	Campanario	1995 - 2016
Coimata	Sella Quebrada	1999 - 2016
Coimata	Trancas	1998 - 2015
Aeropuerto Yacuiba	Aeropuerto Villa Montes	1995 - 2016

Aeropuerto Yacuiba	Palmar Grande	1997 - 2016
Aeropuerto Yacuiba	Aguaraycito	1995 - 2016
Aeropuerto Yacuiba	Aeropuerto Bermejo	1995 - 2015
Campanario	Copacabana	1995 - 2016

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del SENAMHI y AASANA

Tabla 13. *Análisis de Consistencias de las estaciones meteorológicas utilizadas en la verificación de los mapas de zonificación*

Estaciones utilizadas en la elaboración de los mapas de zonificación		
Estación patrón	Estación en estudio	Periodo (años)
Aeropuerto Tarija	Canasmoro	1987 - 2003
Aeropuerto Tarija	Turumayo	1999 - 2016
Aeropuerto Tarija	Yesera Sur	2002 - 2016
Aeropuerto Tarija	Embalse de San Jacinto	1991 - 1999
Aeropuerto Tarija	Isacyachi–San Antonio	2004 - 1987
Aeropuerto Tarija	La Angostura	1995 - 2016
Aeropuerto Tarija	Chocloca	1992 - 2012
Aeropuerto Tarija	La Merced	1997 - 2016
Aeropuerto Bermejo	El 9 Bermejo	1990 - 2012
Aeropuerto Villamontes	Caraparí	1990 - 2000
Coimata	Tomayapo Pueblo	2004 - 2015
Coimata	Tucumillas	1999 - 2016

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del SENAMHI y AASANA

El análisis de consistencia de la curva doble masa a las estaciones meteorológicas para la elaboración del mapa se muestra en el Anexo A y las estaciones meteorológicas para la validación de la zonificación se encuentra en el Anexo B.

3.1.4. Estaciones meteorológicas seleccionadas y su ubicación

Las estaciones meteorológicas que cumplieron los requisitos del método SUPERPAVE y además de analizar su consistencia se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. *Estaciones meteorológicas seleccionadas*

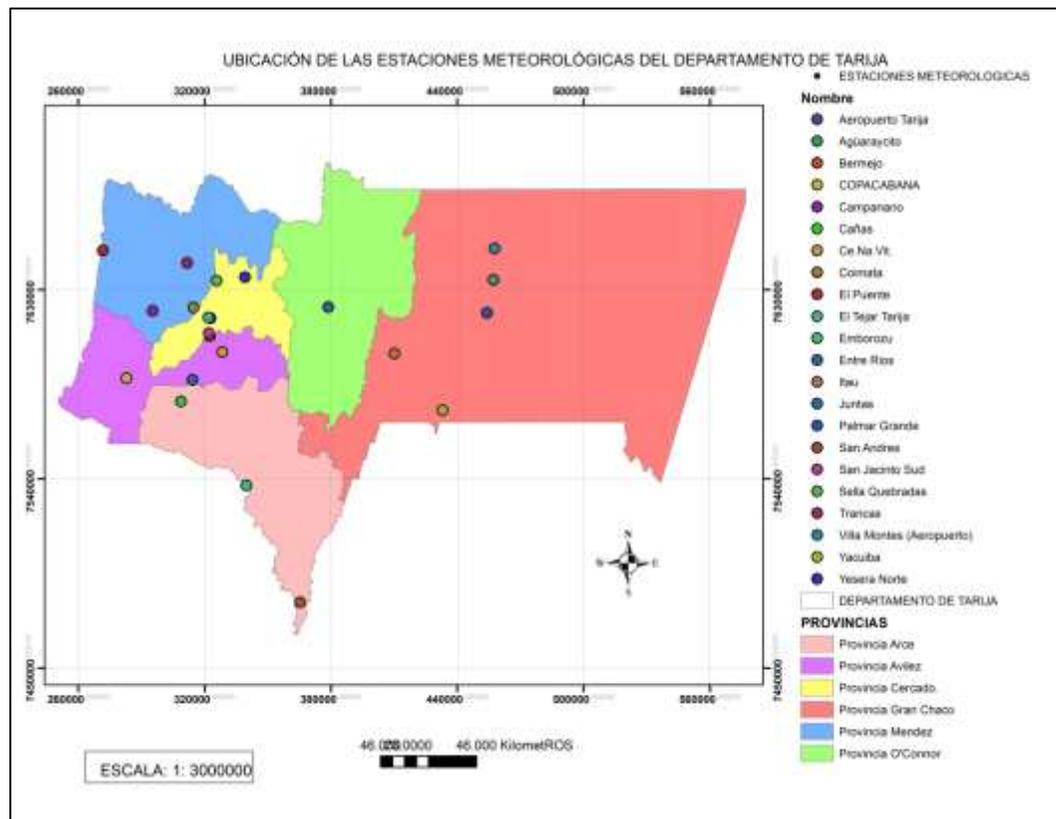
N°	Provincia	Estación	Longitud Oeste	Latitud Sud	Altitud m.s.n.m.
1	Cercado	Tarija - Aeropuerto	64°42'39"	21°32'48"	1849
2		San Andrés	64°48'54"	21°37'24"	1987
3		San Jacinto Sud	64°43'12"	21°36'37"	1820
4		Yesera Norte	64°33'3"	21°22'20"	2277
5		El Tejar Tarija	64°43'16"	21°32'35"	1859
6	Méndez	Campanario	64°58'32"	21°30'45"	3460
7		Coimata	64°47'20"	21°29'57"	2027
8		Sella Quebradas	64°40'52"	21°23'11"	2145
9		El Puente	65°12'00"	21°15'00"	2345
10		Trancas	64°48'57"	21°18'29"	2198

11	Gran Chaco	Agüaraycito	63°24'44"	21°23'24"	396
12		Palmar Grande	63°26'31"	21°31'53"	464
13		Yacuiba – Aeropuerto	63°38'53"	21°56'58"	645
14		Villa Montes – Aeropuerto	63°24'27"	21°15'17"	403
15		Itau	63° 52' 7"	21°42'15"	970
16	Arce	Bermejo – Aeropuerto	64°18'42"	22°46'15"	385
17		Cañas	64°51'3"	21°54'8"	2078
18		Emborozú	64°45'00"	22°16'01"	881
19	Avilés	Ce.Na.Vit.	64°39'29"	21°41'31"	1730
20		Juntas	64°47'51"	21°48'37"	1882
21		Copacaban	65°06'	21° 48'	3200
22	O'Connor	Entre Ríos	64°10'14"	21°30'11"	1260

Fuente: SENAMHI Y AASANA

La ubicación de las estaciones meteorológicas que cumplieron los requisitos por el método SUPERPAVE se muestra en la figura 10:

Figura 10. *Ubicación de las estaciones meteorológicas a ser utilizadas*



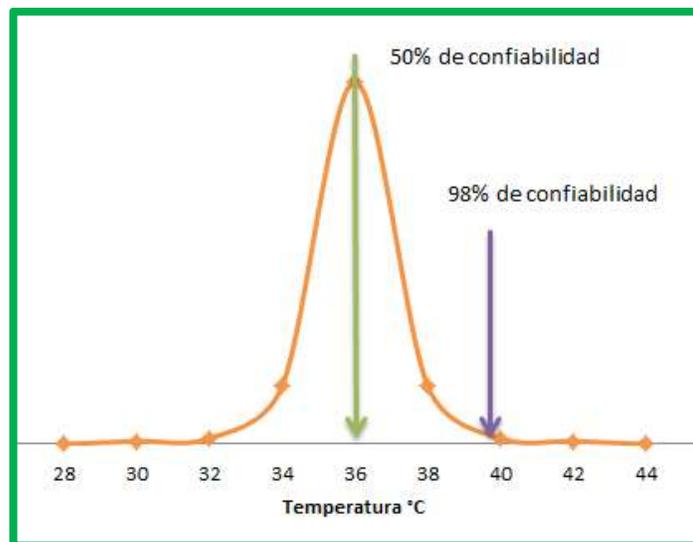
Fuente: Elaboración propia

3.1.5. Criterios para la selección de la confiabilidad de la zonificación

El sistema de SUPERPAVE adiciona un porcentaje de confiabilidad a las temperaturas obtenidas del aire, con el propósito que el diseñador defina el porcentaje de probabilidad para un año dado, en el cual la temperatura real no exceda la temperatura de diseño. Esta confiabilidad se aplicará utilizando una desviación normal estándar para las temperaturas.

Si se realiza el diseño seleccionando una confiabilidad del 50 % obtendrá un 50 % de probabilidad de que la temperatura real supere por ejemplo los 36 °C. En cambio, si selecciona un porcentaje de confianza de 98 % obtendrá solo un 2 % de probabilidad de que la temperatura de diseño se vea superada.

Figura 11. Confiabilidad según el porcentaje



Fuente: SUPERPAVE y el diseño de mezclas asfálticas

El uso de la confiabilidad en las temperaturas del aire según SUPERPAVE depende de la importancia del estado de la red vial, las cargas del tránsito, el costo y disponibilidad del cemento asfáltico a utilizar por lo cual se vio la necesidad de utilizar las siguientes confiabilidades, ver tabla 15.

Tabla 15. *Valores de desviación normal estándar según el porcentaje de confiabilidad*

Confiabilidad (%)	Desviación normal estándar (Z)
50	0
98	2

Fuente: SUPERPAVE y el Diseño de Mezclas Asfálticas

3.1.6. Obtención de las temperaturas del pavimento según la metodología SHRP del método SUPERPAVE

Se aplicará esta metodología propuesta por el método SUPERPAVE para la obtención de las temperaturas del pavimento para el departamento de Tarija. El cual se realiza lo siguiente:

3.1.4.1. Obtención de las temperaturas promedio mínima y máxima, y sus correspondientes desviaciones estándares

Para obtener las temperaturas máximas, mínimas y promedio, se tiene que basar en la información de las 22 estaciones meteorológicas seleccionadas. Se necesita usar un programa como Excel para ordenar y calcular los datos que se obtengan como promedios, desviación estándar, entre otros. Se debe definir el valor de la temperatura del aire máxima, mínima y promedio basado en el grado de confiabilidad de 50% y 98%.

3.1.4.1.1. Definición de las variables de las ecuaciones utilizadas

Las temperaturas a ser usadas para especificar el cemento asfáltico para una determinada obra deben ser calculadas por las expresiones siguientes (según Instituto del Asfalto), definición de sus variables:

- **Temperaturas máximas de 7 días consecutivos:** Es la temperatura de siete días consecutivos más calientes que se registran en un año.
- **Temperatura máxima diaria:** Es la mayor temperatura registrada durante un día.
- **Desviación estándar:** La desviación típica es una [medida del grado de dispersión](#) de los datos con respecto al valor promedio.
- **Temperatura mínima:** Es la menor temperatura registrada en un día.
- **Temperaturas promedio mínima:** Es la temperatura promedio de las temperaturas más bajas registradas un año.
- **Desviación normal estándar para una confiabilidad:** Obtenido de la tabla de distribución normal $Z = 2$ para una confiabilidad del 98 %.
- **Temperatura mínima del aire:** Media de las temperaturas mínimas del aire de los días más fríos registrados en un año.
- **Temperatura mínima del pavimento:** Temperatura mínima del proyecto de la carpeta asfáltica en la superficie.

- **Temperatura intermedia del pavimento:** Es la temperatura promedio que puede resistir el pavimento en función a su temperatura máxima y mínima.
- **Temperatura máxima del aire:** Media de las temperaturas máximas del aire de los siete días consecutivos más calientes del año.
- **Temperatura máxima del pavimento a 20 mm de profundidad;** Es la temperatura máxima del proyecto de la carpeta asfáltica a la profundidad de 20 mm de la superficie.
- **Latitud:** La latitud es la distancia que existe entre un punto cualquiera y el Ecuador, medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto.

3.1.4.1.2. Promedio de las temperaturas máximas de siete días consecutivos (°C)

SUPERPAVE define la temperatura máxima al promedio de los siete días más calientes de cada año. Su obtención consiste en calcular, para cada año de operación de la estación meteorológica, los siete días consecutivos más calientes y obtener su promedio. Se procede a obtener promedios de temperatura máxima en subgrupos de siete días, así como promedio mayor de los subconjuntos de siete días, que se obtienen de un año de operación del promedio máximo de temperatura de aire (los siete días más calientes). La siguiente ecuación describe cómo obtener la temperatura promedio máxima de los siete días consecutivos de cada estación meteorológica seleccionada. Los años faltantes se eliminaron.

Ecuación 3. *Promedio de las temperaturas máximas de siete días consecutivos (°C)*

$$T_{m_{\max}} = \sum_7^{i+6} \frac{T_i}{7} = \frac{T_i + T_{i+1} + T_{i+2} + T_{i+3} + T_{i+4} + T_{i+5} + T_{i+6}}{7}$$

Donde

$T_{m_{\max}}$ = Promedio de las temperaturas máximas de 7 días consecutivos (°C)

T_i = Temperatura máxima diaria (°C).

3.1.4.1.3. Cálculo de la desviación estándar de las temperaturas máximas de los siete días más calientes (°C)

Con la siguiente ecuación se realiza la desviación estándar para las temperaturas máximas de cada estación meteorológica seleccionada.

Ecuación 4. *Desviación estándar de las temperaturas máximas de los siete días más calientes (°C)*

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{m_{\max}} - T)^2}{n - 1}}$$

Donde

T = Registro diario individual de los siete días más calientes del año.

n = Registro total de registros diarios a considerar, en este caso son siete.

$T_{m_{\max}}$ = Mayor de los promedios obtenidos de la ecuación 3.

3.1.4.1.4. Temperaturas promedio mínima (°C)

En el caso de esta temperatura, SUPERPAVE establece una metodología más simple, la cual consiste en calcular la temperatura promedio y la mínima de cada año de operación de cada estación meteorológica seleccionada.

Ecuación 5. *Temperaturas promedio mínima (°C)*

$$T_{m_{\min}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}$$

Donde

$T_{m_{\min}}$ = Temperaturas promedio mínima ($^{\circ}\text{C}$).

$\sum_{i=1}^n T_i$ = Sumatoria de todos los registros de temperaturas de la base de datos ($^{\circ}\text{C}$).

n = Número total de registros de la base de datos.

3.1.4.1.5. Se calcula la desviación estándar para todos los años de registro ($^{\circ}\text{C}$)

Con la siguiente ecuación se realiza la desviación estándar para las temperaturas mínimas de cada estación meteorológica seleccionada.

Ecuación 6. *Temperaturas promedio mínima ($^{\circ}\text{C}$)*

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{m_{\min}} - T)^2}{n - 1}}$$

Donde

T_i = Registro diario individual de la base de datos de la estación meteorológica.

n = Número total de la base de datos.

$T_{m_{\min}}$ = Temperatura obtenida de la ecuación 3.

3.1.4.2. Obtención de las temperaturas del aire a diferentes niveles de confiabilidad

Se realizará con una confiabilidad asociada a los valores de una confiabilidad y su respectiva desviación estándar.

3.1.4.2.1. Cálculo de la temperatura máxima del aire

El cálculo de la temperatura máxima del aire depende de la confiabilidad requerida y de la desviación estándar de los datos y el promedio de las temperaturas máximas, dado por la ecuación 7:

Ecuación 7. Temperatura máxima del aire

$$T_{\text{airemax}} = T_{m_{\text{max}}} + Z * \sigma$$

Donde

$T_{m_{\text{max}}}$ = Temperatura media, de las temperaturas extremas máximas de la zona.

$T_{\text{airemáx}}$ = Temperatura máxima del aire (°C).

Z = Desviación normal estándar para una confiabilidad requerida.

σ = Desviación estándar de los datos.

3.1.4.2.2. Cálculo de la temperatura mínima del aire

El cálculo de la temperatura mínima del aire depende de la confiabilidad requerida y de la desviación estándar de los datos y el promedio de las temperaturas máximas, dado por la ecuación 8:

Ecuación 8. Temperatura mínima del aire

$$T_{\text{airemin}} = T_{m_{\text{mín}}} - Z * \sigma$$

Donde

$T_{m_{\text{mín}}}$ = Temperatura media, de las temperaturas extremas mínimas de la zona.

$T_{\text{airemín}}$ = Temperatura mínima del aire (°C).

Z = Desviación normal estándar para una confiabilidad requerida.

σ = Desviación estándar de los datos.

3.1.4.3. Obtención de las temperaturas del pavimento

3.1.4.3.1. Temperatura máxima del pavimento modelo SHRP

Por medio de las ecuaciones desarrolladas por SHRP se obtuvieron las temperaturas máximas del pavimento que se presentan a continuación. Para lo cual se utilizaron los datos de latitud y los valores obtenidos de temperaturas máximas del aire a un nivel de confiabilidad, correspondientes a cada estación meteorológica seleccionada en esta investigación y una profundidad de 20 milímetros.

Ecuación 9. *Temperatura máxima del pavimento a veinte milímetros desde la superficie*

$$T_{\max.20mm} = 0,9545 * (T_{airemax} - 0,00618 * Lat^2 + 0,2289 * Lat + 42,2) - 17,78$$

Donde

$T_{\max.20mm}$ = Temperatura máxima del pavimento a 20 mm de profundidad (°C).

$T_{airemax}$ = Temperatura máxima del aire (°C).

Lat = Es valor absoluto de latitud de la estación meteorológica (°).

3.1.4.3.2. Temperatura mínima del pavimento modelo SHRP

Los resultados de las temperaturas mínimas del pavimento se basan en la ecuación 8 desarrolladas por SHRP.

SHRP utilizó los valores obtenidos de temperaturas mínimas del aire a un nivel de confiabilidad seleccionada en cada estación meteorológica escogida para esta investigación.

Ecuación 10. *Temperatura mínima del pavimento*

$$T_{mín} = 0,859 * T_{airemin} + 1,7$$

Donde

$T_{mín}$ = Temperatura mínima del pavimento en °C.

$T_{airemin}$ = Temperatura mínima del aire en un año promedio en °C.

3.1.4.3.3. Temperatura intermedia de cada estación

Para la temperatura intermedia del pavimento para cada estación se la determina a partir de la ecuación 9.

Ecuación 11. *Temperatura intermedia del pavimento*

$$T_{Interm.} = \frac{T_{Máx.} + T_{Mín.}}{2} + 4$$

Donde

$T_{Interm.}$ = Temperatura intermedia del pavimento en °C.

$T_{Mín.}$ = Temperatura promedio mínima del pavimento en °C.

$T_{Máx.}$ = Temperatura promedio máxima del pavimento en °C.

3.1.4.4. Selección del grado de desempeño del cemento asfáltico para cada estación meteorológica

Para la selección del cemento asfáltico se debe utilizar la tabla 16 que contiene la especificación SUPERPAVE, que sirve para calcular los distintos cementos asfálticos para las estaciones meteorológicas estudiadas tanto para los niveles de confianza.

Para determinar si un cemento es apropiado para un determinado clima, este debe tener una temperatura alta superior a la de la localidad, una temperatura baja inferior a la de

la zona y una temperatura intermedia mayor o igual a la temperatura intermedia del lugar de emplazamiento del proyecto.

Tabla 16. Grados de desempeño del cemento asfáltico de SUPERPAVE

Alta Temperatura	Baja Temperatura
PG 46	34, 40, 46
PG 52	10,16, 22, 28, 34, 40, 46
PG 58	16, 22, 28, 34, 40
PG 64	10,16, 22, 28, 34, 40
PG 70	10,16, 22, 28, 34, 40
PG 76	10,16, 22, 28, 34
PG 82	10,16, 22, 28, 34

Fuente: Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas SUPERPAVE

3.1.5. Elaboración del mapa con la zonificación PG del cemento asfáltico

Una vez determinado los grados del cemento asfáltico (PG) se procedió a elaborar un mapa partiendo de los resultados obtenidos en las diferentes estaciones.

Con base en los datos de temperaturas máximas, promedios y mínimas del aire de cada una de las estaciones meteorológicas, se realizó el diseño de los mapas del grado desempeño con las temperaturas máximas y mínimas del pavimento, obtenidas por las ecuaciones definidas por SHRP con la ayuda del programa ArcGIS se realizó el mapa. La generación de la secuencia de los mapas se encuentra en el Anexo F.

3.2. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL LOS MATERIALES PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS SEGÚN LA ZONIFICACIÓN SUPERPAVE

3.2.1. Criterio de selección de los banco de agregados

El departamento de Tarija cuenta con varios bancos de materiales para la realización de mezclas asfálticas, el criterio asumido para elegir el banco de materiales es que en el momento en el que se realizó la investigación se consultó los bancos disponibles en distintas regiones, para ello se seleccionó en función a la zonificación realizada las cuales fueron: para un cemento asfáltico PG 58-28 los agregados que se utilizan para esa región de la chancadora Érica material proveniente de Charaja, para un cemento asfáltico PG 64-22, se utilizó de la chancadora Garzón y arena de la alcaldía ya que la arena de garzón no cumplía según la metodología SUPERPAVE, para la región donde el cemento asfáltico es de un PG 70-22, se utilizó de la chancadora UBESAN perteneciente al SEDECA Bermejo. Los agregados cumplen con las especificaciones siguientes:

- Para tamaño máximo nominal de 19 mm se utilizó los agregados del banco UBESAN para la zona cálida y Garzón para la zona templada.
- Para tamaño máximo nominal de 12,5 mm se utilizó los agregados gruesos del banco Érica y agregados finos de Charaja para la zona fría.

3.2.2. Criterio para la selección del cemento asfáltico

Los criterios para la selección del cemento asfáltico serán los que se obtuvieron mediante la zonificación SUPERPAVE del grado de desempeño de los cementos asfálticos en función a las temperaturas extremas y su caracterización mediante ensayos tradicionales en nuestro medio, se usará el cemento asfáltico por penetración y utilizando su equivalencia por grado de desempeño, además de estar disponible en nuestro medio, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 17. Cuadro de equivalencias entre diferentes grados de asfaltos para pavimento

Grados de Penetración	Grado de desempeño(PG)
40-50 : 70-100	70 – 22
60-70	64 – 22
85-100	58 – 28
120-150	52 – 28

Fuente: Manual centroamericano

3.2.3. Criterio para el número de ensayos a realizarse

Para la presente investigación se realizarán los siguientes ensayos y las cantidades a realizar para los diversos agregados y cementos asfálticos:

➤ **Caracterización del cemento asfáltico**

Tabla 18. Número de ensayos para los cementos asfálticos.

ENSAYOS	CANTIDAD DE ENSAYOS A REALIZAR
Penetración muestra original 25°C	6
Punto de inflamación °C	6
Viscosidad SAYBOLT-FUROL	6
Punto de ablandamiento	6
Peso específico	6

Fuente: Elaboración propia

➤ **Caracterización de los agregados**

Tabla 19. Número de ensayos para los agregados

ENSAYOS	CANTIDAD DE ENSAYOS A REALIZAR
Granulometría	9
Porcentaje de caras fracturadas	6
Porcentaje de partículas chatas y alargadas	6
Equivalente de arena	6
Porcentaje de partículas laminadas	6
Abrasión del agregado grueso	6

Peso específico y absorción del agregado grueso	6
Peso específico y absorción del agregado fino	6
Sulfatos para determinar la desintegración	6
Límites de Atterberg (límite líquido)	9

Fuente: Elaboración propia

➤ Mezcla asfáltica

Para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico:

Dosificación.- Con la granulometría de los agregados se tiene una dosificación tentativa, con la cual se procederá a pesar 3 briquetas con un porcentaje de cemento asfáltico, en la siguiente tabla se muestra las cantidades para un tipo de cemento asfáltico:

Tabla 20. Variaciones del porcentaje de Cemento Asfáltico para obtener el porcentaje óptimo.

PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO (% DE C.A.)	NÚMERO DE BRIQUETAS
4,80%	3
5,30%	3
5,80%	3
6,30%	3
6,80%	3
Total Briquetas Elaboradas	15

Fuente: Elaboración propia

En total se realizaron la siguiente cantidad de briquetas:

Tabla 21. Total de briquetas elaboradas

CEMENTO ASFÁLTICO	NÚMERO DE BRIQUETAS
PG 58-16	15
PG 64-10	15
PG 70-10	15
TOTAL BRIQUETAS ELABORADAS	45

Fuente: Elaboración propia

3.3. MUESTRA

La muestra son los cementos asfálticos de acuerdo al grado de desempeño según la zonificación realizada, para la elaboración de las mezclas asfálticas utilizando agregados que son obtenidos de diversas regiones para ellos se obtuvo de la chancadora Garzón dicha chancadora se encuentra ubicada en la comunidad de San Mateo y la arena de la planta asfaltadora de la alcaldía dicha planta se encuentra ubicada en la comunidad de la Pintada para un cemento asfáltico PG 64-22, cuyos agregados son procedentes del río San Mateo, de esta manera agregados de la chancadora UBESAN dicha chancadora se encuentra ubicada en la comunidad de Candado Chico para un cemento asfáltico PG 70-22, cuyos agregados son procedentes del río Bermejo y arena natural del río Tarija, de esta manera agregados de la chancadora de la empresa constructora Érica dicha chancadora se encuentra ubicada en el Rancho, agregados finos procedentes de la chancadora ubicada en San José de Charaja para un cemento asfáltico PG 58-28.

3.4. MUESTREO

El muestreo se lo realizará con el MÉTODO MARSHALL (ASTM D-1559) con el cual podremos realizar el comportamiento de las propiedades de las mezclas mediante dicho ensayo de laboratorio, observando los cambios producidos cuando se utiliza diferente tipo de cemento asfáltico y elaboradas con materiales de la región.

3.5. LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.5.1. Ubicación de la fuente de los materiales a utilizarse

➤ Agregado pétreo

Los materiales componentes de la investigación de la zonificación SUPERPAVE en el grado de desempeño del cemento asfáltico en el departamento de Tarija en función a las temperaturas extremas, para la elaboración de las mezclas asfálticas para las diferentes regiones del departamento, son provenientes:

Para la zona fría del departamento de Tarija se utilizó agregados de la siguiente tabla:

Tabla 22. *Agregados para la zona fría del departamento de Tarija*

Agregados	Procedencia	Ubicación
Grava 3/4"	Empresa Constructora Érica	Rancho
Gravilla 3/8"	Empresa Constructora Érica	Rancho
Arena Natural 3/8"	Charaja	San José de Charaja
Arena Triturada N°4	Charaja	San José de Charaja

Fuente: Elaboración Propia

Para la zona templada del departamento de Tarija se utilizó agregados de la siguiente tabla:

Tabla 23. *Agregados para la zona templada del departamento de Tarija*

Agregados	Chancadora	Ubicación
Grava 1"	Garzón	San Mateo
Gravilla 3/4"	Garzón	San Mateo
Arena Natural 3/8"	Alcaldía de la provincia Cercado	La Pintada

Fuente: Elaboración Propia

Para la zona cálida del departamento de Tarija se utilizó agregados de la siguiente tabla:

Tabla 24. *Agregados para la zona cálida del departamento de Tarija*

Agregados	Chancadora	Ubicación
Grava 1" (Rio Bermejo)	UBESAN	Candado Chico
Gravilla 3/4" (Rio Bermejo)	UBESAN	Candado Chico
Arena Natural N°4	UBESAN	Candado Chico

(Rio Tarija)		
Arena Triturada (Filler) N°4 (Rio Bermejo)	UBESAN	Candado Chico

Fuente: Elaboración propia

➤ **Cemento asfáltico**

El cemento asfáltico a utilizarse será de acuerdo a la zonificación realizada, los cuales serán los siguientes:

Para la zona fría del departamento de Tarija se utilizará el cemento asfáltico STRATURA de Brasil, de penetración 85/100, por su equivalencia que es igual a un cemento asfaltico de grado de desempeño de 58-28.

Para la zona templada del departamento de Tarija se utilizará el cemento asfáltico ASFALCHILE de Chile, de penetración 60/70, por su equivalencia que es igual a un cemento asfaltico de grado de desempeño de 64-22.

Para la zona templada del departamento de Tarija se utilizará el cemento asfáltico SUQUIA de Argentina, de penetración 70/100, por su equivalencia que es igual a un cemento asfaltico de grado de desempeño de 70-22.

3.6. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Para caracterizar y evaluar el comportamiento del cemento asfáltico, es necesario realizar los diversos ensayos, en este capítulo realizaremos una breve descripción de los diversos ensayos tradicionales para el método SUPERPAVE según el Manual Centro Americano sobre el cemento asfáltico clasificado por penetración y su equivalencia por grado de desempeño.

Se realiza la descripción del cemento asfaltico PG 70 – 22. Que corresponde para la zona cálida.

3.6.1. Penetración (ASTM D-5)

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un cemento asfáltico, en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo.

Figura 12. *Penetración de muestra*



Fuente: Propia

Datos obtenidos:

Tabla 25. *Datos del ensayo de penetración*

ENSAYOS	1	2
Lectura N°1	66 mm	66 mm
Lectura N°2	69 mm	68 mm
Lectura N°3	62 mm	64 mm
PROMEDIO	65,7 mm	66 mm
PENETRACIÓN PROMEDIO	65,8 mm	

Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Viscosidad SAYBOLT-FUROL (ASTM E102)

El ensayo de viscosidad Saybolt-Furol se emplea un viscosímetro Saybolt con un orificio Furol. Mediante el tiempo medido, en segundos, y la constante de calibración del viscosímetro, es posible calcular la viscosidad cinemática del material en la unidad fundamental, centistokes.

Figura 13. *Ensayo de viscosidad Saybolt Furol*



Fuente: Propia

Datos obtenidos:

Tabla 26. *Datos del ensayo de viscosidad SAYBOLT-FUROL*

ENSAYOS	Tiempo (segundos)
1	160
2	158

Fuente: Elaboración propia

Calculo. Se determinó el promedio de los dos ensayos

$$\text{Tiempo} = 159 \text{ segundos}$$

3.6.3. Punto de inflamación (ASTM D-92)

El punto de inflamación del cemento asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación.

Figura 14. *Llama de fuego en la muestra para determinar el punto de inflamación*



Fuente: Propia

Datos obtenidos:

Tabla 27. Datos del ensayo de punto de inflamación.

ENSAYOS	Temperatura (°C)
1	290
2	292

Fuente: Elaboración propia

Calculo. Se determina el promedio de los dos ensayos

$$\text{Temperatura} = 291 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3.6.4. Peso específico (ASTM D-70)

Aunque normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del cemento asfáltico que se emplea.

Figura 15. Cemento asfáltico a la mitad de picnómetro



Fuente: Propia

Datos obtenidos:

Tabla 28. Datos del ensayo de peso específico

Ensayo	1 (Grs.)	2 (Grs.)
Peso Picnómetro (A)	62,57	62,57
Peso Picnómetro + Agua (25°C) (B)	143,82	140,98
Peso Picnómetro + Muestra (C)	105,78	104,34
Peso Picnómetro + Agua + Muestra (D)	144,14	141,19
Peso Específico del Agua a 25 °C (e) (gr/cm ³)	0,997077	

Fuente: Elaboración propia

Calculo. Para el ensayo 1

$$\text{Peso Específico Cemento Asfáltico} = \frac{C - A}{B + C - A - D} * e$$

$$\text{Peso Espec. Cemento Asfáltico} = \frac{105,78 - 62,57}{143,82 + 105,78 - 62,57 - 144,14} * 0,997077$$

$$\text{Peso específico del cemento asfáltico} = 1,005 \text{ gr/cm}^3$$

Para el ensayo número dos se realizó el mismo procedimiento

Resultados.

Tabla 29. Resultados del ensayo peso específico

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Peso Específico de Cemento Asfáltico	gr/cm ³	1,005	1,008
Promedio	gr/cm ³	1,003	

Fuente: Elaboración propia

3.6.5. Punto de ablandamiento (ASTM D-36)

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de ablandamiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola.

Figura 16. *Muestras de cemento asfáltico en el baño de agua caliente*



Fuente: Propia

Datos obtenidos:

Tabla 30. *Datos del ensayo de punto de ablandamiento*

ENSAYOS	Temperatura (°C)
1	51
2	50

Fuente: Elaboración propia

Calculo. Se determina el promedio de los dos ensayos realizados

$$\text{Temperatura} = 50,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.7. ENSAYO EN LOS AGREGADOS

Los ensayos de caracterización de los agregados se los realizan para el respectivo control y verificación de los materiales pétreos a utilizar, además de mostramos el comportamiento de estos materiales en obra.

3.7.1. Granulometría (ASTM D-422)

Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de las partículas. Se utiliza un análisis granulométrico para determinar las propiedades relativas de los diferentes tamaños de partículas en una mezcla de agregados minerales. Para llevarlo cabo, se pasa una muestra pesada de agregado seco a través de un juego de mallas o tamices cuyo tamaño de abertura ha sido seleccionado previamente.

Las mallas de prueba para los proyectos de carreteras de granulometría SUPERPAVE es de acuerdo al tamaño máximo nominal y los que se utilizaron en este trabajo son aquellas con aberturas de: 1, 3/4, 1/2, 3/8 de pulgada cuadrada para las partículas gruesas y tamices de números: 4, 8, 16, 30, 50, 100, y 200 para las partículas finas.

Figura 17. *Tamizado del material grueso*



Fuente: Propia

La granulometría para la zona cálida es la siguiente para sus diversos tamaños nominales de sus agregados. El procedimiento se realizó para los agregados de la zona

cálida, se realizaron 3 análisis granulométricos y se obtuvo el promedio tanto para la grava, gravilla, arena triturada y arena natural la cual se muestra en la tabla 31.

Proceso de cálculo de porcentajes que pasan cada uno de los tamices. Ejemplo para el tamiz 3/4", los demás es el mismo procedimiento.

$$\% \text{ Que Pasa} = 100 - \left(\frac{\text{Peso Ret}}{\text{Peso total seco}} * 100 \right)$$

$$\% \text{ Que Pasa} = 100 - \left(\frac{989}{6374,5} * 100 \right) = 84,5\%$$

Tabla 31. Granulometría para la zona cálida

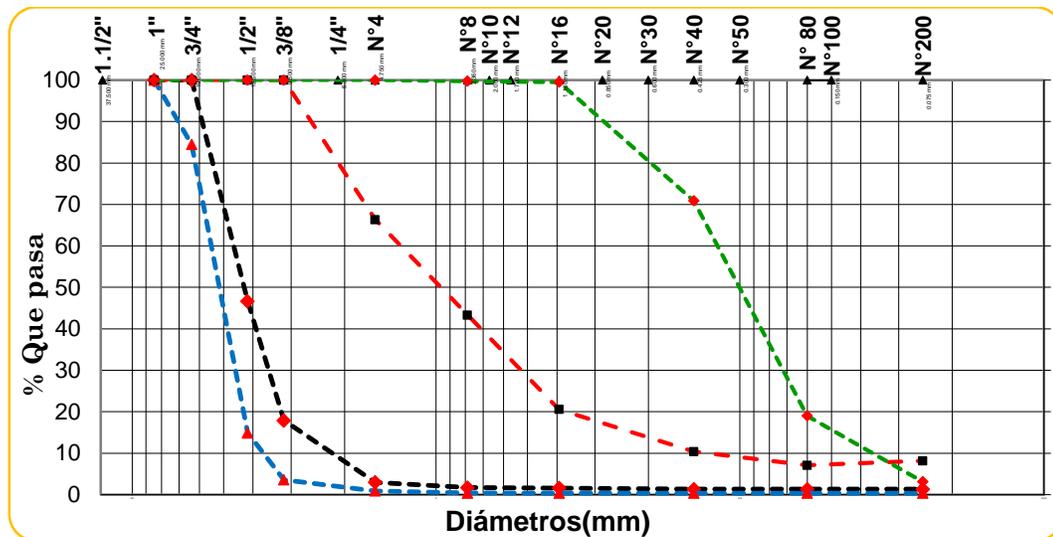
Peso Total Seco	6374,5 gr		5609,8 gr		680,6 gr		460,4 gr	
Tamiz	Grava – UBESAN		Gravilla – UBESAN		Arena Triturada – UBESAN		Arena Natural- Rio Tarija	
N°	Peso Ret.	% Que Pasa	Peso Ret.	% Que Pasa	Peso Ret.	% Que Pasa	Peso Ret.	% Que Pasa
1"	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
3/4"	989,0	84,5	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
1/2"	5425,6	14,9	2990,8	46,7	0,0	100,0	0,0	100,0
3/8"	6147,2	3,6	4606,3	17,9	0,0	100,0	0,0	100,0
N° 4	6317,5	0,9	5442,3	3,0	229,2	66,3	0,0	100,0
N° 8	6348,9	0,4	5515,1	1,7	386,0	43,3	1,2	99,7
N° 16	6351,7	0,4	5521,3	1,6	540,9	20,5	2,2	99,5

N° 30	6351,7	0,4	5515,0	1,7	552,2	18,9	8,5	98,2
N° 50	6351,7	0,4	5535,0	1,3	610,0	10,4	134,0	70,9
N° 100	6351,7	0,4	5535,0	1,3	632,5	7,1	372,9	19,0
N° 200	6351,7	0,4	5535,0	1,3	625,2	8,1	446,0	3,1

Fuente: Elaboración Propia

La curva granulométrica SUPERPAVE para la zona cálida será la siguiente.

Figura 18. Curva Granulométrica



Fuente: Elaboración Propia

3.7.2. Partículas planas y alargadas agregado grueso (ASTM D 4791–99)

Este método de ensayo cubre la determinación de los porcentajes de partículas planas, alargadas, o partículas planas y alargadas en agregados gruesos. También se define como índice de alargamiento de una fracción del agregado, al porcentaje en peso de las partículas que la forman cuya dimensión máxima (longitud) es superior a 9/5 de la dimensión media de la fracción.

Figura 19. Partículas planas y alargadas seleccionadas



Fuente: Propia

➤ Grava de 3/4"

Tabla 32. Datos del ensayo de partículas planas y alargadas de la grava (3/4")

MATERIAL	Peso Total de la muestra (gr.)	Peso Retenido Partículas planas y largadas (gr)
Grava 3/4"	1250,1	76
Gravilla 3/8"	1050,1	56

Fuente: Elaboración propia

Calculo:

$$\% \text{ de Part. Chatas y Alargadas} = \frac{\text{Peso Rete. Partículas Chatas y Alargadas}}{\text{Peso Total de la Muestra}} * 100$$

$$\% \text{ Total de Partículas Chatas y Alargadas} = \frac{76}{1250,1} * 100$$

$$\% \text{ Total de Partículas Chatas y Alargadas} = 6,08 \%$$

➤ Agregado de 3/8"

Calculo:

$$\% \text{ de Part. Chatas y Alargadas} = \frac{\text{Peso Rete. Partículas Chatas y Alargadas}}{\text{Peso Total de la Muestra}} * 100$$

$$\% \text{ Total de Partículas Chatas y Alargadas} = \frac{56}{1050,1} * 100$$

$$\% \text{ Total de Partículas Chatas y Alargadas} = 5,33 \%$$

3.7.3. Equivalente de arena (ASTM D 2419)

La intención de éste ensayo es que sirva como una prueba de campo rápida para mostrar las proporciones relativas de polvo fino o material arcilloso en suelos o agregados graduados.

Figura 20. *Muestra de arena en reposo*



Fuente: Propia

Datos obtenidos en la práctica:

Tabla 33. *Datos del ensayo de equivalente de arena*

ENSAYO	Lecturas	
Ensayo N°	1	2
Lectura nivel superior	41,2	43
Lectura nivel inferior	28	28
Número de Ensayos realizados	2	

Fuente: Elaboración propia

Calculo:

$$\% \text{ de Arena} = \frac{\text{Lectura nivel inferior}}{\text{Lectura nivel superior}} * 100$$

$$\% \text{ de Arena} = \frac{28}{41,2} * 100$$

$$\% \text{ de arena} = 67,96\%$$

Para el ensayo dos se realizan el mismo procedimiento anterior

Tabla 34. *Resultados del Ensayo Equivalente de Arena*

Descripción	Ensayos	
	1	2
% de Arena	67,96 %	65,12 %
Promedio	66,54 %	

Fuente: Elaboración propia

3.7.4. Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM C 88 y AASHTO T104)

Este método cubre los procedimientos a ser seguidos en ensayos de agregados para determinar su resistencia a la desintegración por soluciones saturadas de sulfato de sodio.

Figura 21. *Saturando los agregados mediante la solución de sulfato de sodio*



Fuente: Propia

➤ **Agregado grueso**

Tabla 35. Datos del método de sulfatos

Granulometría				Peso Materiales	
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después
Nº	Pasa	Ret.		Ensayo(Grs.)	Ensayo(Grs.)
2	2	1	100,0	0,0	0,0
1	1	3/4"	97,7	700,6	699,2
3/4"	3/4"	1/2"	72,9	501,9	498,8
1/2"	1/2"	3/8"	63,2	303,2	296,4
3/8"	3/8"	Nº 4	43,0	300,0	292,8

Fuente: Elaboración propia

Calculo:

- **Pérdida por diferencia (Grs.). Para el tamiz 3/4"**

Pérdida por diferencia = Peso del material antes – peso del material después

$$\text{Pérdida por diferencia} = 700,6 - 699,2$$

$$\text{Pérdida por diferencia} = 1,4 \text{ gr.}$$

- **Porcentaje pasa el tamiz más fino (%). Para el tamiz 3/4"**

Porcentaje pasa el tamiz más fino = Material 3/4" – Material 3/8"

$$\text{Porcentaje pasa el tamiz más fino} = 100 - 97,7$$

$$\text{Porcentaje pasa el tamiz más fino} = 24,8 \%$$

- **Porcentaje de pérdida respecto al tamiz (%). Para el tamiz 3/4"**

$$\text{Porcentaje de pérdida respecto al tamiz} = \frac{\text{Pérdida por diferencia}}{\text{Peso antes ensayo}} * 100$$

$$\text{Porcentaje de pérdida respecto al tamiz} = \frac{1,4}{700,6} * 100$$

$$\text{Porcentaje de pérdida respecto al tamiz} = 0,2 \%$$

- **Porcentaje de pérdida respecto a la muestra total (%). Para el tamiz 3/4"**

$$\% \text{ de pérd. respec. muestr. total} = \frac{\% \text{ de pérdida resp. al tamiz} * \% \text{ Pasa al tamiz}}{100}$$

$$\text{Porcentaje de pérdida respecto a la muestra total} = \frac{24,8 * 0,2}{100}$$

$$\text{Porcentaje de pérdida respecto a la muestra total} = 0,05\%$$

- **Total de porcentaje de pérdida de peso (Grs.)**

$$\% \text{ Total de pérdida Peso} = \sum \% \text{ de pérdida respecto a la muestra total}$$

$$\% \text{ Total de pérdida Peso} = 0,05 + 0,06 + 0,45 + 1,03$$

$$\% \text{ Total de pérdida Peso} = 1,59\%$$

Resultados: Se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 36. Resultado del método de los sulfatos

Tamiz retiene	Perdida por Diferencia (Grs.)	% Pasa al Tamiz más fino	% Perdida Respecto Tamiz	% Perdida Respecto Muestra Total
1"				
3/4"	1,4	24,8	0,20	0,05
1/2"	3,1	9,7	0,62	0,06
3/8"	6,8	20,2	2,24	0,45
N°4	7,2	43,0	2,40	1,03
Total de porcentaje de pérdida de peso				1,59

Fuente: Elaboración propia

➤ **Agregado fino**

Datos**Tabla 37. Datos del método de sulfatos**

Granulometría				Peso Materiales	
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después
Nº	Pasa	Ret.		Ensayo(Grs.)	Ensayo(Grs.)
3/8"	3/8"	Nº 4	43,0	300,0	293,8
Nº 4	Nº 4	Nº 8	31,2	100,0	96,9
Nº 8	Nº 8	Nº 16	20,1	100,0	94,8
Nº 16	Nº 16	Nº 30	14,4	100,0	95,0
Nº 30	Nº 30	Nº 50	10,3	100,0	93,9

Fuente: Elaboración propia

Calculo: Es el mismo procedimiento realizado en el agregado grueso.

Resultados: Se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 38. Resultado del método de los sulfatos

Tamiz retiene	Perdida por Diferencia (Grs.)	% Pasa al Tamiz más fino	% Perdida Respecto Tamiz	% Perdida Respecto Muestra Total
Nº 4	6,2	11,8	2,07	0,24
Nº 8	3,1	11,0	3,10	0,34
Nº 16	5,2	5,8	5,20	0,30
Nº 30	5,0	4,1	5,00	0,20
Nº 50	6,1	10,3	6,10	0,63

Total de porcentaje de pérdida de peso	1,72
-----------------------------------------------	------

Fuente: Elaboración propia

- **Total de porcentaje de pérdida de los agregados finos más agregados gruesos:**

$\% \text{ Total de pérdida} = \% \text{ Total de pérdida (Grueso)} + \% \text{ Total de pérdida (Fino)}$

$\% \text{ Total de pérdida} = 1,59 + 1,72$

$\% \text{ Total de pérdida} = 3,31\%$

3.7.5. Peso específico y absorción del agregado fino (AASHTO T 84 y ASTM C 128)

El peso específico y la absorción de los agregados son propiedades importantes que se requieren para el diseño de mezclas asfálticas.

Figura 22. Peso del matraz lleno de arena con agua



Fuente: Propia

Datos obtenidos en la práctica:

Tabla 39. Datos del peso específico de los agregados finos

Descripción	Arena Triturada y Arena Natural (Grs.)	
	Peso Frasco Seco Vacío	180
Peso Frasco + Muestra	493,9	491,7
Peso Muestra Saturada Superficie Seca (s)	504	502
Peso Muestra Seca (a)	498,1	495,7
Peso Agua (w)	475,1	683,4
Peso Muestra + Agua (b)	789	995,1
Ensayos	1	2

Fuente: Elaboración propia

Calculo: Para el ensayo N° 1

- **Peso específico del agregado seco:**

$$\text{Peso Específico Seco} = \frac{a}{(s + w) - b}$$

$$\text{Peso Específico Seco} = \frac{498,1}{(504 + 475,1) - 789}$$

$$\text{Peso Específico Seco} = 2,620 \text{ gr/cm}^3$$

- **Peso específico saturado superficie seco:**

$$\text{Peso específico saturado superficie seco} = \frac{s}{(s + w) - b}$$

$$\text{Peso específico saturado superficie seco} = \frac{504}{(504 + 475,1) - 789}$$

$$\text{Peso específico saturado superficie seco} = 2,651 \text{ gr/cm}^3$$

- **Peso específico aparente:**

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{a}{(a + w) - b}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{498,1}{(498,1 + 475,1) - 789}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,704 \text{ gr/cm}^3$$

- **Porcentaje de absorción del agregado fino:**

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{x - a}{a} * 100$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{504 - 498,1}{504} * 100$$

$$\text{Porcentaje de absorción del agregado fino} = 1,185 \%$$

Para el ensayo número dos se realizó el mismo procedimiento anterior.

Resultado:

Tabla 40. *Peso específico y porcentaje de absorción del agregado fino*

Peso específico del agregado fino	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio del 1 y 2
Peso Específico Seco (gr/cm ³)	2,620	2,605	2.613

Peso Específico Saturado Superficie Seco (gr/cm ³)	2,651	2,638	2.645
Peso Específico Aparente (gr/cm ³)	2,704	2,694	2.699
Porcentaje de Absorción (%)	1,185	1,271	1,228

Fuente: Elaboración propia

3.7.6. Peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM C 127)

El peso específico y la absorción de los agregados son propiedades importantes que se requieren para el diseño de mezclas asfálticas.

Figura 23. Colocado de la canastilla con agregado grueso para el peso saturado



Fuente: Propia

Datos obtenidos en la práctica:

Tabla 41. Datos del peso específico de los agregados finos

Descripción	Grava 3/4"	Gravilla 3/8"
Peso Muestra Saturada Superficie Seca (a)	2689	2475
Peso Material Seco (b)	2668,8	2456
Peso Muestra + Cesto Suspendido en Agua	2435,7	2300
Peso del Cesto Suspendido en Agua	758	758
Peso Muestra Suspendida en Agua (c)	1677,7	1542

Ensayos	1	2
---------	---	---

Fuente: Elaboración propia

Calculo:

Para la grava 3/4"

- **Peso específico del agregado seco:**

$$\text{Peso Específico del agregado seco} = \frac{b}{a - c}$$

$$\text{Peso Específico del agregado seco} = \frac{2668,8}{2689 - 1677,7}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = 2,639 \text{ gr/cm}^3$$

- **Peso específico del agregado saturado de superficie seca:**

$$\text{Peso específico del agregado saturado de superficie seca} = \frac{a}{a - c}$$

$$\text{Peso específico del agregado saturado de superficie seca} = \frac{2689}{2689 - 1677,7}$$

$$\text{Peso específico del agregado saturado de superficie seca} = 2,659 \text{ gr/cm}^3$$

- **Peso específico aparente:**

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{b}{b - c}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{2668,8}{2668,8 - 1677,7}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,693 \text{ gr/cm}^3$$

- **Porcentaje de absorción del agregado:**

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{a - b}{b} * 100$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{2689 - 2668,8}{2668,8} * 100$$

Porcentaje de absorción del agregado fino = 0,757 %

Para la gravilla 3/8" se realizó el mismo procedimiento que se realizó para la grava 3/4"

Resultados:

Tabla 42. *Peso específico y porcentaje de absorción del agregado grueso*

Peso específico del agregado fino	Grava 3/4"	Gravilla 3/8"
Peso Específico Seco (gr/cm ³)	2,639	2,632
Peso Específico Saturado Superficie Seco (gr/cm ³)	2,659	2,653
Peso Específico Aparente (gr/cm ³)	2,693	2,687
Porcentaje de Absorción (%)	0,757	0,774

Fuente: Elaboración propia

3.7.7. Porcentaje de caras fracturadas de los árido (ASTM D 5821-95)

Este método permite determinar el porcentaje, en peso de una muestra de agregado grueso con una, dos o más caras fracturadas.

Figura 24. *Caras fracturadas del agregado grueso*



Fuente: Propia

Datos obtenidos de la práctica para la grava

Tabla 43. Datos del ensayo de caras fracturadas para la grava (3/4")

ENSAYO		Lecturas (Grs.)
Grava 3/4"	Peso total	2351,7
	Peso retenido tamiz N° 8	2240
Gravilla 3/8"	Peso total	2359,6
	Peso retenido tamiz N° 8	2241,7

Fuente: Elaboración propia

Calculo. Para la grava 3/4"

$$\text{Porcentaje de Caras fracturadas} = \frac{\text{Peso de Caras Fracturadas}}{\text{Peso Total de Muestra}} * 100$$

$$\text{Porcentaje de Caras fracturadas} = \frac{2240}{2351,7} * 100$$

$$\text{Caras Fracturadas} = 95,3 \%$$

Calculo. Para la gravilla 3/8"

$$\text{Porcentaje de Caras fracturadas} = \frac{\text{Peso de Caras Fracturadas}}{\text{Peso Total de Muestra}} * 100$$

$$\text{Porcentaje de Caras fracturadas} = \frac{2241,7}{2359,6} * 100$$

$$\text{Caras Fracturadas} = 95 \%$$

3.7.8. Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (AASHTO T 96 y ASTM C 131)

Este ensayo emplea para determinar la resistencia de los agregados triturados a una carga abrasiva, empleando la máquina de desgaste de los Ángeles.

Figura 25. Grava después del desgaste de los ángeles



Fuente: Propia

Datos obtenidos de la práctica:

Tabla 44. Datos del ensayo de desgaste de los ángeles de la grava (3/4")

PASADO	RETENIDO	CANTIDAD TOMADA (Grs.)
3/8"	1/4"	2500

1/4"	N°4	2500
RETENIDO TAMIZ DE CORTE N° 12 (1,7 mm)		4096
Diferencia		904
Número de ensayos		1
Tipo de Gradación		B
Carga Abrasiva		11 esferas a 32,5 Rpm

Fuente: Elaboración propia

Calculo

- **Desgaste**

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso total}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{904 \text{ gr}}{5000 \text{ gr}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 18,08\%$$

Datos obtenidos de la práctica

Tabla 45. Datos del ensayo de desgaste de los ángeles de la gravilla (3/8")

PASADO	RETENIDO	CANTIDAD TOMADA (Grs.)
3/8"	1/4"	2500
1/4"	N°4	2500
RETENIDO TAMIZ DE CORTE N° 12 (1,7mm)		3958
Diferencia		1042
Número de ensayos		1
Tipo de Gradación		C
Carga Abrasiva		11 esferas a 32,5 Rpm

Fuente: Elaboración propia

Calculo

- **Desgaste**

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso total}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1042 \text{ gr}}{5000 \text{ gr}} * 100$$

$$\text{Desgaste} = 20,84\%$$

3.7.9. Límites de Atterberg (Límite Líquido) (ASTM D 4318-84)

Este método de ensayo determina su límite líquido de la arena.

Figura 26. Muestra en el aparato Casa Grande



Fuente: Propia

Datos obtenidos de la práctica

Tabla 46. Datos del ensayo de límites de Atterberg

N° de Tara	Peso Suelo Hum.+Tara	Peso Suelo Seco+Tara	Peso agua	Peso Tara	Peso Suelo Seco	% de hum.	N° de Golpes
1	45,6	42,58	3,02	21,48	21,10	14,31	7
8	46,38	43,28	3,10	20,80	22,48	13,79	10

4	42,24	39,66	2,58	21,00	18,66	13,83	8
---	-------	-------	------	-------	-------	-------	---

Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 47. Resultados del ensayo de límites de Atterberg

Límite Líquido	12,5	Límite Plástico	N.P.
-----------------------	------	------------------------	-------------

Fuente: Elaboración propia

3.6.10. Porcentaje de partículas laminadas (ASTM D-4791)

Este método de ensayo cubre la determinación de los porcentajes de partículas laminares en agregados gruesos.

Figura 27. Partículas laminadas del agregado grueso



Fuente: Propia

Datos obtenidos de la práctica para la grava

Tabla 48. Datos del ensayo de porcentaje de partículas laminadas para la grava (3/4")

MATERIAL	Peso Total de la Muestra (gr)	Peso Retenido Partículas Laminas (gr)
Grava 3/4"	2110	114,0
Gravilla 3/8"	2007,8	110,5

Fuente: Elaboración propia

Calculo. Para la grava

$$\% \text{ Total de Partículas Laminadas} = \frac{\text{Peso Retenido Partículas Laminas}}{\text{Peso Total de la Muestra}} * 100$$

$$\% \text{ Total de Partículas Laminadas} = \frac{114}{2110} * 100$$

$$\text{Porcentaje de partículas laminadas} = 5,4 \%$$

Calculo. Para la gravilla

$$\% \text{ Total de Partículas Laminadas} = \frac{\text{Peso Retenido Partículas Laminas}}{\text{Peso Total de la Muestra}} * 100$$

$$\% \text{ Total de Partículas Laminadas} = \frac{110,5}{2007,8} * 100$$

$$\text{Porcentaje de partículas laminadas} = 5,5 \%$$

APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SUPERPAVE SEGÚN SHRP PARA EL CÁLCULO DE LAS TEMPERATURAS DEL PAVIMENTO

4.1.1. Obtención de las temperaturas promedio mínima y máxima, y sus correspondientes desviaciones estándares

Para obtener las temperaturas máximas, mínimas y promedio, se tiene que baso en la información de las 22 estaciones meteorológicas seleccionadas en el capítulo III. Se el programa Excel para ordenar y calcular la información que se obtuvo como promedios, desviación estándar, entre otros. Se definió el grado de confiabilidad de 50% y 98%. para obtener la temperatura del aire máxima, mínima y promedio.

4.1.1.1. Promedio de las temperaturas máximas de siete días consecutivos (°C)

Se realiza el ejemplo para la estación meteorológica de Tarija del Aeropuerto para los 7 días consecutivos del 12 al 18 del mes de diciembre del año 2015 donde se presentó la temperatura máxima promedio y se muestra en la tabla 49. Las demás estaciones meteorológica se muestran en el Anexo C.

Ecuación 12. *Promedio de la temperaturas máxima de 7 días consecutivos (°C)*

$$T_{m_{\max}} = \sum_7^{i+6} \frac{T_i}{7} = \frac{T_i + T_{i+1} + T_{i+2} + T_{i+3} + T_{i+4} + T_{i+5} + T_{i+6}}{7}$$

$$T_{m_{\max}} = \frac{36,8 + 34,7 + 37,7 + 29,5 + 32,5 + 37,3 + 32}{7}$$

$$T_{m_{\max}} = 34,4 \text{ °C}$$

Las temperaturas máximas promedio de cada año de la estación meteorológica de Tarija del Aeropuerto se muestran en la tabla 49.

Tabla 49. *Temperaturas: máximas de siete días consecutivos, mínimas de cada año y sus desviaciones estándares para la estación meteorológica del Aeropuerto de Tarija*

Estación: AEROPUERTO TARIJA			
N°	AÑO	Tmedmáx	Tmedmín
1	1995	33,0	-3,2
2	1996	30,8	-7,7
3	1997	35,0	-2,5
4	1998	32,7	-2,2
5	1999	32,9	-5,6
6	2000	32,4	-6,8
7	2001	32,4	-5,9
8	2002	32,7	-2,8
9	2003	32,7	-2,8
10	2004	33,5	-4,2
11	2005	31,7	-4,2
12	2006	31,7	-4,8
13	2007	33,3	-6,2
14	2008	31,6	-5,2
15	2009	34,2	-5,3
16	2010	32,5	-9,2
17	2011	32,0	-6,4
18	2013	32,7	-6,4
19	2014	34,5	-3,8
20	2015	34,4	-2,5
Temperatura Media		32,8	-4,9
Desviación Estándar		1,07	1,93

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

4.1.1.2. **Calculo de la desviación estándar de las temperaturas máximas de los siete días más calientes (°C)**

Con la siguiente ecuación se obtuvo la desviación estándar para las temperaturas máximas de cada estación meteorológica seleccionada.

Se realiza el ejemplo para la estación meteorológica de Tarija del Aeropuerto para los 7 días consecutivos para un periodo de 20 años se muestra en la tabla 50. Las demás estaciones meteorológicas se muestran en el Anexo C.

Ecuación 13. *Desviación estándar de las temperaturas máximas de los 7 días más calientes (°C)*

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{m\max} - T)^2}{n - 1}}$$

4.1.1.3. Temperaturas promedio mínima (°C)

Se calculó la temperatura promedio mínima para veinte años de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Se realiza el ejemplo para la estación de Tarija del Aeropuerto, se presenta la temperatura mínima 20 años y se muestra en las tablas 49 y 51 las temperaturas mínimas de cada mes. Las demás estaciones se muestran en el Anexo D.

Ecuación 14. *Temperaturas promedio mínima (°C)*

$$T_{m\min} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}$$

$$T_{m\min} = \frac{-98}{20}$$

$$T_{m\min} = -4,9 \text{ °C}$$

4.1.1.4. Se calcula la desviación estándar para todos los años de registro (°C)

Con la siguiente ecuación se obtuvo la desviación estándar para las temperaturas máximas de cada estación meteorológica seleccionada. Se realiza el ejemplo para la estación meteorológica de Tarija del Aeropuerto para los temperaturas mínimas de cada año para un periodo de 20 años se muestra en la tabla 50. Las demás estaciones meteorológicas se muestran en Anexo D.

Ecuación 15. *Desviación de las temperaturas mínima*

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{m\min} - T)^2}{n - 1}}$$

A continuación se presenta la tabla 50 las temperaturas máximas y sus correspondientes desviaciones estándares obtenidas de las estaciones meteorológicas utilizadas para realizar el estudio.

Tabla 50. *Temperaturas máximas promedio de siete días consecutivos (°C)*

N°	Estación	Temperaturas máximas de siete días consecutivos (°C)	
		Promedio	Desviación Estándar
1	Tarija – Aeropuerto	33,08	1,10
2	San Andrés	33,27	1,34
3	San Jacinto Sud	34,34	1,44
4	Yesera Norte	28,84	1,65
5	El Tejar Tarija	33,05	1,00
6	Campanario	22,92	1,17
7	Coimata	31,68	0,94
8	Sella Quebradas	32,65	1,02
9	El Puente	34,00	2,26
10	Trancas	32,95	1,21
11	Agüaraycito	40,19	1,58
12	Palmar Grande	39,68	1,96
13	Yacuiba – Aeropuerto	37,06	1,25
14	Villa Montes – Aeropuerto	40,69	1,60
15	Itau	38,00	2,23
16	Bermejo – Aeropuerto	39,73	1,54
17	Cañas	31,77	1,02
18	Emborozu	37,20	2,43
19	Ce.Na. Vit.	33,47	1,48
20	Juntas	34,25	1,95
21	Copacabana	25,54	1,46
22	Entre Ríos	33,39	1,60

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

La tabla 51 presenta las temperaturas mínimas y sus correspondientes desviaciones estándares obtenidas de las estaciones meteorológicas utilizadas para realizar el estudio.

Tabla 51. *Temperaturas mínimas (°C)*

N°	Estación	Temperaturas mínimas (°C)	
		Promedio	Desviación Estándar
1	Tarija – Aeropuerto	-4,92	1,89
2	San Andrés	-4,93	1,88
3	San Jacinto Sud	-5,25	1,74
4	Yesera Norte	-5,80	2,04
5	El Tejar Tarija	-5,26	1,92
6	Campanario	-10,13	2,21
7	Coimata	-6,19	2,01
8	Sella Quebradas	-5,38	2,48
9	El Puente	-1,33	3,41
10	Trancas	-4,75	2,29
11	Aguaraycito	-1,05	2,58
12	Palmar Grande	-0,03	3,84
13	Yacuiba – Aeropuerto	-1,34	2,01
14	Villa Montes – Aeropuerto	-2,45	2,58
15	Itau	-2,1	2,28
16	Bermejo – Aeropuerto	-0,12	1,98
17	Cañas	-5,60	2,33
18	Emborozu	-1,00	1,84
19	Ce.Na.Vit.	-6,45	2,09
20	Juntas	-4,75	1,90
21	Copacabana	-11,08	1,7
22	Entre Ríos	-3,62	2,29

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

4.1.2. Obtención de las temperaturas del aire a diferentes niveles de confiabilidad

Se realiza con una confiabilidad asociada a los valores de 50% y 98%, tabla 48.

Tabla 52. *Confiabilidades seleccionadas y su respectiva desviación normal estándar*

Confiabilidad (%)	Desviación normal estándar (Z)
50	0
98	2

Fuente: SUPERPAVE y el Diseño de Mezclas Asfálticas

4.1.2.1. Cálculo de la temperatura máxima del aire

El cálculo de la temperatura máxima del aire se obtuvo de acuerdo a la confiabilidad del 50% y 98% y su correspondiente desviación estándar de los datos y el promedio de las temperaturas máximas, dado por la ecuación 16.

Se realiza el ejemplo para la estación meteorológica de Tarija del Aeropuerto y para una confiabilidad del 98% y se muestra en la tabla 53 para las 22 estaciones meteorológicas.

Ecuación 16. *Temperatura máxima del aire*

$$T_{\text{airemax}} = T_{m_{\text{max}}} + Z * \sigma$$

$$T_{\text{airemax}} = 32,8 + 2 * 1,07$$

$$T_{\text{airemax}} = 35,29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para una confiabilidad del 50% se utiliza la misma ecuación que para una confiabilidad del 98%

A continuación se presenta la tabla 53 con las temperaturas del aire máximas y para la confiabilidad de 50% y 98%.

Tabla 53. *Temperaturas máximas del aire (°C)*

N°	Estación	Temperaturas máximas del aire (°C)	
		Confiabilidad	
		50%	98%
1	Tarija – Aeropuerto	33,08	35,29
2	San Andrés	33,27	35,95
3	San Jacinto Sud	34,34	37,23
4	Yesera Norte	28,84	32,14
5	El Tejar Tarija	33,05	35,05
6	Campanario	22,92	25,26
7	Coimata	31,68	33,55
8	Sella Quebradas	32,65	34,70
9	El Puente	34,00	38,53
10	Trancas	32,95	35,38
11	Agüaraycito	40,19	43,35
12	Palmar Grande	39,68	43,60
13	Yacuiba – Aeropuerto	37,06	39,56
14	Villa Montes – Aeropuerto	40,69	43,88
15	Itau	38,00	42,66
16	Bermejo – Aeropuerto	39,73	42,82
17	Cañas	31,77	33,80
18	Emborozu	37,20	42,06
19	Ce.Na.Vit.	33,47	36,43
20	Juntas	34,25	38,16
21	Copacabana	25,54	28,46
22	Entre Ríos	33,39	36,59

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

4.1.2.2. Cálculo de la temperatura mínima del aire

El cálculo de la temperatura mínima del aire aplico la confiabilidad requerida y la desviación estándar de los datos, se calcula mediante la ecuación 17.

Se realiza el ejemplo para la estación meteorológica de Tarija del Aeropuerto y para una confiabilidad del 98%. Se muestra en la tabla 54 para todas las estaciones meteorológicas.

Ecuación 17. Temperatura mínima del aire

$$T_{\text{airemin}} = T_{m_{\text{min}}} - Z * \sigma$$

$$T_{\text{airemin}} = -4,9 - 2 * 1,93$$

$$T_{\text{airemin}} = - 8,69 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para una confiabilidad del 50% se usa la misma ecuación.

A continuación se presenta la tabla 54 con las temperaturas del aire mínimas para la confiabilidad de 50% y 98%.

Tabla 54. Temperaturas mínimas del aire ($^{\circ}\text{C}$)

N°	Estación	Temperaturas mínimas del aire	
		Confiabilidad	
		50%	98%
1	Tarija – Aeropuerto	-4,92	-8,69
2	San Andrés	-4,93	-8,68
3	San Jacinto Sud	-5,25	-8,74
4	Yesera Norte	-5,80	-9,87
5	El Tejar Tarija	-5,26	-9,09
6	Campanario	-10,13	-14,54
7	Coimata	-6,19	-10,22
8	Sella Quebradas	-5,38	-10,34
9	El Puente	-1,33	-8,14
10	Trancas	-4,75	-9,33
11	Agüaraycito	-1,05	-6,22
12	Palmar Grande	-0,03	-7,71
13	Yacuíba – Aeropuerto	-1,34	-5,36
14	Villa Montes – Aeropuerto	-2,45	-7,60
15	Itau	-2,10	-6,66
16	Bermejo – Aeropuerto	-0,12	-4,08
17	Cañas	-5,60	-10,25
18	Emborozu	-1,00	-4,68
19	Ce.Na.Vit.	-6,45	-10,63
20	Juntas	-4,75	-8,54
21	Copacabana	-11,08	-14,48
22	Entre Ríos	-3,62	-8,20

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

4.1.3. Obtención de las temperaturas del pavimento

4.1.3.1. Temperatura máxima del pavimento modelo SHRP

Se utilizo los datos de la latitud como valor absoluto y los valores obtenidos de temperaturas máximas del aire a un nivel de confiabilidad de 50 % y 98 %, correspondientes a cada estación meteorológica seleccionada así se obtienes la temperatura máxima del pavimento a 20 mm de la superficie.

Se realiza el ejemplo para la estación meteorológica de Tarija del Aeropuerto y para una confiabilidad del 98%. Se muestra en la tabla 55 para todas las estaciones meteorológicas.

Ecuación 18. *Temperatura máxima del pavimento a veinte milímetros desde la superficie*

$$T_{\text{max.20mm}} = 0,9545 * (T_{\text{airemax}} - 0,00618 * \text{Lat}^2 + 0,2289 * \text{Lat} + 42,2) - 17,78$$

$$T_{\text{max.20mm}} = 0,9545 * (35,29 - 0,00618 * 21,55^2 + 0,2289 * 21,55 + 42,2) - 17,78$$

$$T_{\text{max.20mm}} = 58,15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabla 55. Temperatura máxima del pavimento obtenida para cada estación meteorológica según el modelo SHRP

N°	Estación	Temperaturas máximas del pavimento (°C)		Latitud (°)
		Confiabilidad		
		50%	98%	
1	Tarija – Aeropuerto	56,04	58,15	-21,5466667
2	San Andrés	56,22	58,78	-21,6233333
3	San Jacinto Sud	57,25	60,00	-21,6102778
4	Yesera Norte	52,00	55,15	-21,3722222
5	El Tejar Tarija	56,02	57,92	-21,5430556
6	Campanario	46,35	48,58	-21,5125
7	Coimata	54,71	56,50	-21,4991667
8	Sella Quebradas	55,64	57,59	-21,3863889
9	El Puente	56,94	61,26	-21,25
10	Trancas	55,93	58,24	-21,3080556
11	Agüaraycito	62,83	65,85	-21,39
12	Palmar Grande	62,34	66,09	-21,5313889
13	Yacuiba – Aeropuerto	59,83	62,22	-21,9494444
14	Villa Montes – Aeropuerto	63,31	66,37	-21,2547222
15	Itau	60,73	65,18	-21,7041667
16	Bermejo – Aeropuerto	62,34	65,28	-22,7708333
17	Cañas	54,78	56,72	-21,9022222
18	Emborozu	59,95	64,59	-22,2669444
-19	Ce.Na.Vit.	56,41	59,24	-21,6919444
20	Juntas	57,15	60,88	-21,8102778
21	Copacabana	48,84	51,63	-21,8
22	Entre Ríos	56,34	59,40	-21,5030556

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

4.1.3.2. Temperatura mínima del pavimento modelo SHRP

Los resultados de las temperaturas mínimas del pavimento se basan en la ecuación 19 desarrolladas por SHRP. Se realiza el ejemplo para la estación meteorológica de Tarija del Aeropuerto y para una confiabilidad del 98%. Se muestra en la tabla 56 para todas las estaciones meteorológicas.

Ecuación 19. Temperatura mínima del pavimento

$$T_{\min} = 0,859 * T_{airemin} + 1,7$$

$$T_{\text{mín}} = 0,859 * (-8,69) + 1,7$$

$$T_{\text{mín}} = -5,76$$

Tabla 56. *Temperatura mínima del pavimento obtenida para cada estación meteorológica según el modelo SHRP*

N°	Estación	Temperaturas mínimas del pavimento		Latitud (°)
		Confiabilidad		
		50%	98%	
1	Tarija – Aeropuerto	-2,52	-5,76	-21,5466667
2	San Andrés	-2,53	-5,76	-21,6233333
3	San Jacinto Sud	-2,81	-5,80	-21,6102778
4	Yesera Norte	-3,28	-6,78	-21,3722222
5	El Tejar Tarija	-2,81	-6,11	-21,5430556
6	Campanario	-7,00	-10,79	-21,5125
7	Coimata	-3,62	-7,08	-21,4991667
8	Sella Quebradas	-2,92	-7,18	-21,3863889
9	El Puente	0,56	-5,30	-21,25
10	Trancas	-2,38	-6,32	-21,3080556
11	Agüaraycito	0,80	-3,64	-21,39
12	Palmar Grande	1,68	-4,92	-21,5313889
13	Yacuiba – Aeropuerto	0,55	-2,90	-21,9494444
14	Villa Montes – Aeropuerto	-0,40	-4,83	-21,2547222
15	Itau	-0,10	-4,02	-21,7041667
16	Bermejo – Aeropuerto	1,60	-1,80	-22,7708333
17	Cañas	-3,11	-7,11	-21,9022222
18	Emborozu	0,84	-2,32	-22,2669444
19	Ce.Na.Vit.	-3,84	-7,43	-21,6919444
20	Juntas	-2,38	-5,64	-21,8102778
21	Copacabana	-7,82	-10,74	-21,8
22	Entre Ríos	-1,41	-5,35	-21,5030556

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

4.1.3.3. Temperatura intermedia de cada estación

La temperatura intermedia de cada estación meteorológica se la obtiene de cada una de estas y así verificar si cumple con el grado de desempeño del cemento asfáltico. Las cuales se muestra y se compara en la tabla 59.

4.1.4. Selección del grado de desempeño del cemento asfáltico para cada estación meteorológica

Para la selección del cemento asfáltico se debe utilizar la tabla 57 que contiene la especificación SUPERPAVE, que sirve para calcular los distintos cementos asfálticos asociados a las estaciones meteorológicas estudiadas tanto para los niveles de confianza del 50% y 98%. Estos resultados se muestran en las tablas 58 y 59.

Tabla 57. Grados de desempeño del cemento asfáltico de SUPERPAVE

Alta Temperatura	Baja Temperatura
PG 46	34, 40, 46
PG 52	10,16, 22, 28, 34, 40, 46
PG 58	16, 22, 28, 34, 40
PG 64	10,16, 22, 28, 34, 40
PG 70	10,16, 22, 28, 34, 40
PG 76	10,16, 22, 28, 34
PG 82	10,16, 22, 28, 34

Fuente: Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas SUPERPAVE

Para determinar si un cemento es apropiado para un determinado clima, este debe tener una temperatura alta superior de la localidad, una temperatura baja inferior a la de la zona y una temperatura intermedia mayor o igual a la temperatura intermedia máxima del lugar de emplazamiento del proyecto. Lo cual nos permite dar el valor de grado de desempeño del cemento asfáltico para cada estación meteorológica utilizada

Tabla 58. Grado de desempeño para cada estación meteorológica para una confiabilidad del 50%

N°	Estación	PG			
		50%			
		Tmáx.	Tmín.	Tinter.	Ligante
1	Tarija – Aeropuerto	58	-16	25	58 – 16
2	San Andrés	58	-16	25	58 – 16
3	San Jacinto Sud	58	-16	25	58 – 16
4	Yesera Norte	52	-16	22	52 – 16
5	El Tejar Tarija	58	-16	25	58 – 16
6	Campanario	52	-16	25	52 – 16
7	Coimata	58	-16	25	58 – 16
8	Sella Quebradas	58	-16	25	58 – 16
9	El Puente	58	-16	25	58 – 16
10	Trancas	58	-16	25	58 – 16
11	Agüaraycito	64	-16	28	64 – 16
12	Palmar Grande	64	-16	28	64 – 16
13	Yacuiba – Aeropuerto	64	-16	28	64 – 16
14	Villa Montes – Aeropuerto	64	-16	28	64 – 16
15	Itau	64	-16	28	64 – 16
16	Bermejo – Aeropuerto	64	-16	28	64 – 16
17	Cañas	58	-16	25	58 – 16
18	Emborozu	64	-16	28	64 – 16
19	Ce.Na.Vit.	58	-16	25	58 – 16
20	Juntas	64	-16	28	64 – 16
21	Copacabana	52	-10	22	52 – 16
22	Entre Ríos	58	-16	25	58 – 16

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

Tabla 59. Grado de desempeño para cada estación meteorológica para una confiabilidad del 98%

N°	Estación	PG			
		98%			
		Tmáx.	Tmín.	Tinter.	Ligante
1	Tarija – Aeropuerto	64	-16	28	64 – 16
2	San Andrés	64	-16	28	64 – 16
3	San Jacinto Sud	64	-16	28	64 – 16
4	Yesera Norte	58	-16	25	58 – 16
5	El Tejar Tarija	58	-16	25	58 – 16
6	Campanario	52	-16	22	52 – 16
7	Coimata	58	-16	25	58 – 16
8	Sella Quebradas	58	-16	25	58 – 16
9	El Puente	64	-16	28	64 – 16
10	Trancas	64	-16	28	64 – 16
11	Agüaraycito	70	-16	31	70 – 16
12	Palmar Grande	70	-16	31	70 – 16
13	Yacuiba – Aeropuerto	64	-16	28	64 – 16
14	Villa Montes – Aeropuerto	70	-16	31	64 – 16
15	Itau	70	-16	31	70 – 16
16	Bermejo – Aeropuerto	70	-16	31	64 – 16
17	Cañas	58	-16	25	58 – 16
18	Emborozu	70	-16	31	70 – 16
19	Ce.Na.Vit.	64	-16	28	64 – 16
20	Juntas	64	-16	28	64 – 16
21	Copacabana	52	-16	22	52 – 16
22	Entre Ríos	64	-16	28	64 – 16

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

Observando los valores de la tabla 58 y 59 es posible decir que existen casos donde se obtiene un mismo grado de desempeño (PG) para ambos niveles de confianza, mientras que en otros se sube un grado más, producto de variaciones que se producen en los estimadores estadísticos.

Como consecuencia de esto, se confeccionará el mapa de recomendación para la utilización de cementos asfálticos para un nivel de confianza del 50% y del 98%, dado que representa en forma más real, lo que ocurre en la realidad (sólo está asociado a un nivel de error del 2%).

4.1.5. Temperatura intermedia de cada estación

Para la temperatura intermedia del pavimento se determinó para cada estación meteorológica, se la determinó a partir de la ecuación 20. La temperatura del pavimento debe ser mayor o igual que la temperatura intermedia de la zona en estudio.

Ecuación 20. *Temperatura intermedia del pavimento*

$$T_{\text{Interm.}} = \frac{T_{\text{Máx.}} - T_{\text{Mín.}}}{2} + 4$$

Se realizara el ejemplo para la estación meteorológica de Tarija del Aeropuerto y para una confiabilidad del 98%. Se muestra en la tabla 60 para todas las estaciones meteorológicas.

$$T_{\text{Interm.}} = \frac{64 - 16}{2} + 4$$

$$T_{\text{Interm.}} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Se selecciona la temperatura mínima de las estaciones meteorológicas que se presenta en una zona, para todo el departamento de Tarija tendremos cementos asfálticos con grado de desempeño PG 58-16, PG 64-16 Y PG 70-16, cumpliendo así tanto para las temperaturas máximas y mínimas según la metodología realizada.

Para las estaciones meteorológicas que se utilizaron para la validación de los mapas se realizó el mismo procedimiento y se puede observar en el Anexo e.

Tabla 60. *Temperaturas intermedias de las estaciones meteorológicas seleccionadas*

N°	Estación	Temperaturas intermedias	
		De cada estación meteorológica (°C)	del pavimento (°C) 50%
1	Tarija - Aeropuerto	17,9	25
2	San Andrés	17,5	25
3	San Jacinto Sud	18,4	25
4	Yesera Norte	15,0	22
5	El Tejar Tarija	18,0	25
6	Campanario	10,0	25
7	Coimata	16,9	25
8	Sella Quebradas	17,5	25
9	El Puente	19,2	25
10	Trancas	17,9	25
11	Agüaraycito	24,1	28
12	Palmar Grande	23,0	28
13	Yacuiba – Aeropuerto	21,1	28
14	Villa Montes – Aeropuerto	23,5	28
15	Itau	20,4	28
16	Bermejo – Aeropuerto	22,3	28
17	Cañas	16,9	25
18	Emborozu	20,2	28
19	Ce.Na.Vit.	18,0	25
20	Juntas	18,1	28
21	Copacabana	11,5	22
22	Entre Ríos	19,0	25

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

Análisis de resultados:

Cumple con los grados de desempeño del cemento asfáltico seleccionados por temperaturas extremas anteriormente y ahora por temperatura extrema, por lo tanto no es necesario modificar el grado de desempeño del cemento asfáltico.

Al cumplir las temperaturas intermedias para una confiabilidad del 50% entonces cumplirá con una confiabilidad del 98% ya que serán mayores.

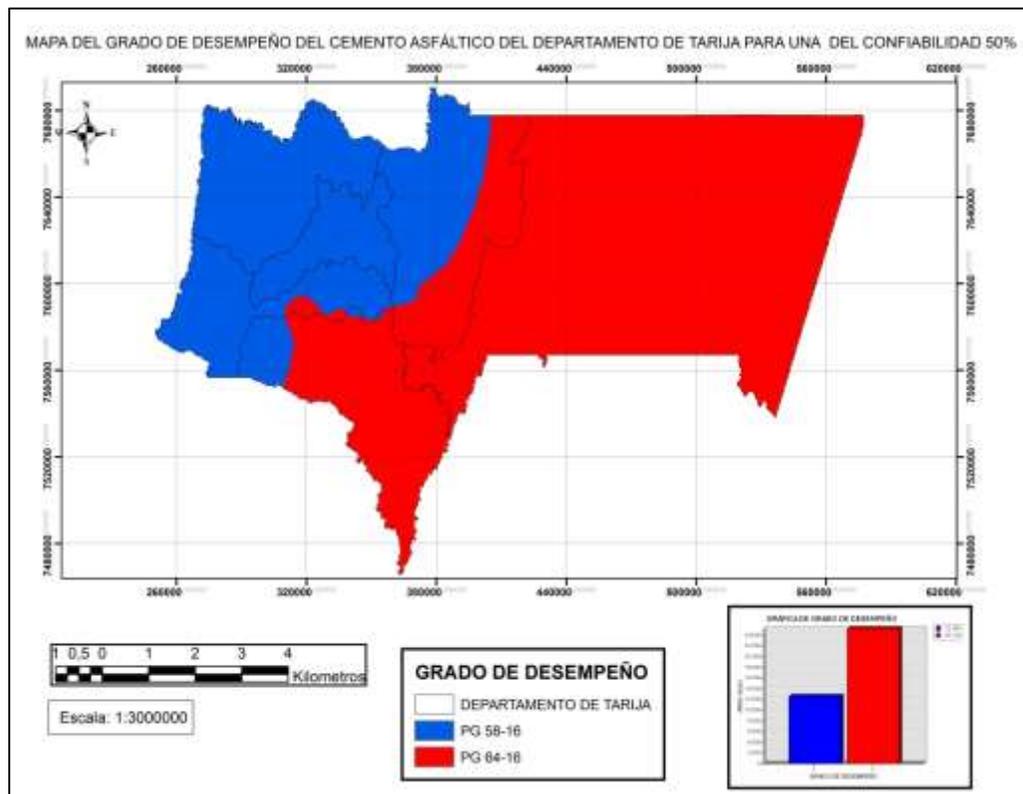
4.1.6. Elaboración del mapa con la zonificación PG del cemento asfáltico

Una vez determinado los grados del cemento asfáltico (PG) se procedió a elaborar un mapa partiendo de los resultados obtenidos en las diferentes estaciones.

Con base en los datos de temperaturas máximas, promedios y mínimas del aire de cada una de las estaciones meteorológicas, se realizó el diseño de los mapas del grado desempeño con las temperaturas máximas y mínimas del pavimento, obtenidas por las ecuaciones definidas por SHRP con la ayuda del programa ArcGIS se elaboró el mapa ya que es el metodología SUPERPAVE recomienda este programa para la elaboración del mapa, la secuencia de la generación del mapa se encuentra en el Anexo F.

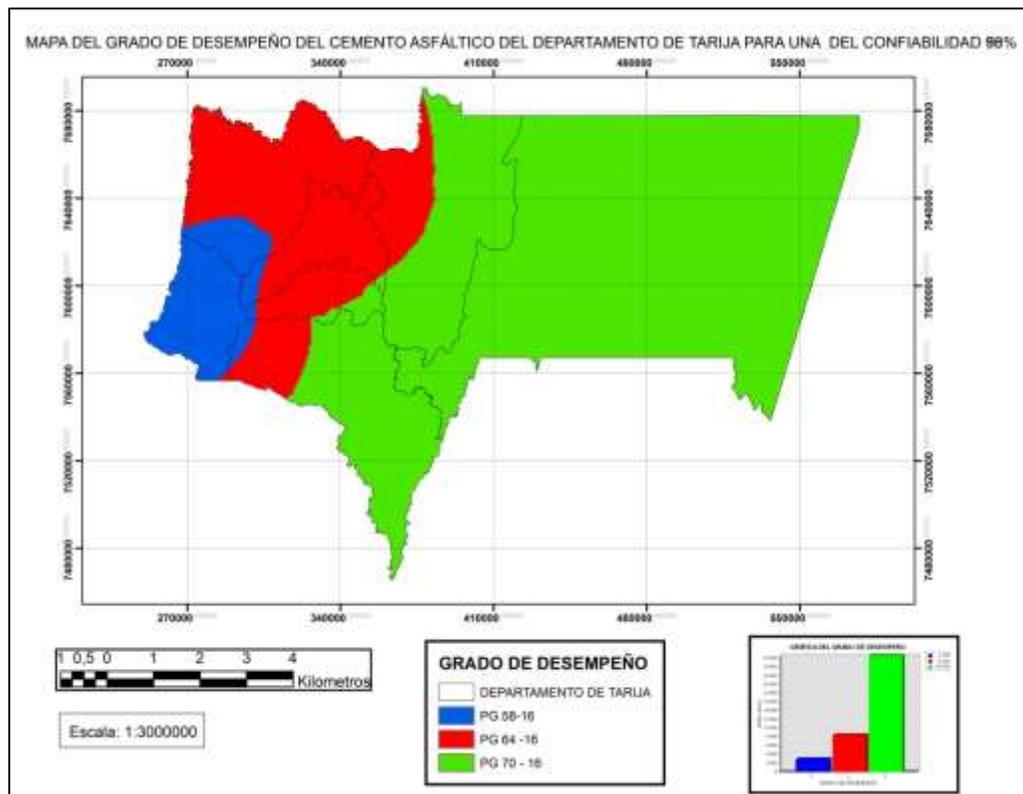
A continuación, se muestran los mapas para la obtención del cemento asfáltico por el método del SUPERPAVE para el 50% y 98% de confiabilidad. Lógicamente para el 98% de confiabilidad se obtienen parámetros más representativos de lo que ocurre en la realidad, ya que existe solamente un 2% de valores sin considerar en nuestra determinación de temperaturas.

Figura 28. *Mapa para un 50% de confiabilidad*



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Mapa para un 98% de confiabilidad



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se realizó el mapa de grado de desempeño del cemento asfáltico para un nivel de confianza del 50% el cual tiene más error por lo tanto mayor probabilidad de que las temperaturas del pavimento sean superadas y el 98%, representa en forma más real, lo que ocurre en la realidad (sólo está asociado a un nivel de error del 2%).

4.1.7. Validación de los mapas de la zonificación SUPERPAVE

Para la validación de los mapas de la zonificación SUPERPAVE se realizó de la siguiente manera:

- Se utilizó las estaciones meteorológicas que no cumplieron para la elaboración de los mapas las cuales se realizó el análisis de consistencia ver el Anexo B las cuales son:

Tabla 61. Estaciones meteorológicas utilizadas en la validación de los mapas

N°	Estaciones Meteorológicas
1	Turumayo
2	Yesera Sur
3	Embalse San Jacinto
4	Canasmoro
5	Tomayapo Pueblo
6	Iscayachi - San Antonio
7	Tucumillas
8	La Merced
9	Carapari
10	El 9 Bermejo
11	La Angostura
12	Chocloca
13	Saykan Perulas

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

- Se determinó las temperaturas del pavimento y se seleccionó su correspondiente cemento asfáltico por grado de desempeño para estas estaciones meteorológicas, ver el Anexo E.
- Se ubicó estas estaciones con sus respectivos valores de grado de desempeño dentro de los mapas de la zonificación, con lo cual se verificó que están dentro de los rangos ya que sus valores son iguales o menor a los de la zonificación.
- Se realizó la validación de los mapas para una confiabilidad del 50% y del 98% los cuales cumplieron para ambos mapas ya que las el grado de desempeño de

los mapas son mayores o iguales a los valores de las estaciones utilizadas en la validación.

Se muestra en los siguientes puntos los resultados de la validación de los mapas.

4.1.7.1. Validación del mapa de la zonificación SUPERPAVE para una confiabilidad del 50%

- Las estaciones meteorológicas con grado de desempeño menor o igual que un PG 64 - 16 son las siguientes las cuales son ubicadas en el mapa, verificando así que estas están dentro del grado de desempeño PG 64 – 16

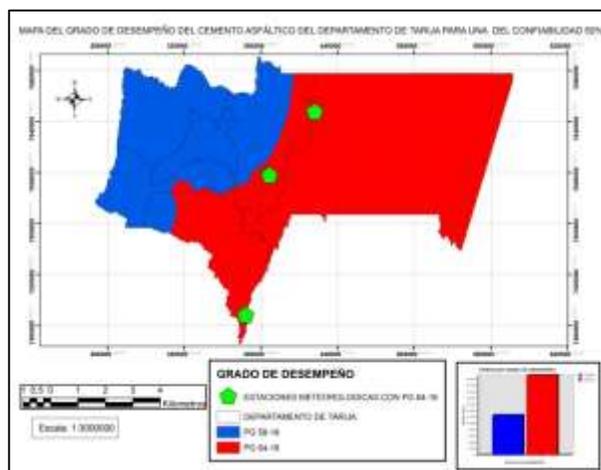
Tabla 62. Estaciones meteorológicas con grado de desempeño 64-16

N°	Estaciones meteorológicas	Grado de desempeño
1	Carapari	64 – 16
2	Saykan Perulas	64 – 16
3	El 9 Bermejo	64 – 16

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

Como se puede observar en la siguiente figura los valores de grado de desempeño del cemento asfáltico de cada estación meteorológica está dentro de los valores de la zona. El color azul tiene un PG 58-16 y el rojo un PG 64-16.

Figura 30. Validación del mapa con grado de desempeño 64-16



Fuente: Elaboración propia

- Las estaciones meteorológicas con grado de desempeño menor o igual que un PG 58 - 16 son las siguientes las cuales son ubicadas en el mapa, verificando así que estas están dentro del grado de desempeño PG 58 - 16

Tabla 63. Estaciones meteorológicas con grado de desempeño menor o igual a 58-16

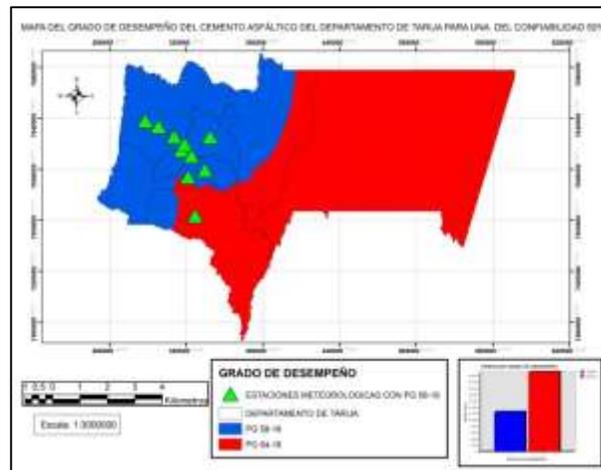
Nº	Estaciones meteorológicas	Grado de desempeño
1	Turumayo	58 – 16
2	Yesera Sur	58 – 16
3	Embalse San Jacinto	58 – 16
4	Canasmoro	58 – 16
5	Tomayapo Pueblo	58 – 16
6	Ischayachi - San Antonio	52 – 16
7	Tucumillas	52 – 16
8	La Merced	58 – 16
9	La Angostura	58 – 16

10	Chocloca	58 – 16
----	----------	---------

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

Como se puede observar en la siguiente figura los valores de grado de desempeño del cemento asfáltico de cada estación meteorológica está dentro de los valores de la zona. El color azul tiene un PG 58-16 y el rojo un PG 64-16.

Figura 31. Validación del mapa con grado de desempeño 58-16



Fuente: Elaboración propia

4.1.7.2. Validación del mapa de la zonificación SUPERPAVE para una confiabilidad del 98%

- No hubo ninguna estación meteorológica con un PG 70 – 16 así que se valida con los otros grados de desempeño encontrados.
- Las estaciones meteorológicas con un grado de desempeño PG 64 - 16 son las siguientes las cuales son ubicadas en el mapa, verificando así que estas están dentro del grado de desempeño PG 64 – 16

Tabla 64. Estaciones meteorológicas con grado de desempeño 64-16

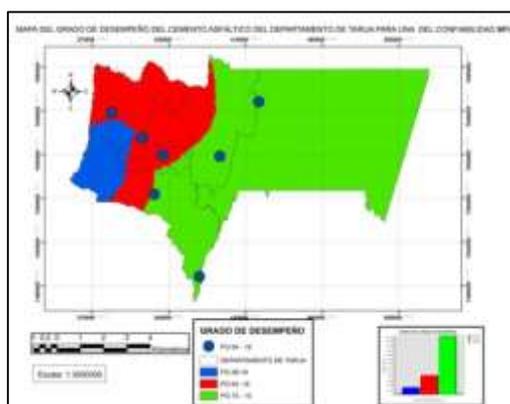
Nº	Estaciones meteorológicas	Grado de desempeño
1	Carapari	64 – 16

2	Tomayapo Pueblo	64 – 16
3	Turumayo	64 – 16
4	La Merced	64 – 16
5	El 9 Bermejo	64 – 16
6	La angostura	64 – 16
7	Saykan Perulas	64 – 16

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

Como se puede observar en la siguiente figura los valores de grado de desempeño del cemento asfáltico de cada estación meteorológica está dentro de los valores de la zona. El color azul tiene un PG 58-16, el rojo un PG 64-16 y el verde un PG 70-16.

Figura 32. Validación del mapa con grado de desempeño 64-16



Fuente: Elaboración propia

- Las estaciones meteorológicas con grado de desempeño menor o igual que un PG 58 - 16 son las siguientes las cuales son ubicadas en el mapa, verificando así que estas están dentro del grado de desempeño PG 58 – 16

Tabla 65. Estaciones meteorológicas con grado de desempeño 58-16

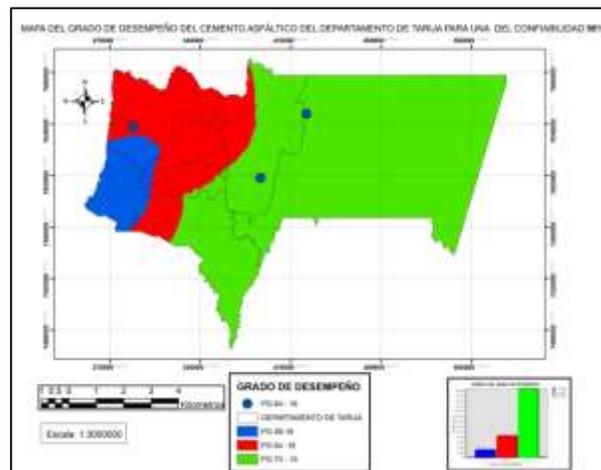
Nº	Estaciones meteorológicas	Grado de desempeño
1	Yesera Sur	58 – 16
2	Embalse San Jacinto	58 – 16
3	Canasmoro	58 – 16

4	Iscayachi-San Antonio	52 – 16
5	Tucumillas	52 – 16
6	Chocloca	58 – 16

Fuente: Elaboración propia (De acuerdo a los datos obtenidos por SENAMHI Y AASANA)

Como se puede observar en la siguiente figura los valores de grado de desempeño del cemento asfáltico de cada estación meteorológica está dentro de los valores de la zona. El color azul tiene un PG 58-16, el rojo un PG 64-16 y el verde un PG 70-16.

Figura 33. Validación del mapa con grado de desempeño 58-16



Fuente: Elaboración propia

4.2. APLICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO POR GRADO DE DESEMPEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS SEGÚN LA ZONIFICACIÓN SUPERPAVE

4.2.1. Resultados del levantamiento de información de los componentes de la mezclas asfálticas

4.2.1.1. Resultado de los ensayos de los cementos asfálticos

De los ensayos realizados se tiene los siguientes resultados, los mismos que son comparados con su respectiva especificación exigida, proveniente de la normativa AASTHO y del distribuidor.

4.2.1.1.1. Resultado de los ensayos de los cementos asfálticos para la zona cálida

La caracterización del cemento asfáltico se encuentra en el Anexo K, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 66. Resultados y comparaciones del cemento asfáltico para la zona cálida con la norma ASTM

ENSAYOS	PG 70-22 = PEN 70-100		RESULTADO	NORMA
	Mínimo	Máximo		
Penetración a 25°C muestra original (mm)	70	100	72,5	ASTM D-5
Viscosidad Saybolt Furol a 135 °C, (segundos)	85	-	250,5	ASTM D-102
Punto de inflamación, Copa Cleveland, (°C)	232	-	252	ASTM D-92
Peso específico (gr/cm ³)	1	1,05	1,006	ASTM D-70
Punto de ablandamiento (°C)	43	51	46	ASTM D-36

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.1.2. Resultado de los ensayos de los cementos asfálticos para la zona fría

La caracterización del cemento asfáltico se encuentra en el Anexo M, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 67. Resultados y comparaciones del cemento asfáltico para la zona fría con la norma ASTM

ENSAYOS	PG 58-28 = PEN 85-100		RESULTADO	NORMA
	Mínimo	Máximo		
Penetración a 25°C muestra original (mm)	85	100	92,8	ASTM D-5
Viscosidad Saybolt Furol a 135 °C, (segundos)	85	-	138,5	ASTM D-102
Punto de inflamación, Copa Cleveland, (°C)	232	-	280,5	ASTM D-92
Peso específico (gr/cm ³)	1	1,0015	1,001	ASTM D-70
Punto de ablandamiento (°C)	41,4	53,2	44	ASTMD-36

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.1.3. Resultado de los ensayos de los cementos asfálticos para la zona templada

La caracterización del cemento asfáltico se encuentra en el Anexo L, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 68. Resultados y comparaciones del cemento asfáltico para la zona templada con la norma ASTM

ENSAYOS	PG 64-22 = PEN 60-70		RESULTADO	NORMA
	Mínimo	Máximo		
Penetración a 25°C muestra original (mm)	60	70	65,8	ASTM D-5
Viscosidad Saybolt Furol a 135 °C, (segundos)	85	-	159	ASTM D-102
Punto de inflamación, Copa Cleveland, (°C)	232	-	291	ASTM D-92
Peso específico (gr/cm ³)	1	1,005	1,003	ASTM D-70
Punto de ablandamiento (°C)	41	53	50,5	ASTM D-36

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2. Resultado de los ensayos de los agregados:

Se presenta los siguientes resultados de las tres regiones, los mismos que son comparados por la norma ASTM y por el método SUPERPAVE.

4.2.1.2.1. Resultado de los ensayos de los agregados de la zona cálida

La caracterización del agregado se encuentra en el Anexo H, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 69. Resultados y comparación del agregado de la zona cálida con la norma ASTM

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultado	Norma ASTM
		Mín.	Máx.		
Partículas planas y alargadas	Grava 3/4"	-	10%	6,08%	D 4791 - 99
	Gravilla 3/8"	-	10%	5,33%	
Equivalente de arena	Arena	45%	-	66,54%	D 2419
Durabilidad por el Método de los Sulfatos	Grava; Gravilla	-	12%	1,59%	C-88
	Arena	-	12%	1,72%	
Peso específico de los agregados	Grava 3/4"	-	-	2,639 gr/m ³	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	2,632 gr/m ³	
	Arena			2,613 gr/m ³	C-128
absorción de agua de los agregados	Grava 3/4"	-	-	0,757%	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	0,774%	
	Arena	-	-	1,23%	C-128
	Grava 3/4"	-	35%	18,08%	C 131

Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Gravilla 3/8"	-	35%	20,84%	
Porcentaje de Caras Fracturadas para dos caras	Grava 3/4"	90%	-	95,3%	D 5821 -95
	Gravilla 3/8"	90%	-	95%	
Límites de Atterberg	Arena			LL=12,5	D 4318 -84
Porcentaje de partículas laminadas	Grava 3/4"	-	15%	5,40%	D 4791
	Gravilla 3/8"	-	15%	5,50%	

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2.2. Resultado de los ensayos de los agregados de la zona fría

La caracterización del agregado se encuentra en el Anexo J, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 70. Resultados y comparaciones del agregado de la zona fría con la norma ASTM

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultado	Norma ASTM
		Mín.	Máx.		
Partículas planas y alargadas	Grava 3/4"	-	10%	3,02%	D 4791 - 99
	Gravilla 3/8"	-	10%	2,96%	
Equivalente de arena	Arena	45%	-	67,78%	D 2419
Durabilidad por el Método de los Sulfatos	Grava; Gravilla	-	12%	3,23%	C-88
	Arena	-	12%	3,93%	
Peso específico de los agregados	Grava 3/4"	-	-	2,555 gr/m ³	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	2,562 gr/m ³	

	Arena			2,587 gr/m ³	C-128
absorción de agua de los agregados	Grava 3/4"	-	-	1,205%	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	2,256%	
	Arena	-	-	1,66%	C-128
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Grava 3/4"	-	35%	28,08%	C 131
	Gravilla 3/8"	-	35%	29,32%	
Porcentaje de Caras Fracturadas para dos caras	Grava 3/4"	90%	-	97%	D 5821 -95
	Gravilla 3/8"	90%	-	97,04%	
Límites de Atterberg	Arena			LL=11,2	D 4318 -84
Porcentaje de partículas laminadas	Grava 3/4"	-	15%	6,24%	D 4791
	Gravilla 3/8"	-	15%	6,50%	

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2.3. Resultado de los ensayos de los agregados de la zona templada

La caracterización del agregado se encuentra en el Anexo I, Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 71. Resultados y comparaciones del agregado de la zona templada con la norma ASTM

Ensayo	Agregados	Especificación	Resultado	
--------	-----------	----------------	-----------	--

		Mín.	Máx.		Norma ASTM
Partículas planas y alargadas	Grava 3/4"	-	10%	4,19%	D 4791 - 99
	Gravilla 3/8"	-	10%	2,10%	
Equivalente de arena	Arena	45%	-	52,67%	D 2419
Durabilidad por el Método de los Sulfatos	Grava; Gravilla	-	12%	1,69%	C-88
	Arena	-	12%	1,62%	
Peso específico de los agregados	Grava 3/4"	-	-	2,603 gr/m ³	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	2,586 gr/m ³	
	Arena			2,628 gr/m ³	C-128
absorción de agua de los agregados	Grava 3/4"	-	-	1,49%	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	1,47%	
	Arena	-	-	1,49%	C-128
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Grava 3/4"	-	35%	27,22%	C 131
	Gravilla 3/8"	-	35%	21,58%	
Porcentaje de Caras Fracturadas para dos caras	Grava 3/4"	90%	-	90,4%	D 5821 -95
	Gravilla 3/8"	90%	-	91,00%	
Límites de Atterberg	Arena			LL=13,1	D 4318 -84
Porcentaje de partículas laminadas	Grava 3/4"	-	15%	2,14%	D 4791
	Gravilla 3/8"	-	15%	6,23%	

Fuente: Elaboración propia

Valor Máximo	100	85,2	15,3	3,6	1,0	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Valor Mínimo	100	84,2	14,9	3,5	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Valor Promedio	100	84,6	15,0	3,6	1,0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Desviación Estándar	0,0	0,51	0,21	0,03	0,06	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 73. Granulometría del Agregado de 3/8"

N° Ensayo	% Que Pasa Por Tamiz										
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
1	100	100	46,4	17,5	4,0	1,6	1,5	1,3	1,3	1,3	1,3
2	100	100	46,7	17,9	3,0	1,7	1,6	1,7	1,3	1,3	1,3
3	100	100	47,5	16,2	3,8	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
RESUMEN ESTADISTICO											
Numero de Ensayo	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Valor Máximo	100	100	47,5	17,9	4,0	1,7	1,6	1,7	1,3	1,3	1,3
Valor Mínimo	100	100	46,4	16,2	3,0	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

Valor Promedio	100	100	46,9	17,2	3,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3
Desviación Estándar	0,0	0,00	0,53	0,87	0,54	0,22	0,19	0,26	0,09	0,09	0,09

Fuente: Elaboración propia

Tabla 74. Granulometría de la arena triturada

N° Ensayo	% Que Pasa Por Tamiz										
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
1	100	100	100	100	65,0	42,5	20,1	12,9	10,4	7,7	6,2
2	100	100	100	100	66,3	43,3	20,5	12,4	10,4	7,1	5,9
3	100	100	100	100	67,8	43,6	20,2	12,4	10,1	7,4	8,0
RESUMEN ESTADISTICO											
Numero de Ensayo	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Valor Máximo	100	100	100	100	67,8	43,6	20,5	12,9	10,4	7,7	8,0
Valor Mínimo	100	100	100	100	65,0	42,5	20,1	12,4	10,1	7,1	5,9
Valor Promedio	100	100	100	100	66,4	43,1	20,3	12,6	10,3	7,4	6,7
Desviación Estándar	0,0	0,00	0,00	0,00	1,40	0,56	0,23	0,29	0,14	0,34	1,15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 75. Granulometría de la arena natural

N° Ensayo	% Que Pasa Por Tamiz										
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
1	100	100	100	100	100	99,9	99,6	79,5	50,0	19,6	3,3
2	100	100	100	100	100	99,7	99,5	79,7	49,2	19,0	3,1
3	100	100	100	100	100	99,9	99,8	78,0	49,9	19,5	3,6
RESUMEN ESTADISTICO											
Numero de Ensayo	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Valor Máximo	100	100	100	100	100	99,9	99,8	79,7	50,0	19,6	3,6
Valor Mínimo	100	100	100	100	100	99,7	99,5	78,0	49,2	19,0	3,1
Valor Promedio	100	100	100	100	100	99,9	99,6	79,1	49,7	19,4	3,3
Desviación Estándar	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,15	0,92	0,44	0,31	0,22

Fuente: Elaboración propia

En esta investigación se realizó la mezcla de agregados provenientes de varias zonas del departamento, en este caso se explicara de la chancadora UBESAN del departamento de Tarija ubicado en la comunidad de Candado Chico, para la cual se ha determinado la granulométrica SUPERPAVE de acuerdo al tamaño nominal del agregado máximo, para la elaboración de mezclas asfálticas para la zona cálida del departamento de Tarija.

Para el diseño de la granulometría SUPERPAVE, se utilizó los materiales que se disponía, tanto para el agregado grueso como para el fino, con lo cual se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 15% de agregado grueso de 3/4", 27%

de grava de 3/8", 48% de agregado fino arena triturada, 10% de agregado fino natural para la granulometría de la mezcla.

En la siguiente tabla se presenta los pesos del material retenidos en cada tamiz tanto para el agregado grueso y fino.

4.2.3. Dosificación de los materiales planilla de granulometría proyectada para la zona cálida del departamento de Tarija

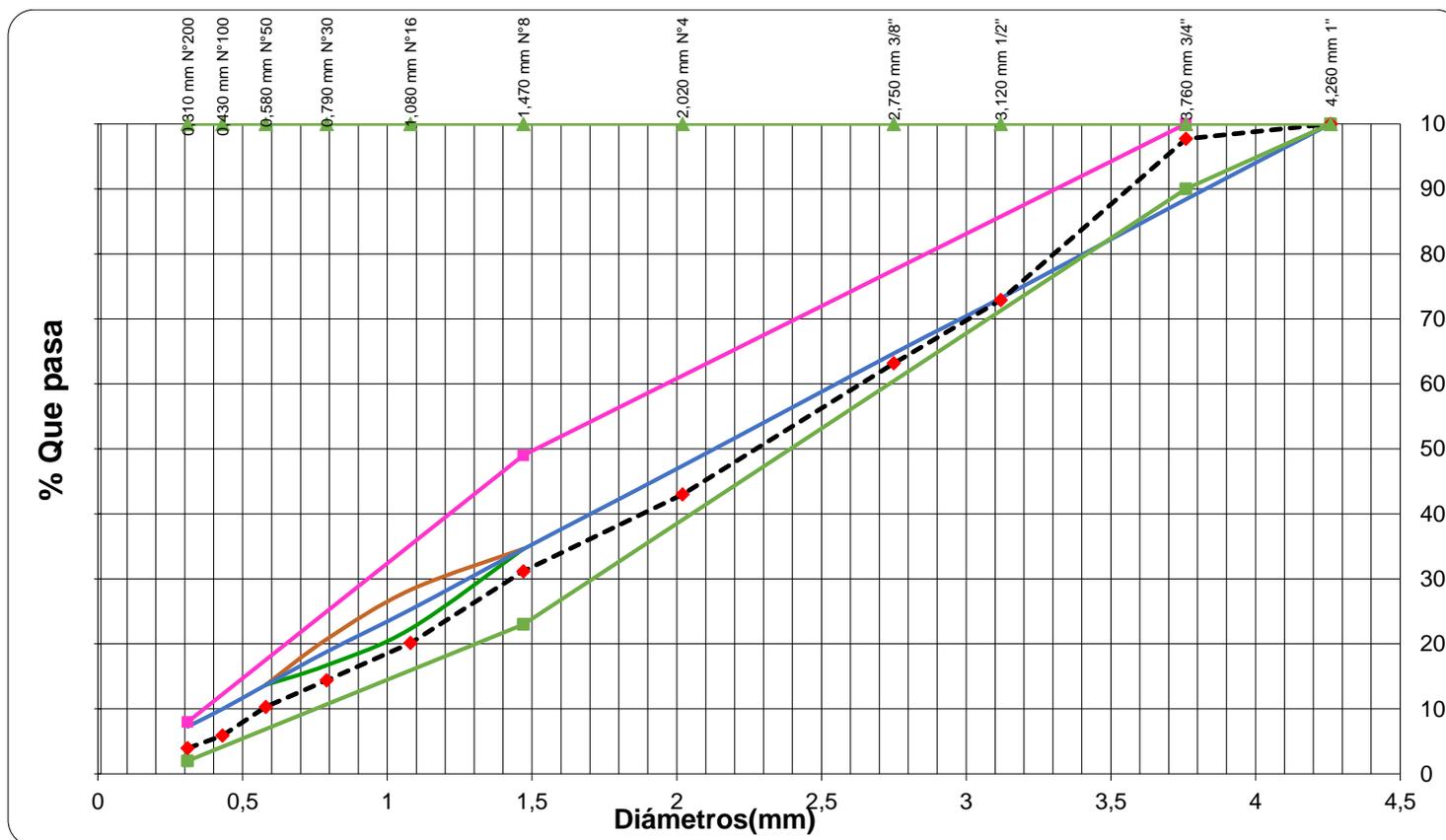
Tabla 76. Dosificación para obtener el porcentaje óptimo de Cemento asfáltico agregados zona cálida

% Usado	GRAVA 15%		GRAVILLA 27%		ARENA TRITURADA 48%		ARENA NATURAL 10%		Curva De Trabajo	Puntos De Control		Zona Restringida		Línea de máxima densidad
	Tamiz	% Total	% Enc	% Total	% Enc.	% Total	% Enc.	% Tota l		% Enc.	Máx.	Mín.	Mín.	
1"	100	15,0	100	27,0	100	48,0	100	10	100,0		100			7,3
3/4"	84,6	12,7	100	27,0	100	48,0	100	13,7	97,7	100	90			10
1/2"	15,0	2,3	46,9	12,7	100	48,0	100	18,8	72,9					13,7
3/8"	3,6	0,5	17,2	4,6	100	48,0	100	25,3	63,2					18,8
N° 4	1,0	0,1	3,6	1,0	66,4	31,9	100	34,6	43,0	49	23			25,3
N° 8	0,4	0,1	1,5	0,4	43,1	20,7	99,9	47,4	31,2			34,6	34,6	34,6
N° 16	0,4	0,1	1,4	0,4	20,3	9,7	99,6	64,7	20,1			22,3	28,3	47,4
N° 30	0,4	0,1	1,4	0,4	12,6	6,0	79,1	73,2	14,4			16,7	20,7	64,7
N° 50	0,4	0,1	1,3	0,3	10,3	4,9	49,7	88,4	10,3			13,7	13,7	73,2

N° 100	0,4	0,1	1,3	0,3	7,4	3,6	19,4	100	5,9					88,4
N° 200	0,4	0,1	1,3	0,3	6,7	3,2	3,3	0,3	4,0	8	2			100

Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Granulometría SUPERPAVE zona cálida de tamaño máximo nominal de 19 mm.



Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Dosificación de los materiales planilla de granulometría proyectada para la zona templada del departamento de Tarija

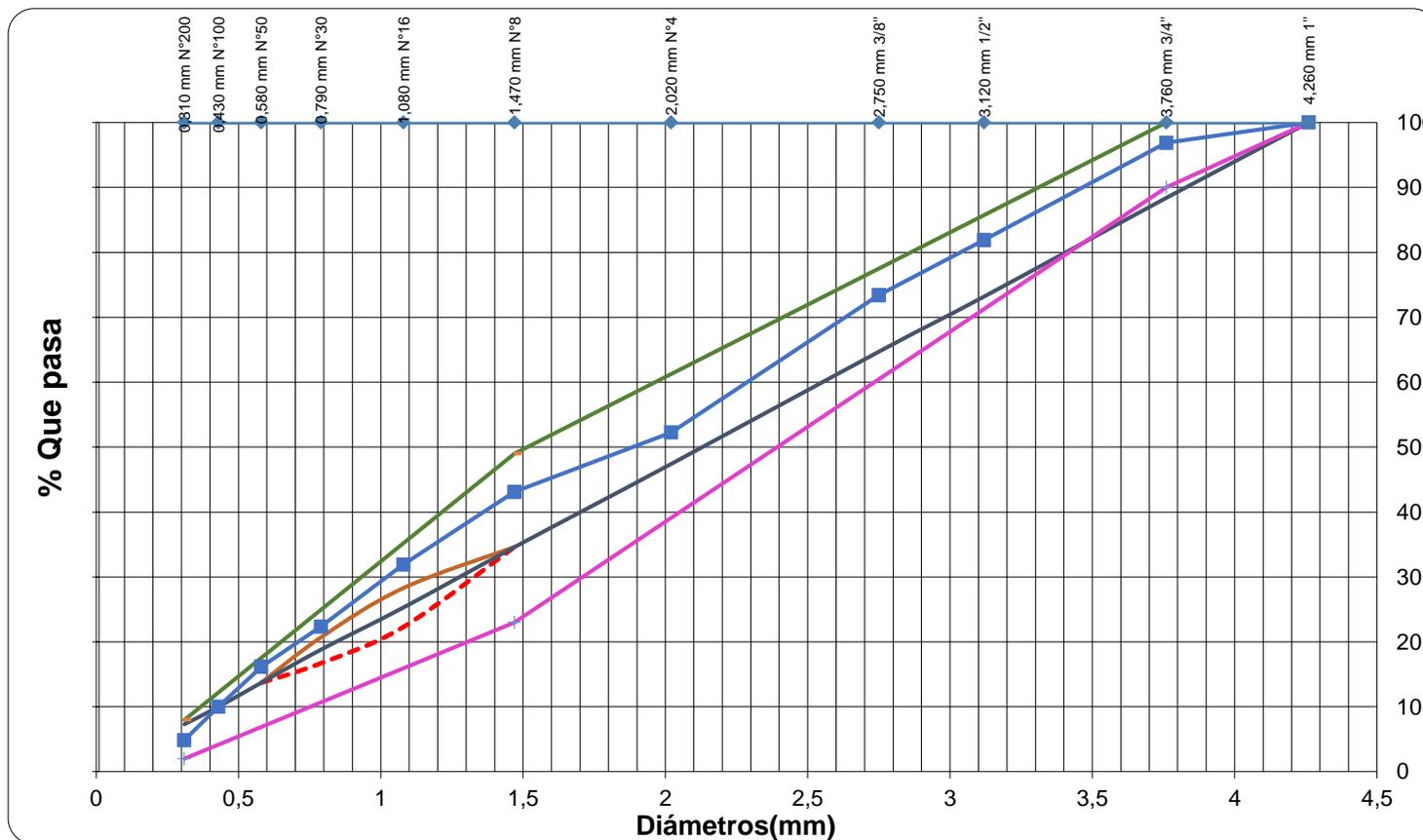
Tabla 77. Dosificación para obtener el porcentaje óptimo de Cemento asfáltico agregados zona templada

% Usado	GRAVA 18%		GAVILLA 32%		ARENA TRITURADA 50%		Curva De Trabajo	Puntos De Control		Zona Restringida		Línea de máxima densidad
	Tamices	% Total	% Enc	% Total	% Enc.	% Total		% Enc.	Máx.	Mín.	Mín.	
1"	100,0	18,0	100,0	32,0	100,0	50,0	100,0		100			7,3
3/4"	82,6	14,9	100,0	32,0	100,0	50,0	96,9	100	90			10
1/2"	6,4	1,1	96,2	30,8	100,0	50,0	81,9					13,7
3/8"	0,5	0,1	72,9	23,3	100,0	50,0	73,4					18,8
N° 4	0,1	0,0	10,9	3,5	97,5	48,7	52,2	49	23			25,3
N° 8	0,1	0,0	0,3	0,1	85,9	43,0	43,1			34,6	34,6	34,6
N° 16	0,1	0,0	0,3	0,1	63,6	31,8	31,9			22,3	28,3	47,4
N° 30	0,1	0,0	0,2	0,1	44,5	22,3	22,4			16,7	20,7	64,7

N° 50	0,1	0,0	0,2	0,1	32,1	16,1	16,2			13,7	13,7	73,2
N° 100	0,1	0,0	0,2	0,1	19,9	9,9	10,0					88,4
N° 200	0,1	0,0	0,2	0,1	9,6	4,8	4,9	8	2			100

Fuente: Elaboración propia

Figura 35. *Granulometría SUPERPAVE* zona templada de tamaño máximo nominal de 19 mm.



Fuente: Elaboración propia

4.2.5. Dosificación de los materiales planilla de granulometría proyectada para la zona fría del departamento de Tarija

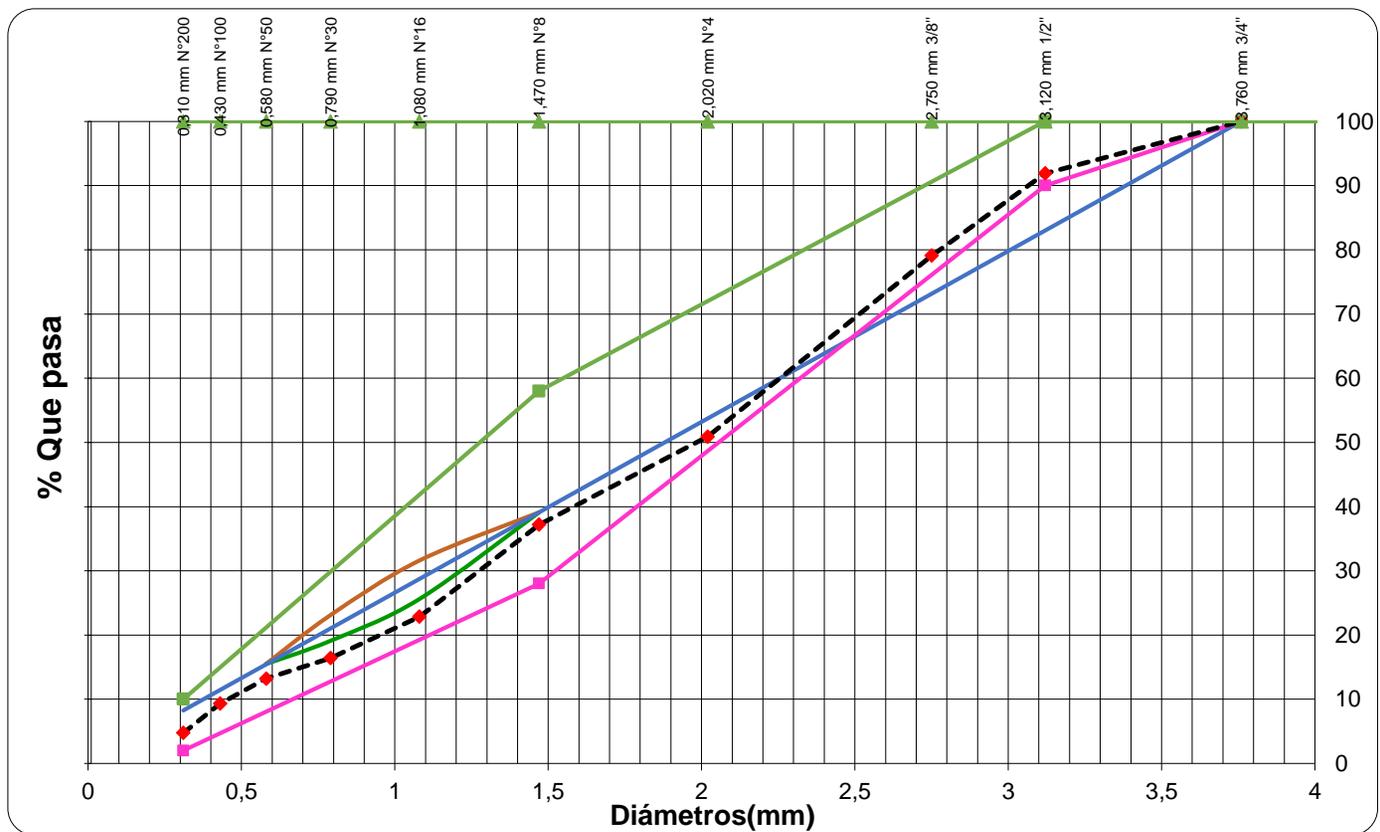
Tabla 78. Dosificación para obtener el porcentaje óptimo de Cemento asfáltico agregados zona fría

% Usado	GRAVA 30%		GRAVILLA 35%		ARENA TRITURAD A20%		ARENA NATURAL 15%		Curva De Trabajo	Puntos De Control		Zona Restringida		Línea de máxima densidad
	Tamiz	% Total	% Enc	% Total	% Enc.	% Total	% Enc.	% Total		% Enc.	Máx.	Mín.	Mín.	
3/4"	100,0	30,0	100,0	35,0	100,0	20,0	100,0	15,0	100,0		100			8,2
1/2"	72,9	21,9	100,0	35,0	100,0	20,0	100,0	15,0	91,9	100	100			11,4
3/8"	30,3	9,1	100,0	35,0	100,0	20,0	100,0	15,0	79,1					15,4
N° 4	3,1	0,9	44,3	15,5	97,5	19,5	100,0	15,0	50,9					21,0
N° 8	2,4	0,7	14,7	5,1	82,9	16,6	98,4	14,8	37,2	28	58	39,1	39,1	28,7
N° 16	2,1	0,6	9,7	3,4	40,0	8,0	72,3	10,8	22,8			25,6	31,6	39,1
N° 30	2,0	0,6	9,3	3,3	30,8	6,2	42,5	6,4	16,4			19,1	23,1	53,7
N° 50	1,7	0,5	8,4	2,9	25,0	5,0	31,7	4,8	13,2			15,5	15,5	73,1
N° 100	1,3	0,4	7,2	2,5	14,2	2,8	23,6	3,5	9,3					83,0

N° 200	1,2	0,4	2,5	0,9	7,0	1,4	14,2	2,1	4,8	2	10			100,0
--------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	---	----	--	--	-------

Fuente: Elaboración propia

Figura 36. *Granulometría SUPERPAVE zona fría de tamaño máximo nominal de 12,5 mm.*



Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico SUQUIA 60-70 o PG 70-22

4.2.3.1. Diseño de la mezcla asfáltica con el Método Marshall (ASTM D-1559)

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

4.2.3.1.1. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto

Ecuación 21. *Determinación de la cantidad aproximada de asfalto*

$$\%A = 0,035a + 0,045b + K.c + F$$

%A = % de asfalto en la mezcla.

a = % de agregado retenido en el tamiz N°8.

b = % de agregado pasante en el tamiz N°8.

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

K = 0,15 si el % de agregado que retiene el tamiz 3/4" está entre 11% y 15%, 0,18 si el % de agregado que retiene está entre 6% y 10%, 0,20 si el % de agregado que retiene es el 5% o menos.

F = Coeficiente que varía de 0 a 2% que varía según la absorción del material.

Datos:

$$a = (100\% - 31,2\%) = 68,8\%$$

$$b = (31,2\% - 4\%) = 27,2\%$$

$$c = 4\%$$

k= Se toma el valor de 0,2 debido a que el retenido en el tamiz 3/4” es menor que 5%

F (porcentaje de absorción de la mezcla de los agregados)

F = 1,0428%

Cálculo:

$$\%A = 0,035a + 0,045b + K * c + F$$

$$\%A = 0,035(68,8) + 0,045(27,2) + 0,2(4) + 1,0428$$

$$\%A = 5,47\%$$

Los porcentajes de cemento asfáltico para los que se trabajaran en las diferentes briquetas son los siguientes: 4,8%, 5,3%, 5,8%, 6,3%, 6,8% y 7,3%.

Preparación de las probetas

- Para la dosificación de las probetas se utilizó la granulometría SUPERPAVE ya calculada anteriormente.
- Para determinar el contenido óptimo del cemento asfáltico se prepararán 5 grupos, para cada grupo se realizó 3 briquetas para la mezcla de agregados, variando el contenido del cemento asfáltico, de forma que en las curvas que representen los resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido. Este contenido variara con incrementos de 0.5% de un grupo a otro grupo.

4.2.3.1.2. Ensayo de viscosidad vs temperatura para la elaboración de mezclas asfálticas convencionales

El ensayo de viscosidad vs temperatura se lo realiza al cemento asfáltico, haciendo variar las temperaturas para poder conocer la temperatura de aplicación y la temperatura de compactación.

4.2.3.1.2.1. Ensayo de viscosidad vs temperatura del cemento asfáltico 70-100 o PG 70-22

El ensayo de viscosidad vs temperatura se lo realizó al cemento asfáltico PG 70-22, haciendo variar las temperaturas para poder conocer la temperatura de aplicación y la temperatura de compactación.

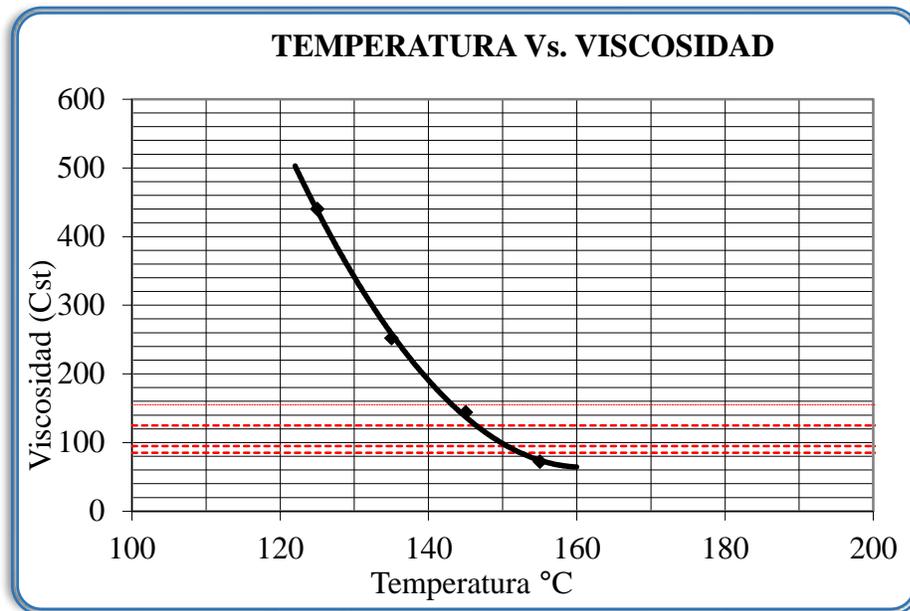
Tabla 79. *Variación de temperatura vs viscosidad*

Punto	Temperatura °C	Viscosidad Cst
1	125	440
2	135	252
3	145	144
4	155	72

Fuente: Elaboración propia

- a) **Aplicación:** Especificación: Viscosidad 85 – 95 Saybolt Furol
Temperatura: 152 °C y 153 °C
- b) **Aplicación:** Especificación: Viscosidad 125 – 155 Saybolt Furol
Temperatura: 144 °C y 148 °C

Figura 37. *Análisis de la Temperatura vs viscosidad del C.A. PG 70-22*



Fuente: Elaboración propia

4.2.3.1.2.2. Ensayo de viscosidad vs temperatura del cemento asfáltico 60-70 o PG 64-22

El ensayo de viscosidad vs temperatura se lo realizó al cemento asfáltico PG 64-22, haciendo variar las temperaturas para poder conocer la temperatura de aplicación y la temperatura de compactación.

Tabla 80. Variación de temperatura vs viscosidad

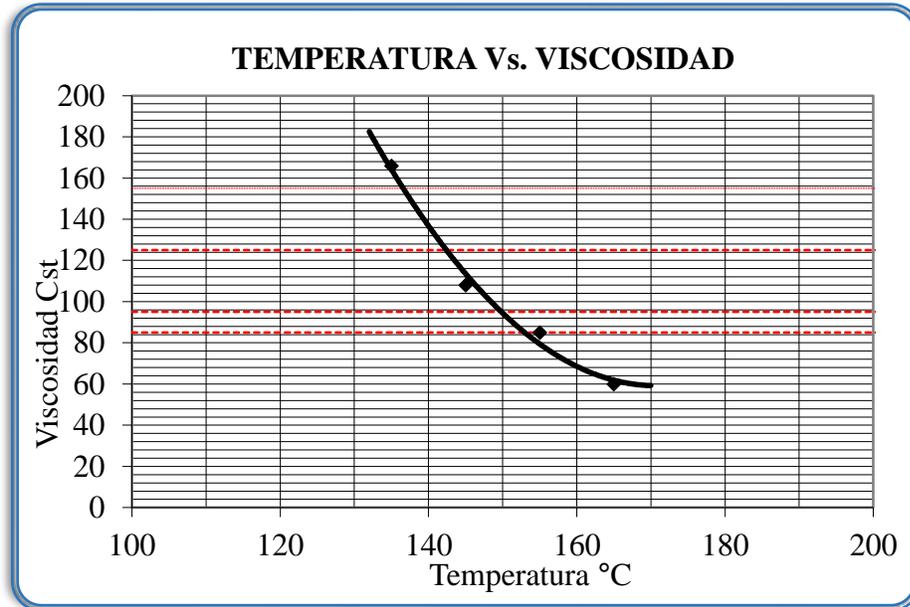
Punto	Temperatura °C	Viscosidad Cst
1	135	166
2	145	108
3	155	85
4	165	60

Fuente: Elaboración propia

- a) **Aplicación:** Especificación: Viscosidad 85 – 95 Saybolt Furol
Temperatura: 150 °C y 154 °C

- b) **Aplicación:** Especificación: Viscosidad 125 – 155 Saybolt Furol
Temperatura: 136 °C y 141 °C

Figura 38. Análisis de la Temperatura vs viscosidad del C.A. PG 64-22



Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1.2.3. Ensayo de viscosidad vs temperatura del cemento asfáltico 85-100 o PG 58-28

El ensayo de viscosidad vs temperatura se lo realizó al cemento asfáltico PG 58-28, haciendo variar las temperaturas para poder conocer la temperatura de aplicación y la temperatura de compactación.

Tabla 81. Variación de temperatura vs viscosidad

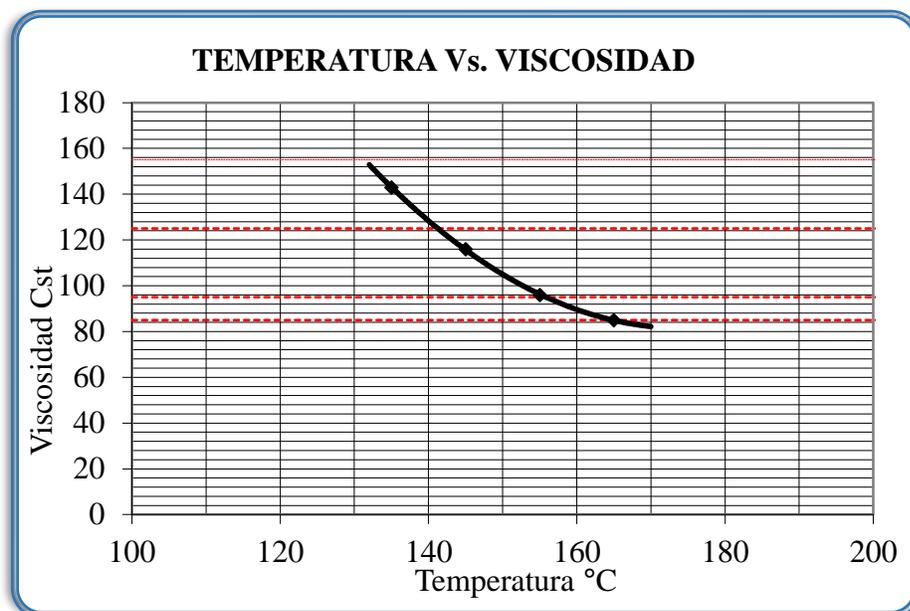
Punto	Temperatura °C	Viscosidad Cst
1	135	143
2	145	116
3	155	96

4	165	85
---	-----	----

Fuente: Elaboración propia

- a) **Aplicación:** Especificación: Viscosidad 85 – 95 Saybolt Furol
Temperatura: 157 °C y 164 °C
- b) **Aplicación:** Especificación: Viscosidad 125 – 155 Saybolt Furol
Temperatura: 134 °C y 140 °C

Figura 39. Análisis de la Temperatura vs viscosidad del C.A. PG 58-28



Fuente: Elaboración propia

En el ensayo de viscosidad - temperatura del cemento asfáltico se puede observar la temperatura óptima de aplicación para el mezclado de los agregados y el cemento asfáltico y también se observa la temperatura óptima de compactado con el martillo a 75 golpes para tráfico pesado en nuestro caso.

4.2.4. Equipo y materiales para la elaboración de las briquetas

- **Equipo y Materiales:**
- Martillo de compactación.

- Moldes metálicos para las briquetas.
- Extractor de briquetas.
- Balanza $A \pm 0.1$ gr.
- Bandejas metálicas.
- Placa metálica para el calentamiento.
- Termómetro
- Espátula.
- Platos metálicos.
- Cuchara.
- Medidor de la estabilidad.
- Medidor de la fluencia.
- Mordazas para el aparato Marshall.
- Aparato Marshall.
- Agregados gruesos y finos.
- Cementos asfálticos.

4.2.5. Procedimiento de la elaboración de las mezclas asfálticas

Se limpian los moldes, collarines y el martillo de compactación para luego calentarlos a una temperatura entre 100 y 150°C. Luego se pesan en platos separados las diversas fracciones de áridos calculado para cada grupo de briquetas de acuerdo a su porcentaje de cemento asfáltico, luego cada plato con el peso de los agregados es colocado en el horno a una temperatura de 100°C, cuando ya se quiere hacer la mezcla se saca del horno y se añade el porcentaje de cemento asfáltico correspondiente, después se vacía en una bandeja que es calentada en una placa metálica puesta sobre la cocina para realizar el mezclado en este caso a una temperatura no mayor a 153 °C, se debe mezclar el cemento asfáltico con los agregados de manera homogénea evitando sobrecalentamientos locales.

Se compacta la mezcla en un molde metálico más su collarín estos abiertos por ambos extremos y que tienen 4" de diámetro interior y 3" de altura. La compactación se hace

usando un martillo especial compuesto de: un disco circular de 3 7/8" de diámetro que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco, el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18". Para realizar el diseño se aplicaron 75 golpes por cara de cada briqueta en la compactación se utilizó una temperatura de compactación entre 144°C a 148°C, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 15 briquetas, para cada zona para así obtener el porcentaje óptimo del cemento asfáltico. El molde que contiene la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente de tal manera que no sea menor a 3 horas, para luego ser extraída la briqueta mediante un gato hidráulico.

Figura 40. *Martillado de las briquetas*



Fuente: Propia

Figura 41. *Desmolde de las briquetas*



Fuente: Propia

➤ **Medición y pesaje de las briquetas**

• **Medición**

Antes de realizar las mediciones se realizó la limpieza de cada una de las briquetas con ayuda de una espátula, eliminando aquellas impurezas en las briquetas.

Después se realizó cuatro mediciones de alturas mediante un vernier, para obtener un promedio de la altura de cada briqueta.

• **Pesaje**

Se realizó el pesaje de cada una de las briquetas en diversas condiciones que son las siguientes.

Peso seco en el aire: Se realizó el pesaje en una balanza a cada briqueta de tal manera que estén secas.

Después de realizar el peso en el aire se colocó las briquetas en agua a una temperatura de 25°C, en un tiempo entre 10 a 15 minutos para luego realizar los siguientes pesajes:

Peso sumergido: Se realizó el pesaje en una balanza a cada briqueta de tal manera que estas estén sumergidas en agua a una temperatura de 25°C.

Peso saturado superficialmente seco: Se realizó el pesaje en una balanza a cada briqueta de tal manera que estas son sacadas del agua cuya temperatura es de 25°C, y son secadas superficialmente con la ayuda de una toalla para luego ser pesadas.

4.2.6. Ensayo de estabilidad y fluencia

Una vez extraído las briquetas de los moldes, realizadas las mediciones de sus alturas y sus respectivos pesajes a cada una de las briquetas elaboradas se procedió a realizar el ensayo de flujo y estabilidad en la prensa Marshall.

Antes de realizar este ensayo en la prensa Marshall se dejó en baño María durante un periodo no menor de 30 minutos y no mayor de 40 minutos a una temperatura de 58°C \pm 0,5°C para la zona fría, 64°C \pm 0,5°C para la zona templada y 70°C \pm 0,5°C para la zona cálida.

Se limpió las superficies interiores de las mordazas metálicas de tal manera que la mordaza superior deslice fácilmente sin pegarse. La temperatura de las mismas se debe mantener entre 21 °C y 38 °C. Se verificó antes de la aplicación de la carga que el indicador dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Se colocó la briqueta cubierta con periódico dentro de las mordazas y se aplicó la carga, a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto (2" por minuto) hasta que se produce la rotura, en el cual se detiene la aplicación de la carga automáticamente. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a temperaturas máximas que estará durante su funcionamiento, se registró el valor de ESTABILIDAD MARSHALL. Mientras se realizó el ensayo de Estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (Flujo) en posición sobre la varilla de guía y se lo detiene cuando se obtiene la carga máxima mediante la cual se lee y anota esta lectura como valor de flujo de la briqueta, expresado en centésimas de pulgada.

Figura 42. *Rompimiento de briquetas en la prensa Marshall*



Fuente: Propia

4.2.7. Elaboración de la planilla

Se realizará un cálculo demostrativo para la primera briqueta con porcentaje de cemento asfáltico de 4,8%. Se realiza para las mezclas asfálticas de la zona cálida. La planillas para las tres zonas estudiadas se encuentra en los Anexos N, O y P.

4.2.7.1. Identificación de la briqueta analizada

Las Briquetas 1, 2, 3 con 4,8% de cemento asfáltico serán las que analizarán en el presente trabajo.

4.2.7.2. Altura de las briquetas

Se realizan cuatro mediciones mediante un vernier de la cual se obtuvieron los siguientes promedios de alturas:

Tabla 82. *Alturas de las briquetas con 4,8% de cemento asfáltico*

BRIQUETA N°	ALTURA DE LA BRIQUETA (cm)
1	6,36
2	6,34
3	6,43

Fuente: Elaboración propia.

4.2.7.3. Porcentaje de cemento asfáltico

4.2.7.3.1. Base de la mezcla

Se toma el porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas en este cálculo el porcentaje de asfalto es de 4,8%.

4.2.7.3.2. Base de agregado

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

$$\text{Base de agregado} = \frac{4,8 * 100}{100 - 4,8}$$

$$\text{Base de agregado} = 5,04$$

4.2.7.4. Peso de la briketa en el aire

El peso de la briketa en el aire se lo obtiene pesando en una balanza los datos son los siguientes:

Tabla 83. *Peso de las briquetas en el aire con 4,8% de cemento asfáltico*

BRIQUETA N°	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (Grs.)
1	1190,3
2	1189,9
3	1189,5

Fuente: Elaboración propia.

4.2.7.5. Peso de la briketa en el aire saturado superficialmente seco (SSS)

El peso de la briketa saturado superficialmente seco, se lo obtienen saturando la briketa en el agua durante 10 - 30 minutos a una temperatura de 25°C y secándola superficialmente.

Tabla 84. *Peso de las briquetas en el aire saturado superficialmente con 4,8% de cemento asfáltico*

BRIQUETA N°	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO (Grs.)
1	1193,9
2	1193,8
3	1193,2

Fuente: Elaboración propia.

4.2.7.6. Peso de la briketa sumergida en el agua

El peso sumergido, se lo calcula cuando se sumerge la briketa en el agua a 25 °C durante 10 - 30 minutos y se registra sus pesos cuando esta se encuentra sumergida dentro del agua cuyos datos son los siguientes:

Tabla 85. *Peso de las briquetas sumergidas en agua con 4,8% de cemento asfáltico*

BRIQUETA N°	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO (Grs.)
1	675,4
2	674,2
3	673,8

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo realizado para la briketa número “1”

4.2.7.7. Volumen de la briketa

Vol. de briketa = Peso briketa en el aire SSS – Peso de briketa sumergida

$$\text{Volumen de briketa} = 1193,9 - 675,4$$

$$\text{Volumen de briqueta} = 518,5 \text{ cm}^3$$

4.2.7.8. Densidad de la briqueta

4.2.7.8.1. Densidad real de la briqueta

$$\text{Densidad Real} = \frac{\text{Peso de la briqueta en el aire}}{\text{Volumen de la briqueta}}$$

$$\text{Densidad Real} = \frac{1190,3 \text{ gr}}{518,5 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Densidad real} = 2,296 \text{ gr/ cm}^3$$

4.2.7.8.2. Densidad máxima teórica de la briqueta

$$\text{Dens. máx. teórica} = \frac{100}{\frac{\% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico asfalto}} + \frac{100 - \% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico agregado grueso}}}$$

$$\text{Densidad máxima teórica} = \frac{100}{\frac{4,8}{1,006} + \frac{100 - 4,8}{2,660}}$$

$$\text{Densidad máxima teórica} = 2,478 \text{ gr/ cm}^3$$

4.2.7.8.3. Porcentaje de vacíos

4.2.7.8.3.1. Porcentaje de vacíos de la mezcla (V_v)

$$V_v = \frac{\text{Densidad MáxT} - \text{Densidad Real Promedio}}{\text{Densidad MáxT}} * 100$$

$$V_v = \frac{2,478 - 2,292}{2,478} * 100$$

$$V_v = 7,50\%$$

4.2.7.8.3.2. Porcentaje de vacíos de los agregados (VAM)

$$\text{VAM} = \frac{\% \text{ de asfalto} * \text{Densidad Real Promedio}}{\text{Peso específico de asfalto}} + \% \text{ de vacios (Vv)}$$

$$\text{VAM} = \frac{4,8 * 2,292}{1,006} + 7,50$$

$$\text{VAM} = 18,44\%$$

4.2.7.8.3.3. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV)

$$\text{RBV} = \frac{\text{VAM} - \text{Vv}}{\text{VAM}} * 100$$

$$\text{RBV} = \frac{18,44 - 7,50}{18,44} * 100$$

$$\text{RBV} = 59,32\%$$

4.2.7.9. Estabilidad

La estabilidad se determina después de realizar el ensayo en la prensa Marshall, se obtuvieron las siguientes resultados para las briquetas de 4,8% de cemento asfáltico:

Tabla 86. Lectura del dial de estabilidad de las briquetas con 4,8% de cemento asfáltico

BRIQUETA N°	LECTURA DEL DIAL: Estabilidad (Libras)
1	1394,5
2	1404
3	1395

Fuente: Elaboración propia.

➤ **Estabilidad real.** Para la biqueta 1:

Estabilidad real = Factor de corrección de la prensa *Lectura del dial

$$\text{Estabilidad real} = 2,2046 * 1394,5$$

$$\text{Estabilidad real} = 3074,3 \text{ Libras}$$

Tabla 87. Estabilidad real de las briquetas con 4,8% de cemento asfáltico

BRIQUETA N°	ESTABILIDAD REAL (Libras)
1	3074,3
2	3095,3
3	3075,4

Fuente: Elaboración propia.

➤ **Promedio de la estabilidad real:**

$$\text{Estabilidad real promedio} = \frac{\text{Lr. 1} + \text{Lr. 2} + \text{Lr. 3}}{n}$$

$$\text{Estabilidad real promedio} = \frac{3074,3 + 3095,3 + 3075,4}{3}$$

$$\text{Estabilidad real promedio} = 3081,7 \text{ Libras}$$

➤ **Factor de corrección por altura:**

De acuerdo a cada altura se tiene su factor de corrección los cuales se observa en siguiente tabla:

Tabla 88. Factor de corrección por altura para las briquetas con 4,8% de cemento asfáltico

BRIQUETA N°	FACTOR DE CORRECCIÓN POR ALTURA
1	0,998

2	1,003
3	0,980

Fuente: Elaboración propia

➤ **Promedio de los factores de corrección:**

$$\text{Factor de corrección por altura promedio} = \frac{\text{F. C. .1} + \text{F. C. 2} + \text{F. C. 3}}{n}$$

$$\text{Factor de corrección por altura promedio} = \frac{0,998 + 1,003 + 0,980}{3}$$

$$\text{Factor de corrección por altura promedio} = 0,994$$

➤ **Estabilidad corregida:**

Para la estabilidad real para un 4,8% de cemento asfáltico es:

$$\text{Estabilidad real promedio} = \text{Estabilidad real} \times \text{Factor de corrección por altura}$$

$$\text{Estabilidad real promedio} = 3081,7 * 0,994$$

$$\text{Estabilidad real promedio} = 3063,2 \text{ Libras}$$

4.2.7.10. Fluencia

La fluencia se determina durante el ensayo en la prensa Marshall, se obtuvieron las siguientes resultados para las briquetas de 4,8% de cemento asfáltico, las lecturas del dial nos da en pulgadas para ello se lo transforma en milímetros como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 89. Lectura del dial de estabilidad de las briquetas con 4,8% de cemento asfáltico

BRIQUETA N°	LECTURA DEL DIAL (Pulgadas)	LECTURA DEL DIAL (Milímetros)
1	350	13,8
2	335	13,2
3	345	13,6

Fuente: Elaboración propia

➤ **Fluencia promedio:**

Para la fluencia para un 4,8% de cemento asfáltico es:

$$\text{Fluencia promedio} = \text{Factor de corrección por altura promedio} = \left(\frac{F_{.1} + F_{.2} + f_{.3}}{n} \right)$$

$$\text{Fluencia promedio} = \left(\frac{13,8 + 13,2 + 13,6}{3} \right)$$

$$\text{Fluencia promedio} = 13,52 \text{ mm}$$

De igual manera se realiza los mismos cálculos para los demás porcentajes de cemento asfáltico.

4.2.8. Resumen de los datos obtenidos de los diseños realizados según la zonificación SUPERPAVE

Tabla 90. Resumen de los datos obtenidos para la zona cálida del departamento

Briqueta N°	Altura briqueta (cm)	% De Cemento Asfáltico Base:	Peso Briqueta en el Aire	Peso Briqueta en el Aire S.S.S.	Peso Briqueta Sumergida en		
-------------	----------------------	----------------------------------------	--------------------------	------------------------------------	-------------------------------	--	--

		Agregado	Mezcla	(gr)	(gr)	(gr)	(Lb.)	(Lb.)
1	6,36	5,04	4,80	1190,3	1193,9	675,4	1395	350
2	6,34	5,04	4,80	1189,9	1193,8	674,2	1404	335
3	6,43	5,04	4,80	1189,5	1193,2	673,8	1395	345
4	6,28	5,60	5,30	1188,6	1192,3	681,6	1408	380
5	6,26	5,60	5,30	1189,2	1193,5	681,1	1420	355
6	6,29	5,60	5,30	1190,6	1194,8	683,9	1431	370
7	6,19	6,16	5,80	1185,7	1188,8	682,5	1446	340
8	6,25	6,16	5,80	1185,0	1187,1	678,0	1557	315
9	6,30	6,16	5,80	1190,0	1193,7	681,1	1475	330
10	6,20	6,72	6,30	1174,5	1179,5	675,8	1571	285
11	6,23	6,72	6,30	1175,5	1180,1	677,8	1484	300
12	6,21	6,72	6,30	1172,4	1179,0	677,9	1507	305
13	6,24	7,30	6,80	1177,8	1180,9	672,5	1495	275
14	6,26	7,30	6,80	1175,6	1178,3	673,3	1483	300
15	6,22	7,30	6,80	1178,0	1182,1	674,2	1484	275

Fuente: Elaboración propia.

4.2.9. Resumen de los datos obtenidos de los diseños realizados para la zonificación SUPERPAVE

Tabla 91. Resultados obtenidos para la zona cálida del departamento

% de Asfalto	Densidad Real Promedio	% Vacíos en la mezcla	% Vacíos de agregado	% Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad Corregida Promedio	Fluencia 1/100 Promedio
4,8	2,292	7,50	18,44	59,32	3063,2	13,52

5,3	2,326	5,40	17,65	69,44	3191,6	14,50
5,8	2,330	4,50	17,94	74,89	3382,5	12,93
6,3	2,337	3,50	18,14	80,71	3472,4	11,68
6,8	2,321	3,43	19,13	82,05	3373,3	11,15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 92. Resumen de los resultados obtenidos para la zona templada del departamento

% de Asfalto	Densidad Real Promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv))% Vacíos de agregado (VAM)	% Vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad Corregida Promedio (lb)	Fluencia 1/100 Promedio (mm)
4,8	2,285	7,92	18,81	57,91	2167,3	9,19
5,3	2,333	5,27	17,55	69,97	2622,2	9,45
5,8	2,339	4,29	17,76	75,84	2856,8	9,97
6,3	2,332	3,84	18,44	79,15	2520,8	15,29
6,8	2,326	3,37	19,08	82,34	2377,8	17,39

Fuente: Elaboración propia

Tabla 93. Resumen de los resultados obtenidos para la zona fría del departamento

% de Asfalto	Densidad Real Promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv))% Vacíos de agregado (VAM)	% Vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad Corregida Promedio (lb)	Fluencia 1/100 Promedio (mm)
4,8	2,270	7,69	18,55	58,53	2071,9	8,53
5,3	2,307	5,47	17,65	69,04	2159,1	10,89

5,8	2,338	3,47	16,99	79,56	2327,5	9,71
6,3	2,326	3,27	17,87	81,71	2498,4	9,84
6,8	2,315	2,98	18,68	84,02	2260,0	12,99

Fuente: Elaboración propia

4.2.10. Gráficos de curvas de diseño de la mezcla asfáltica método Marshall

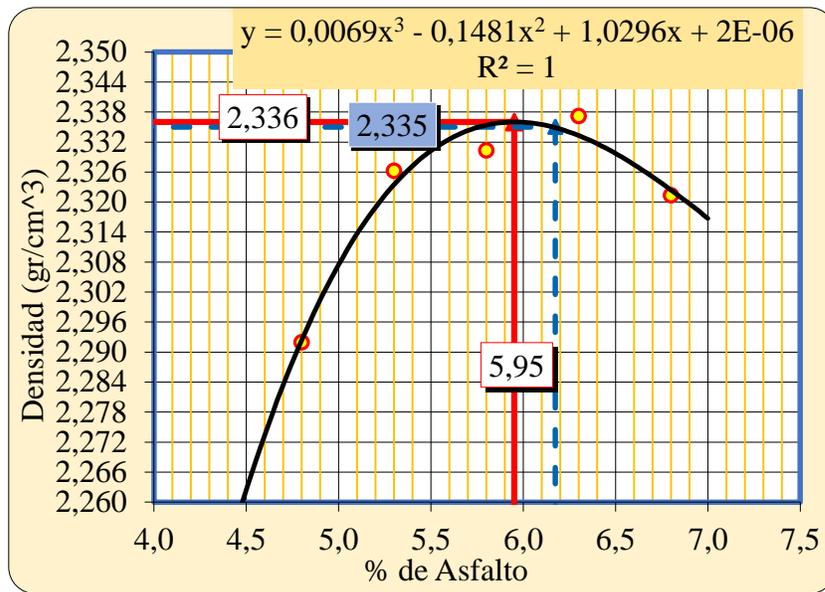
Con los valores obtenidos en las tablas 91, 92, 93, se procedió a dibujar los Gráficos de curvas de diseño de la mezcla asfáltica método Marshall correspondientes a las a sus respectivas zonas del departamento de Tarija para obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico para estos diseños Marshall:

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

- Porcentaje de Asfalto vs. densidad de la probeta.
- Porcentaje de Asfalto vs. porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total.
- Porcentaje de Asfalto vs. vacíos de agregado mineral (VAM)
- Porcentaje de Asfalto vs. porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (RBV).
- Porcentaje de Asfalto vs. estabilidad corregida.
- Porcentaje de Asfalto vs. Fluencia (flujo).

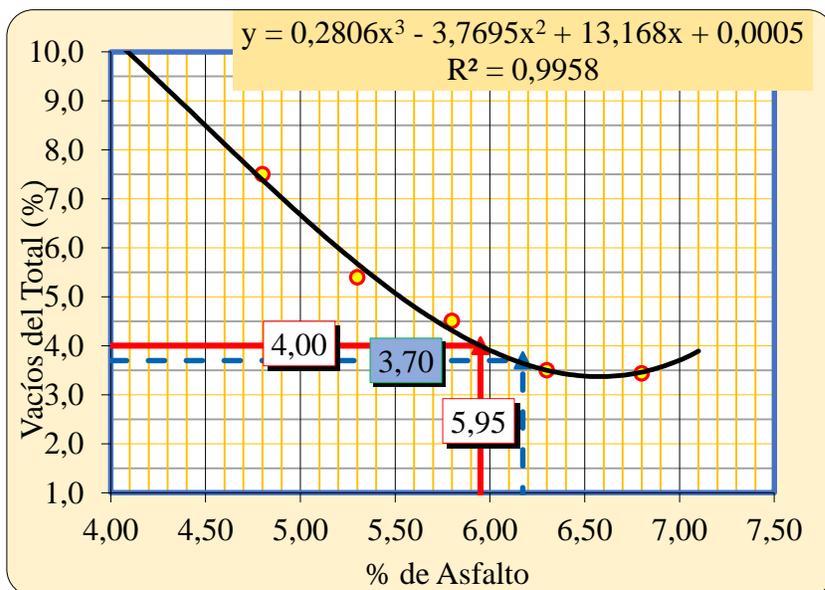
4.2.10.1. Gráficos de curvas de diseño de la mezcla asfáltica método Marshall para la zona cálida del departamento

Figura 43. *Porcentaje de Asfalto vs. Densidad de la probeta*



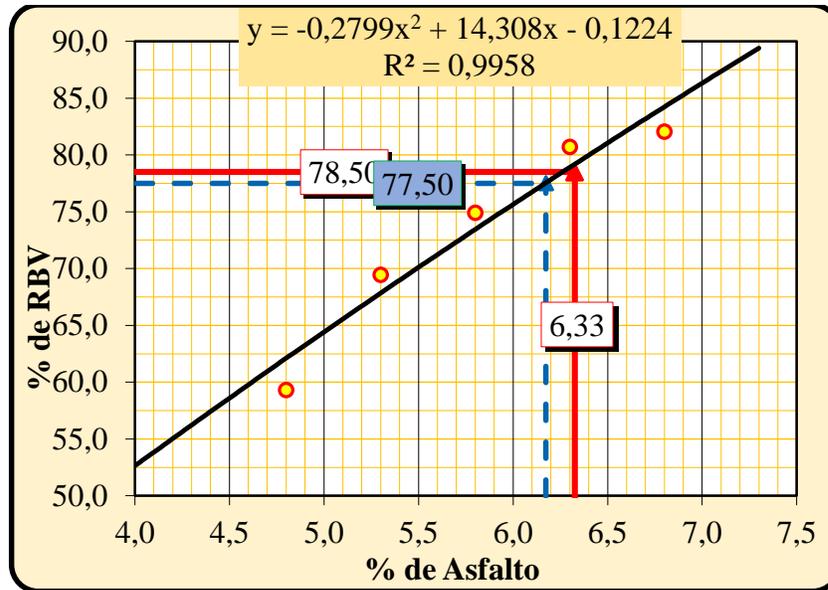
Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Porcentaje de Asfalto vs. Porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total (Vv)



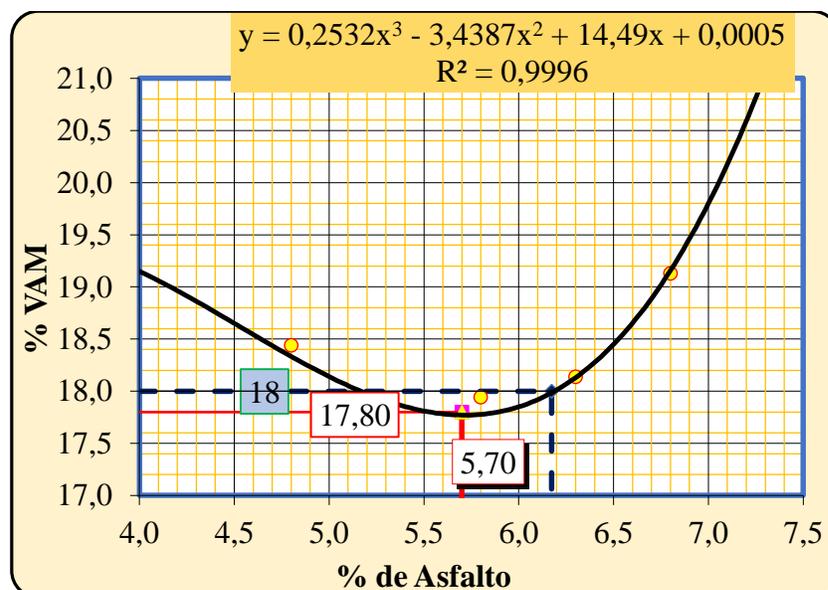
Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. Porcentaje de Asfalto vs. Porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (RBV)



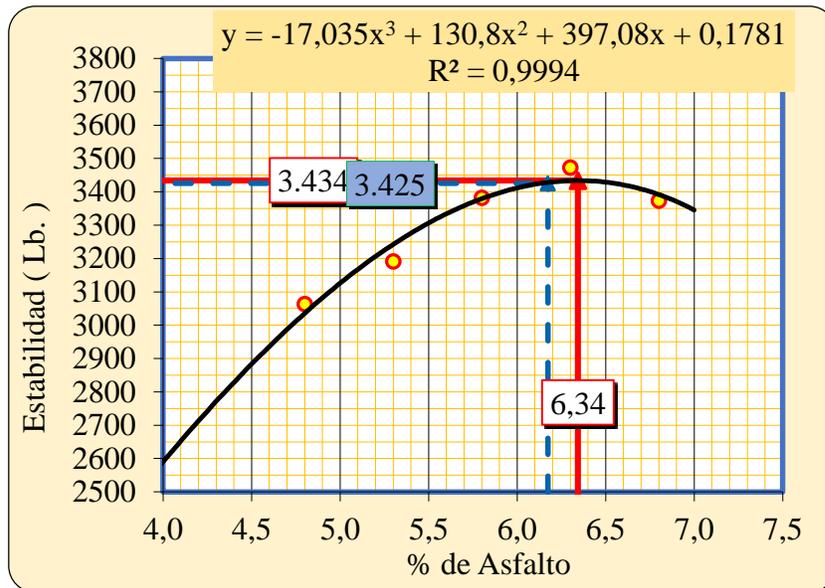
Fuente: Elaboración propia.

Figura 46. Porcentaje de Asfalto vs. Vacíos de agregado mineral (VAM)



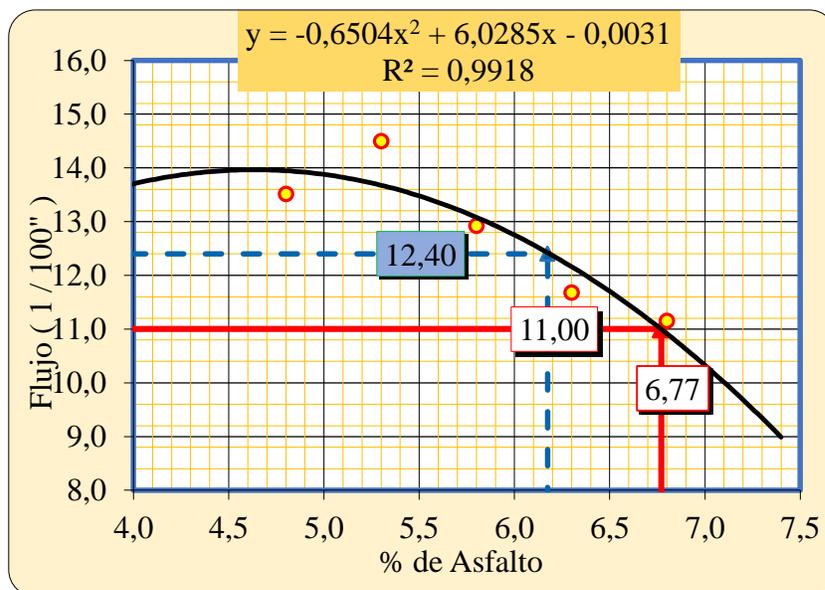
Fuente: Elaboración propia.

Figura 47. Porcentaje de Asfalto vs. Estabilidad corregida



Fuente: Elaboración propia

Figura 48. Porcentaje de Asfalto vs. Fluencia (flujo)



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 94. Obtención del porcentaje óptimo del cemento asfáltico resultado de las gráficas del ensayo Marshall

VALORES				
PROPIEDADES	% DE ASFALTO	OBTENIDOS DE GRÁFICOS	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
DENSIDAD	5,95	2,336	-----	-----
% VACÍOS	5,95	4,0	3	5
R.B.V.	6,33	78,5	75	82
V.A.M	5,70	17,8	15	
ESTABILIDAD (Lb)	6,34	3434,1	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	6,77	11,0	8	14
PROMEDIO (%)	6,17	Determinación del contenido óptimo de Asfalto Promedio de las Graficas		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 95. Resultado del porcentaje óptimo de cemento asfáltico propuesto

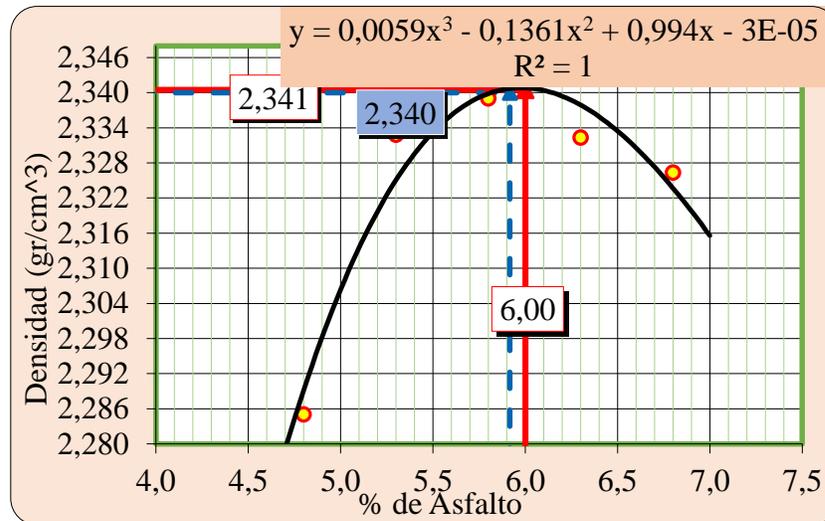
VALORES OBTENIDOS DISEÑO MARHALL				
PROPIEDADES	% DE ASFALTO	OBTENIDOS DE GRÁFICOS	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
DENSIDAD	6,17	2,335	-----	-----
% VACÍOS	6,17	3,70	3	5
R.B.V.	6,17	77,50	75	82
V.A.M	6,17	18,00	15	
ESTABILIDAD (Lb)	6,17	3425	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	6,17	12,40	8	14
PROMEDIO (%)			6,17	

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico es de 6,17% para la región cálida del departamento de Tarija.

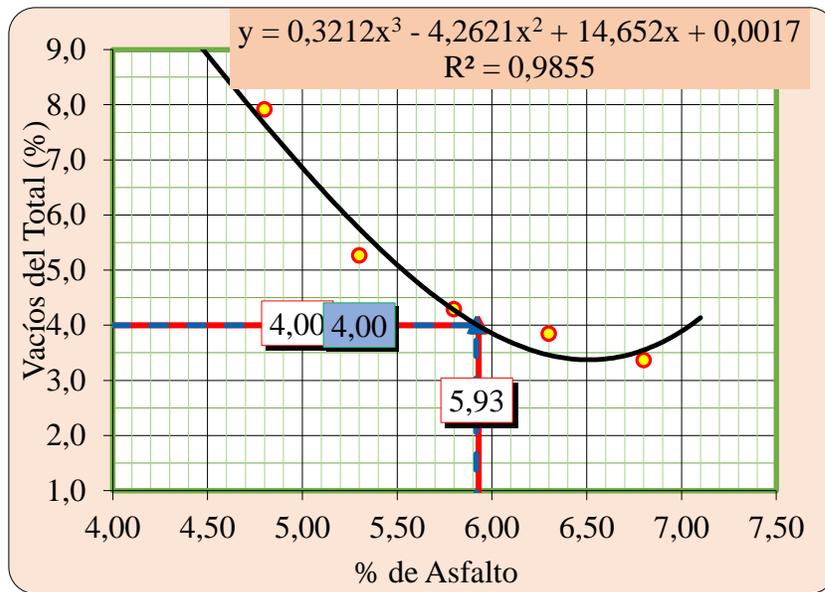
4.2.10.2. Gráficos de curvas de diseño de la mezcla asfáltica método Marshall para la zona templada del departamento

Figura 49. *Porcentaje de Asfalto vs. Densidad de la probeta*



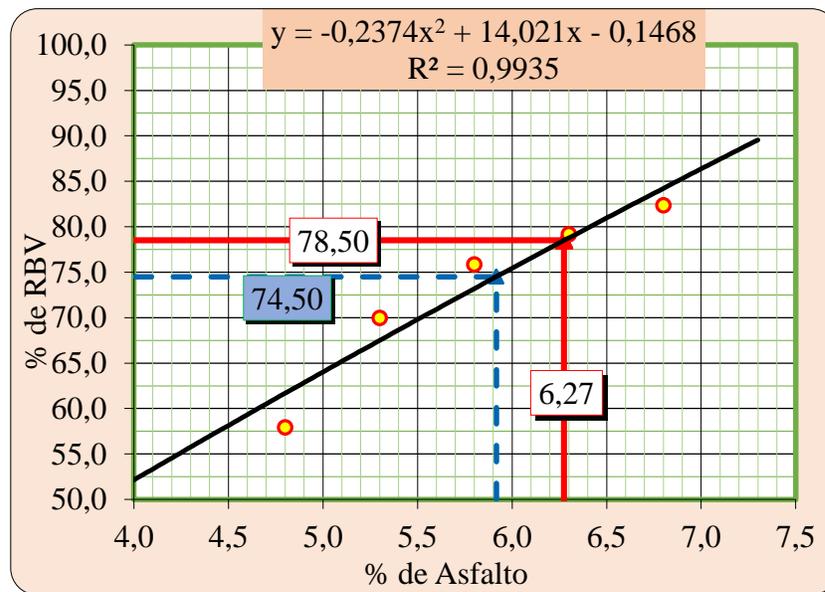
Fuente: Elaboración propia

Figura 50. *Porcentaje de Asfalto vs. Porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total (Vv)*



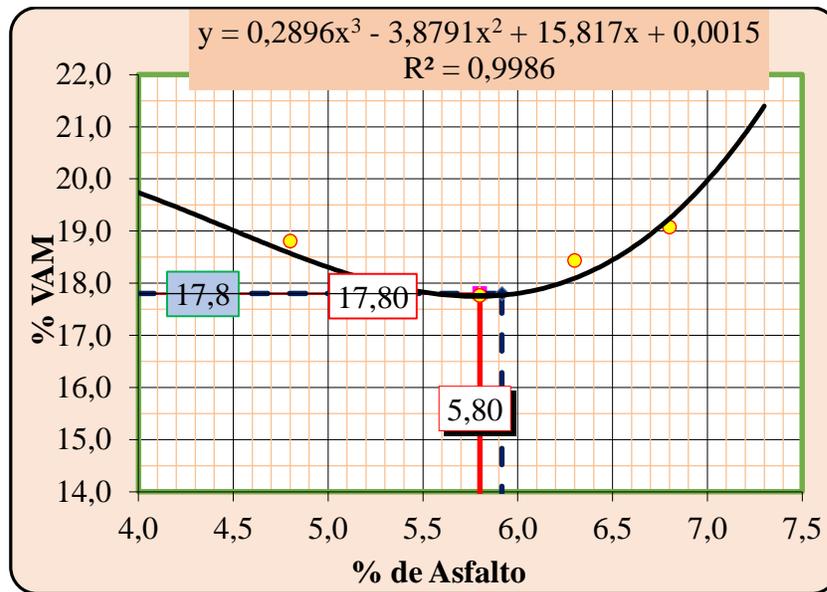
Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Porcentaje de Asfalto vs. Porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (RBV)



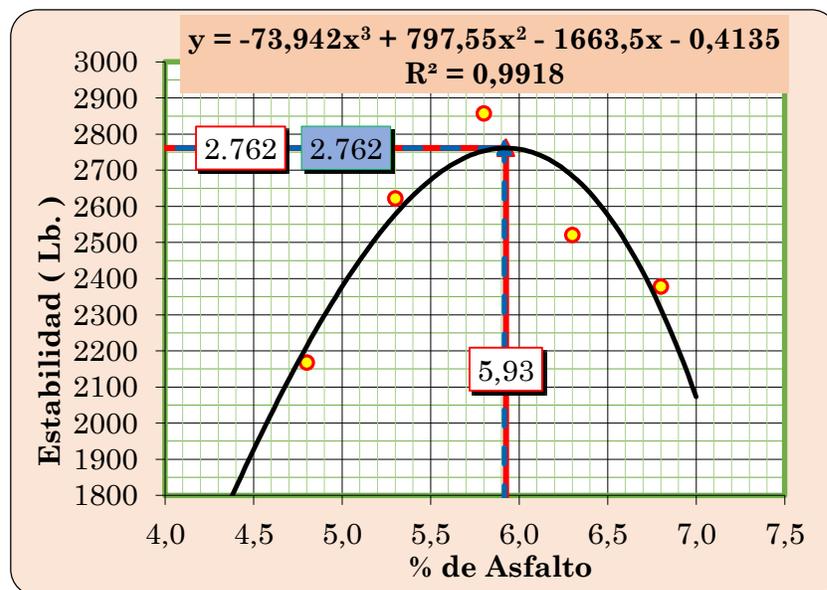
Fuente: Elaboración propia

Figura 52. Porcentaje de Asfalto vs. Vacíos de agregado mineral (VAM)



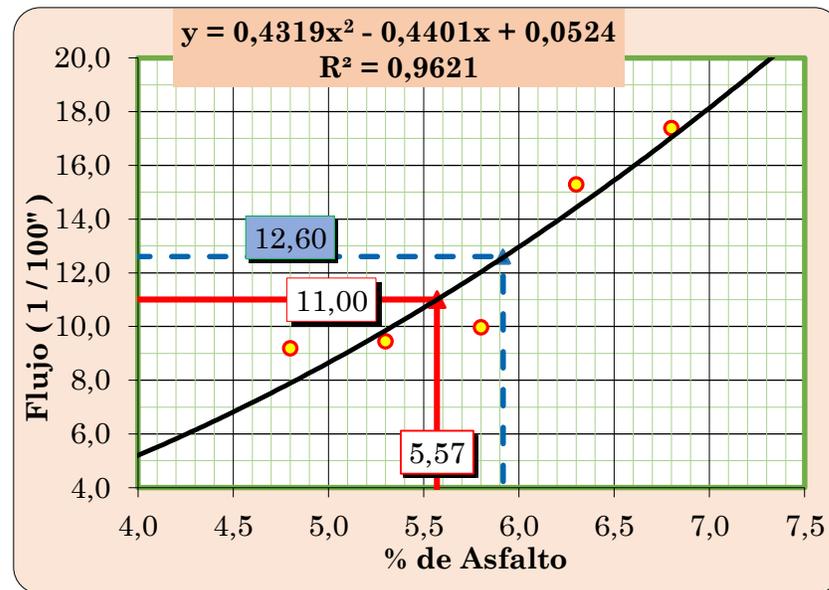
Fuente: Elaboración propia.

Figura 53. Porcentaje de Asfalto vs. Estabilidad corregida



Fuente: Elaboración propia.

Figura 54. Porcentaje de Asfalto vs. Fluencia (flujo)



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 96. Obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico resultado de las gráficas del ensayo Marshall

VALORES				
PROPIEDADES	% DE ASFALTO	OBTENIDOS DE GRÁFICOS	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
DENSIDAD	6,00	2,341	-----	-----
% VACÍOS	5,93	4,0	3	5
R.B.V.	6,27	78,5	75	82
V.A.M	5,80	17,8	15	
ESTABILIDAD (Lb)	5,93	2761,8	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
FLUENCIA 1/100''	5,57	11,0	8	14
PROMEDIO (%)	5,92	Determinación del contenido óptimo de Asfalto Promedio de las Graficas		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 97. Resultado del porcentaje óptimo de cemento asfáltico propuesto

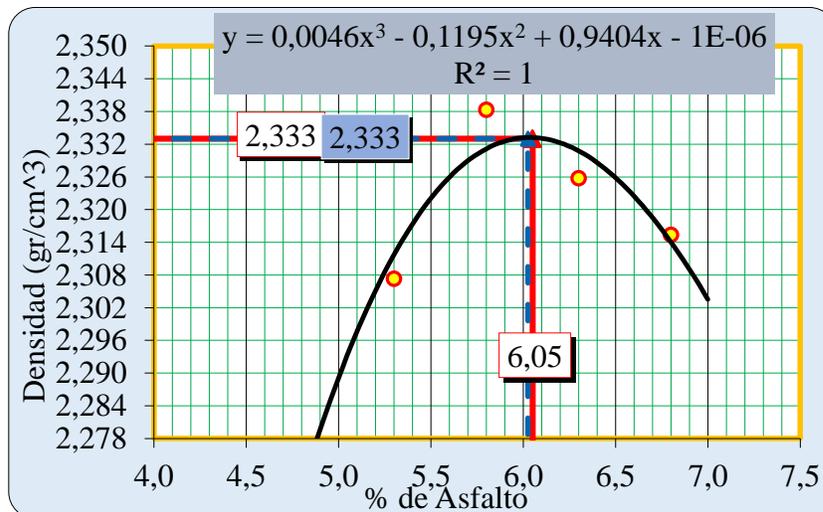
VALORES				
PROPIEDADES	% DE ASFALTO	OBTENIDOS DE GRÁFICOS	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
DENSIDAD	5,92	2,340	-----	-----
% VACÍOS	5,92	4,00	3	5
R.B.V.	5,92	74,50	75	82
V.A.M	5,92	17,80	15	
ESTABILIDAD (Lb)	5,92	2762	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	5,92	12,60	8	14
PROMEDIO (%)			5,92	

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico es de 5,92% para la región templada del departamento de Tarija.

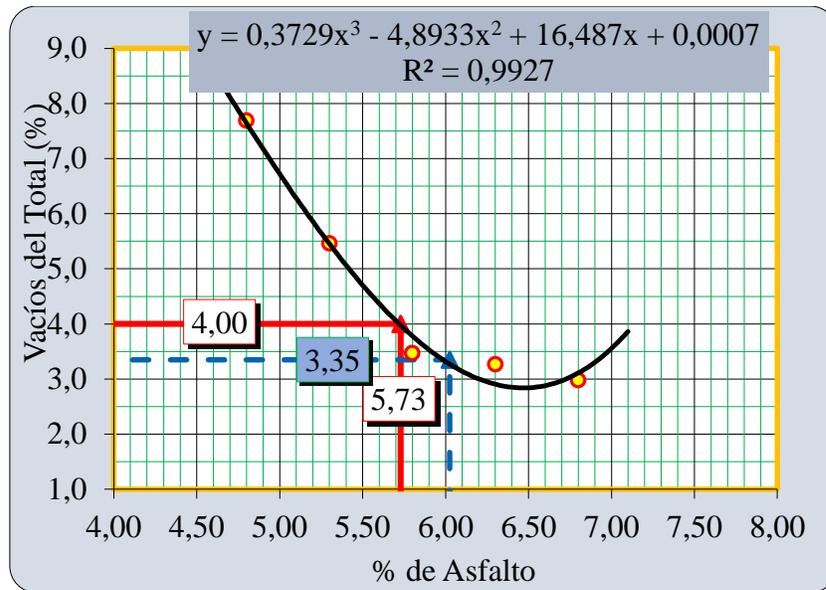
4.2.10.3. Gráficos de curvas de diseño de la mezcla asfáltica método Marshall para la zona fría del departamento

Figura 55. Porcentaje de Asfalto vs. Densidad de la probeta



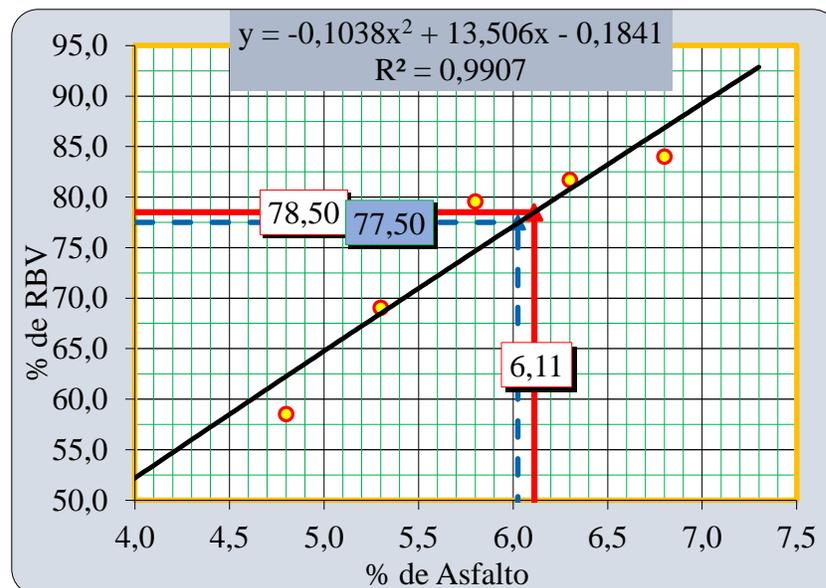
Fuente: Elaboración propia

Figura 56. Porcentaje de Asfalto vs. Porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total (Vv)



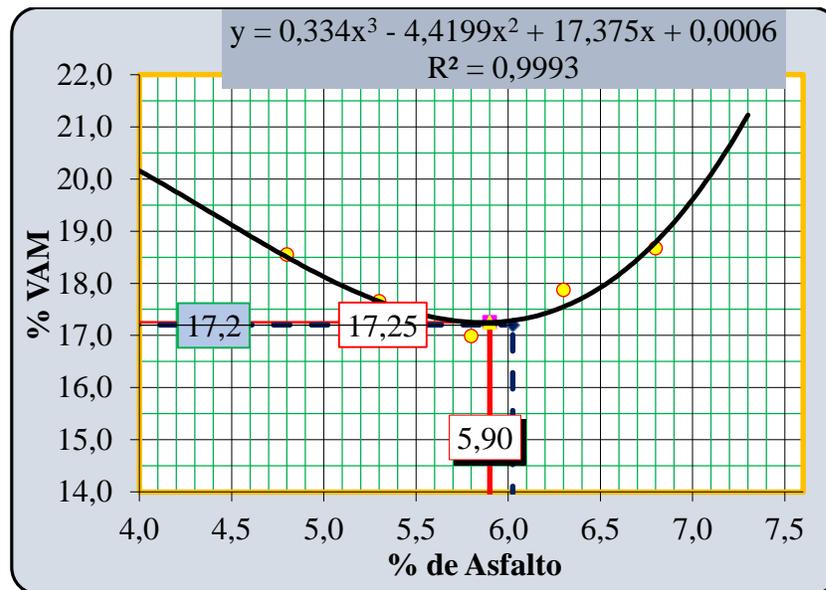
Fuente: Elaboración propia

Figura 57. Porcentaje de Asfalto vs. Porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (RBV)



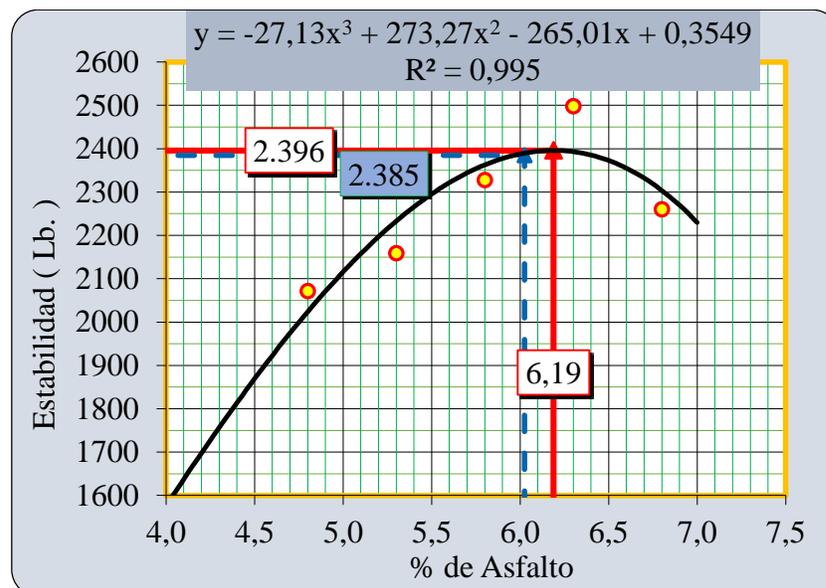
Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Porcentaje de Asfalto vs. Vacíos de agregado mineral (VAM)

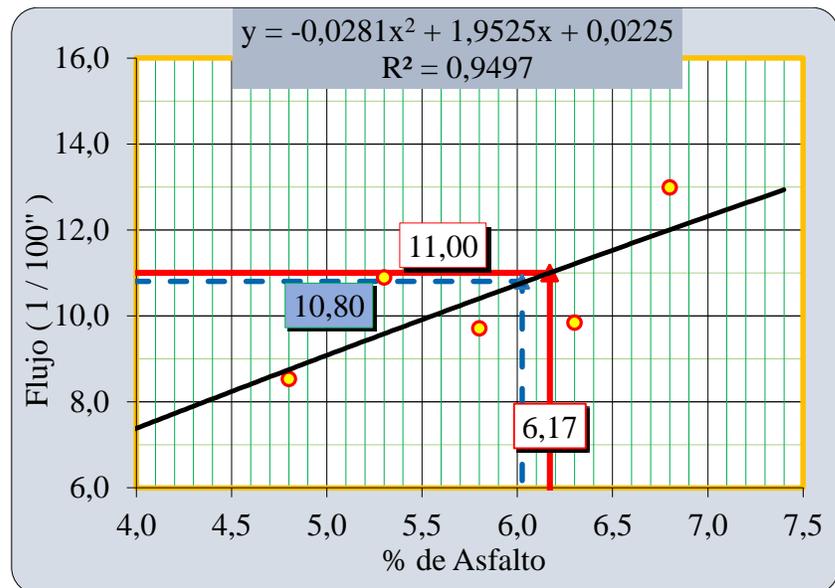


Fuente: Elaboración propia.

Figura 59. Porcentaje de Asfalto vs. Estabilidad corregida



Fuente: Elaboración propia

Figura 60. Porcentaje de Asfalto vs. Fluencia (flujo)

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 98. Obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico resultado de las gráficas del ensayo Marshall

VALORES				
PROPIEDADES	% DE ASFALTO	OBTENIDOS DE GRÁFICOS	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
DENSIDAD	6,05	2,333	-----	-----
% VACÍOS	5,73	4,0	3	5
R.B.V.	6,11	78,5	75	82
V.A.M	5,90	17,3	15	
ESTABILIDAD (Lb)	6,19	2396,0	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	6,17	11,0	8	14
PROMEDIO (%)	6,03	Determinación del contenido óptimo de Asfalto Promedio de las Graficas		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 99. Resultado del porcentaje óptimo de cemento asfáltico propuesto

VALORES				
PROPIEDADES	% DE ASFALTO	OBTENIDOS DE GRÁFICOS	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
DENSIDAD	6,03	2,333	-----	-----
% VACIOS	6,03	3,35	3	5
R.B.V.	6,03	77,50	75	82
V.A.M	6,03	17,20	15	
ESTABILIDAD (Lb)	6,03	2385	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	6,03	10,80	8	14
PROMEDIO (%)			6,03	

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico es de 6,03% para la región fría del departamento de Tarija.

4.2.11. Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo del cemento asfáltico

Se realiza la elaboración de las briquetas para cada región de acuerdo a la zonificación SUPERPAVE con sus correspondientes porcentajes óptimos de cemento asfáltico.

4.2.11.1. Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo del cemento asfáltico para la zona cálida

Después de calcular el porcentaje óptimo del cemento asfáltico para esta zona, que es igual al 6,17% del total de la briketa de 1200 gramos, y calculado anteriormente la temperatura de mezclado y compactado de las briquetas se procede a pesar las muestras para la compactación, en la siguiente tabla se muestran los pesos retenidos en cada tamiz repartidos de manera homogénea para la realización de briquetas con cemento asfáltico 70-100 o PG 70-22, manteniendo la combinación de agregados de 15% de grava 3/4", 27% de gravilla 3/8", 48% de arena triturada y 10% de arena natural para las planilla de esta se muestra en el Anexo N.

Tabla 100. Dosificación con el contenido óptimo de cemento asfáltico de 6,17%

TAMIZ	% Pasa	% Retenido	% Ret. Tamiz	6,17%	
				P. Parcial	P. Acumulado
1"	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	97,7	2,3	2,3	25,9	25,9
1/2"	72,9	27,1	24,8	279,1	305,0
3/8"	63,2	36,8	9,7	109,6	414,6
Nº4	43,2	57,0	20,2	227,5	642,0
Nº10	31,2	68,8	11,8	132,9	775,0
Nº16	20,1	79,9	11,0	124,3	899,2
Nº30	14,4	85,6	5,8	64,8	964,0
Nº50	10,3	89,7	4,1	45,9	1009,9
Nº100	5,9	94,1	4,4	49,7	1059,6
Nº200	4,0	96,0	1,9	21,8	1081,4
Filler	0	100,0	4,0	44,6	1126,0
Peso Muestra=				1126,0 gr.	
Peso Asfalto (6,17%) =				74,0 gr.	
Peso Total Material + C. Asf.=				1200,0 gr.	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 101. Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo de 6,17%

% de Asfalto	Identificación	Altura Promedio (cm)	Peso Seco al aire (gr.)	Peso Sumergido superficial seco	Peso Sumergido al agua (gr.)	Lectura Dial Estabilidad (lb)	Lectura Dial Fluencia
6,17	A1	6,41	1190,5	1191,3	682,0	1540	315
	A2	6,46	1189,0	1190,2	680,3	1510	330
	A3	6,43	1192,8	1193,5	681,8	1512	325
6,17	A1a	6,54	1193,4	1194,9	678,4	1278	330
	A2b	6,46	1195,5	1196,0	684,2	1328	315
	A3c	6,37	1188,8	1189,6	686,1	1316	335

Fuente: Elaboración propia

Se toman en cuenta que las briquetas A1a, A2b y A3c fueron realizadas para saber los valores de la estabilidad remanente a las 24 horas de sumergirlas en el baño María a una temperatura constante de 70°C.

Para esta zona se tiene los siguientes resultados.

Tabla 102. Resultado del ensayo Marshall con porcentaje óptimo de 6,17%

% de Asfalto	Identificación	PROPIEDADES MECÁNICAS						
		Altura Promedio (cm)	Densidad Real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (V _v)	% Vacíos de agregado (V _{AM})	% Vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad Corregida (lb)	Fluencia 1/100
6,17	A1	6,41	2,34	3,67	18,02	79,64	3344,20	12,40
	A2	6,46	2,33	3,90	18,22	78,57	3237,40	12,99
	A3	6,43	2,33	3,94	18,24	78,43	3265,60	12,80
	Promedio		2,33	3,84	18,16	78,88	3282,40	12,73
6,17	A1a	6,54	2,31	4,78	18,96	74,64	2687,9	12,99
	A2b	6,46	2,34	3,74	18,08	79,17	2846,1	12,40
	A3c	6,37	2,36	2,70	17,19	84,15	2885,7	13,19
	Promedio		2,34	3,74	18,96	79,32	2806,6	12,86

Fuente: Elaboración propia

La resistencia remanente de 24 horas en baño María es:

$$\text{Resistencia Remanente} = \frac{\text{Estabilidad promedio remanente}}{\text{Estabilidad promedio normal}} * 100$$

$$\text{Resistencia Remanente} = \frac{2806,6}{3282,40} * 100$$

$$\text{Resistencia Remanente} = 85,5\% > \mathbf{85\%}$$

4.2.11.2. Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo del cemento asfáltico para la zona templada

Con el porcentaje óptimo del cemento asfáltico para esta zona, que es de 5,92% del total de la briqueta de 1200 gramos, en la siguiente tabla se muestran los pesos retenidos en cada tamiz repartidos de manera homogénea para la realización de briquetas con cemento asfáltico 60-70 o PG 64-22, manteniendo la combinación de agregados de 18% de grava 3/4", 32% de gravilla 3/8", 50% de arena triturada, se muestra en el Anexo O.

Tabla 103. Dosificación con el contenido óptimo de cemento asfáltico de 5,92%

TAMIZ	% Pasa	% Retenido	% Ret. Tamiz	5,92%	
				P. Parcial	P. Acumulado
1"	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	96,9	3,1	3,1	35,3	35,3
1/2"	81,9	18,1	15,0	168,9	204,2
3/8"	73,4	26,6	8,5	96,0	300,2
Nº4	52,2	47,8	21,2	238,9	539,1
Nº10	43,1	56,9	9,1	103,2	642,4
Nº16	31,9	68,1	11,2	126,4	768,7
Nº30	22,4	77,6	9,5	107,7	876,5
Nº50	16,2	83,8	6,2	70,0	1015,7
Nº100	10,0	90,0	6,1	69,2	1059,6
Nº200	4,9	95,1	5,2	58,5	1074,2
Filler	0	100,0	4,9	54,8	1129,0
Peso Muestra=				1129,0 gr.	
Peso Asfalto (5,92%) =				71,0 gr.	
Peso Total Material + C. Asf.=				1200,0 gr.	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 104. Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo de 5,92%

% de Asfalto	Identificación	Altura Promedio (cm)	Peso Seco al aire (gr.)	Peso Sumergido superficial seco	Peso Sumergido al agua (gr.)	Lectura Dial Estabilidad (lb)	Lectura Dial Fluencia
5,92	B1	6,30	1185,8	1186,0	685,0	1275	335
	B2	6,21	1181,9	1182,6	682,5	1232	320
	B3	6,26	1190,0	1191,5	688,0	1207	335
5,92	B1a	6,35	1188,8	1189,5	688,9	1097	320
	B2b	6,29	1182,8	1184,0	680,2	1157	330
	B3c	6,37	1188,9	1191,5	688,5	1136	315

Fuente: Elaboración propia

Se toman en cuenta que las briquetas B1a, B2b y B3c fueron realizadas para saber los valores de la estabilidad remanente a las 24 horas de sumergirlas en el baño María a una temperatura constante de 64°C.

Para esta zona se tiene los siguientes resultados.

Tabla 105. Resultado del ensayo Marshall con porcentaje óptimo de 5,92%

% de Asfalto	Identificación	PROPIEDADES MECÁNICAS						
		Altura Promedio (cm)	Densidad Real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado (VAM)	% Vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad Corregida (lb)	Fluencia 1/100
5,92	B1	6,30	2,367	2,98	16,89	82,33	2847,40	13,19
	B2	6,21	2,363	3,13	17,01	81,62	2816,60	12,60

	B3	6,26	2,363	3,12	17,01	81,64	2724,80	13,19
	Promedio		2,365	3,08	16,97	81,86	2796,30	12,99
5,92	B1a	6,35	2,375	2,66	16,61	83,94	2418,4	12,60
	B2b	6,29	2,348	3,77	17,56	78,51	2591,5	12,99
	B3c	6,37	2,364	3,12	17,00	81,62	2491,9	12,40
	Promedio		2,362	3,18	17,06	81,36	2500,6	12,66

Fuente: Elaboración propia

La resistencia remanente de 24 horas en baño María es:

$$\text{Resistencia Remanente} = \frac{\text{Estabilidad promedio remanente}}{\text{Estabilidad promedio normal}} * 100$$

$$\text{Resistencia Remanente} = \frac{2500,6}{2796,30} * 100$$

$$\text{Resistencia Remanente} = 89,4\% > \mathbf{85\%}$$

4.2.11.3. Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo del cemento asfáltico para la zona fría

Con el porcentaje óptimo del cemento asfáltico para esta zona, que es de 6,03% del total de la briqueta de 1200 gramos, en la siguiente tabla se muestran los pesos retenidos en cada tamiz repartidos de manera homogénea para la realización de briquetas con cemento asfáltico 85-100 o PG 58-28, manteniendo la combinación de agregados de 30% de grava 1/2", 35% de gravilla 3/8", 20% de arena triturada y 15% de arena natural, se muestra en el Anexo P.

Tabla 106. Dosificación con el contenido óptimo de cemento asfáltico de 6,03%

TAMIZ	% Pasa	% Retenido	% Ret. Tamiz	6,03%	
				P. Parcial	P. Acumulado
3/4"	100	0,0	0	0,0	0,0
1/2"	91,9	8,1	8,1	91,5	91,5

3/8"	79,1	20,9	12,8	144,1	235,6
N°4	50,9	49,1	28,2	317,9	553,6
N°10	37,2	62,8	13,7	154,7	708,3
N°16	22,8	77,2	14,3	161,7	870,0
N°30	16,4	83,6	6,5	72,7	942,7
N°50	13,2	86,8	3,2	36,1	978,8
N°100	9,3	90,7	3,9	43,7	1022,5
N°200	4,8	95,2	4,6	51,6	1074,1
Filler	0	100,0	4,8	53,6	1127,6
Peso Muestra=				1127,6 gr.	
Peso Asfalto (6,03%) =				72,4 gr.	
Peso Total Material + C. Asf.=				1200,0 gr.	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 107. Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo de 6,03%

% de Asfalto	Identificación	Altura Promedio (cm)	Peso Seco al aire (gr.)	Peso Sumergido superficial seco	Peso Sumergido al agua (gr.)	Lectura Dial Estabilidad (lb)	Lectura Dial Fluencia
6,03	C1	6,25	1190,9	1194,4	680,5	1127	272
	C2	6,37	1183,9	1188,2	674,1	1096	260
	C3	6,35	1185,8	1190,3	676,4	1100	268
6,03	C1a	6,28	1188,8	1191,4	687,7	995	335
	C2b	6,33	1183,7	1187,4	681,7	968	325
	C3c	6,37	1187,2	1192,2	678,4	971	320

Fuente: Elaboración propia

Se toman en cuenta que las briquetas C1a, C2b y C3c fueron realizadas para saber los valores de la estabilidad remanente a las 24 horas de sumergirlas en el baño María a una temperatura constante de 58°C.

Para esta zona se tiene los siguientes resultados.

Tabla 108. Resultado del ensayo Marshall con porcentaje óptimo de 6,03%

% de Asfalto	Identificación	PROPIEDADES MECÁNICAS						
		Altura Promedio	Densidad Real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado	% Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad Corregida (lb)	Fluencia 1/100
6,03	C1	6,25	2,367	4,17	18,07	76,90	2551,70	10,71
	C2	6,37	2,363	4,61	18,44	74,98	2404,20	10,24
	C3	6,35	2,363	4,42	18,28	75,80	2425,10	10,55
	Promedio		2,309	4,40	18,26	75,89	2460,30	10,50
6,03	C1a	6,28	2,360	2,66	16,61	83,94	2235,3	13,19
	C2b	6,33	2,341	3,77	17,56	78,51	2144,7	12,80
	C3c	6,37	2,311	3,12	17,00	81,62	2130,0	12,60
	Promedio		2,337	3,18	17,06	81,36	2170,0	12,86

Fuente: Elaboración propia

La resistencia remanente de 24 horas en baño María es:

$$\text{Resistencia Remanente} = \frac{\text{Estabilidad promedio remanente}}{\text{Estabilidad promedio normal}} * 100$$

$$\text{Resistencia Remanente} = \frac{2170,0}{2460,30} * 100$$

$$\text{Resistencia Remanente} = 88,2\% > 85\%$$

4.2.12. Tratamiento estadístico de los resultados

Teniendo los resultados de las propiedades mecánicas provenientes del ensayo Marshall, de acuerdo a las temperaturas extremas y al grado de desempeño del cemento

asfáltico, según la zonificación SUPERPAVE, se procede a determinar el comportamiento estadístico de los mismos.

4.2.12.1. Tratamiento estadístico de los resultados de la zona cálida

Tabla 109. *Tratamiento estadístico de los resultados de la zona cálida*

Descripción	PROPIEDADES MECÁNICAS						
	Altura Promedio (cm)	Densidad Real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (V _v)	% Vacíos de agregado (V _{AM})	% Vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad Corregida (lb)	Fluencia 1/100
A1	6,41	2,34	3,67	18,02	79,64	3344,2	12,4
A2	6,46	2,33	3,9	18,22	78,57	3237,4	12,99
A3	6,43	2,33	3,94	18,24	78,43	3265,6	12,8
Media	6,43	2,33	3,84	18,16	78,88	3282,40	12,73
Desviación estándar	0,025	0,006	0,146	0,122	0,662	55,347	0,301
Límite superior (M+desv)	6,458	2,339	3,982	18,282	79,542	3337,747	13,031
Límite inferior (M-desv)	6,408	2,328	3,691	18,038	78,218	3227,053	12,429

Fuente: Elaboración propia

4.2.12.2. Tratamiento estadístico de los resultados de la zona fría

Tabla 110. *Tratamiento estadístico de los resultados de la zona fría*

Descripción	PROPIEDADES MECÁNICAS						
	Al tu	De nsi	% Va	% Va	% Va	Es ta	Fl ue

B1	6,30	2,367	2,98	16,89	82,33	2847,4	13,19
B2	6,21	2,363	3,13	17,01	81,62	2816,6	12,6
B3	6,26	2,363	3,12	17,01	81,64	2724,8	13,19
Media	6,26	2,36	3,08	16,97	81,86	2796,27	12,99
Desviación estándar	0,045	0,002	0,084	0,069	0,404	63,779	0,341
Límite superior (M+desv)	6,302	2,367	3,161	17,039	82,268	2860,046	13,334
Límite inferior (M-desv)	6,212	2,362	2,993	16,901	81,459	2732,488	12,653

Fuente: Elaboración propia

4.2.12.3. Tratamiento estadístico de los resultados de la zona templada

Tabla 111. Tratamiento estadístico de los resultados de la zona templada

Descripción	PROPIEDADES MECÁNICAS						
	Altura Promedio (cm)	Densidad Real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado (VAM)	% Vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad Corregida (lb)	Fluencia 1/100
C1	6,25	2,367	4,17	18,07	76,9	2551,7	10,71
C2	6,37	2,363	4,61	18,44	74,98	2404,2	10,24
C3	6,35	2,363	4,42	18,28	75,8	2425,1	10,55
Media	6,32	2,36	4,40	18,26	75,89	2460,33	10,50
Desviación estándar	0,064	0,002	0,221	0,186	0,963	79,813	0,239
Límite superior (M+desv)	6,388	2,367	4,621	18,449	76,857	2540,146	10,739
Límite inferior (M-desv)	6,259	2,362	4,179	18,078	74,930	2380,520	10,261

Fuente: Elaboración propia

4.2.13. Análisis del tratamiento estadístico de los resultados

Como los resultados son muy próximos entre sí, además teniendo en cuenta que se cuenta con tres datos por cada zona según la zonificación SUPERPAVE y se puede

observar que los valores de los mismos son similares se asumirá la media aritmética para cada zona y así obtener los resultados de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.

4.2.14. Análisis de los resultados de la aplicación del cemento asfáltico por grado de desempeño en el ensayo Marshall de acuerdo a la zonificación SUPERPAVE en función a temperaturas extremas

Se puede observar que con la zonificación SUPERPAVE para la obtención del grado de desempeño en función a las temperaturas extremas, facilita la elaboración de mezclas asfálticas para el departamento de Tarija.

Además se observa en la siguiente tabla que cumplen con las especificaciones técnicas de la norma AASTHO

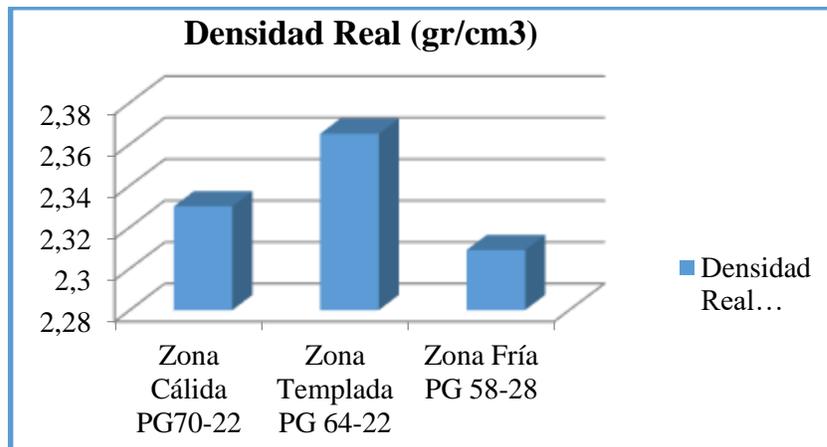
Tabla 112. *Propiedades Marshall para cada zona*

VALORES OBTENIDOS DE LA ZONIFICACIÓN SUPERPAVE					
PROPIEDADES	ZONA			ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
	Cálida	Templada	Fría		
DENSIDAD	2,33	2,365	2,309	-----	-----
% VACIOS	3,84	3,08	4,4	3	5
R.B.V.	78,88	81,86	75,89	75	82
V.A.M	18,16	16,97	18,26	15	
ESTABILIDAD (Lb)	3282,4	2796,3	2460,3	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	12,73	12,99	10,5	8	14

Fuente: Elaboración propia

4.2.14.1. Análisis de los resultados Marshall de la densidad real para la zonificación SUPERPAVE

Figura 61. *Análisis de los resultados Marshall de la densidad*

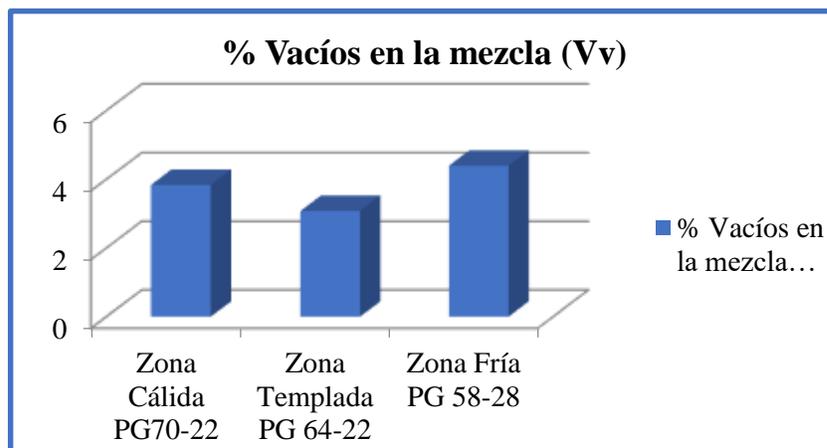


Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se puede observar que la densidad real de acuerdo al grado de desempeño del cemento asfáltico para la zonificación SUPERPAVE para el departamento de Tarija varía para las zonas cálida, templada, fría.

Figura 62. Análisis de los resultados Marshall del porcentaje de vacíos en la mezcla para la zonificación SUPERPAVE

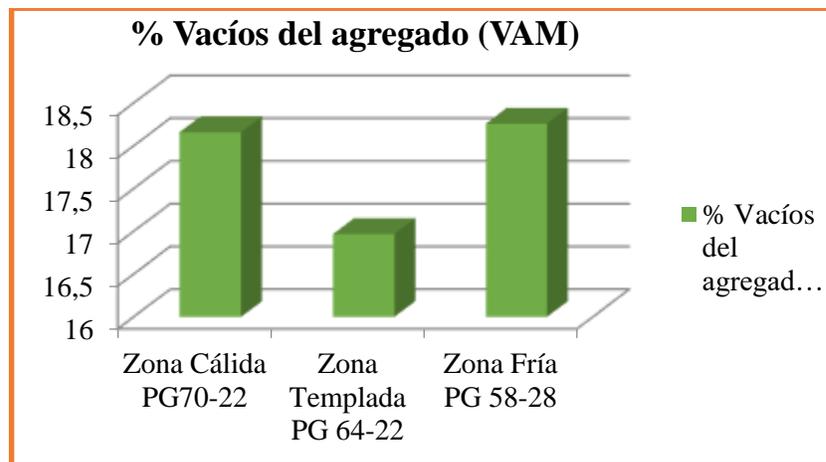


Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se puede observar que el porcentaje de vacíos en la mezcla es menor en zona templada y mayor en la zona fría de acuerdo al grado de desempeño del cemento asfáltico para la zonificación SUPERPAVE para el departamento de Tarija.

Figura 63. *Análisis de los resultados Marshall del porcentaje de vacíos del agregado para la zonificación SUPERPAVE*

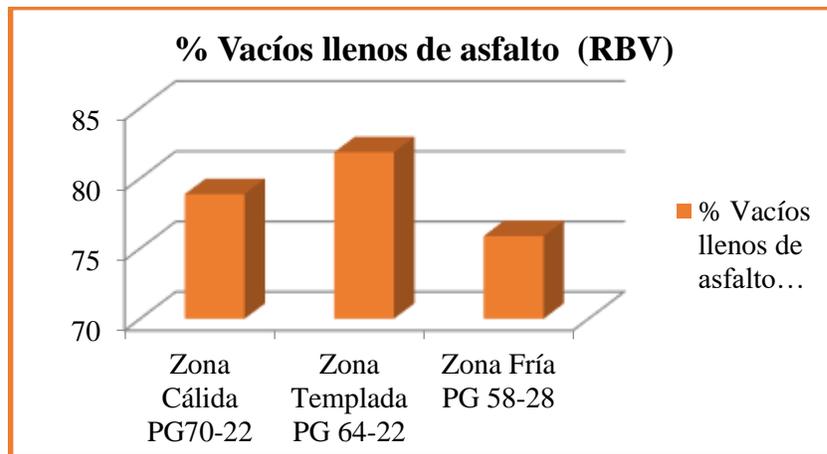


Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se puede observar que el porcentaje de vacíos del agregado es menor en zona templada y mayor en la zona fría de acuerdo al grado de desempeño del cemento asfáltico para la zonificación SUPERPAVE para el departamento de Tarija.

Figura 64. *Análisis de los resultados Marshall del porcentaje de vacíos llenos de asfalto para la zonificación SUPERPAVE*

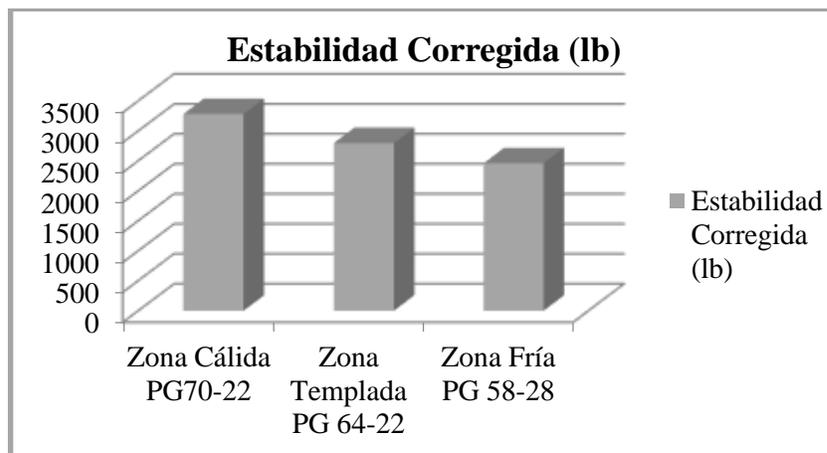


Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se puede observar que el porcentaje de vacíos llenos de asfalto es menor en zona fría y mayor en la zona templada de acuerdo al grado de desempeño del cemento asfáltico para la zonificación SUPERPAVE para el departamento de Tarija.

Figura 65. Análisis de los resultados Marshall de la estabilidad para la zonificación SUPERPAVE

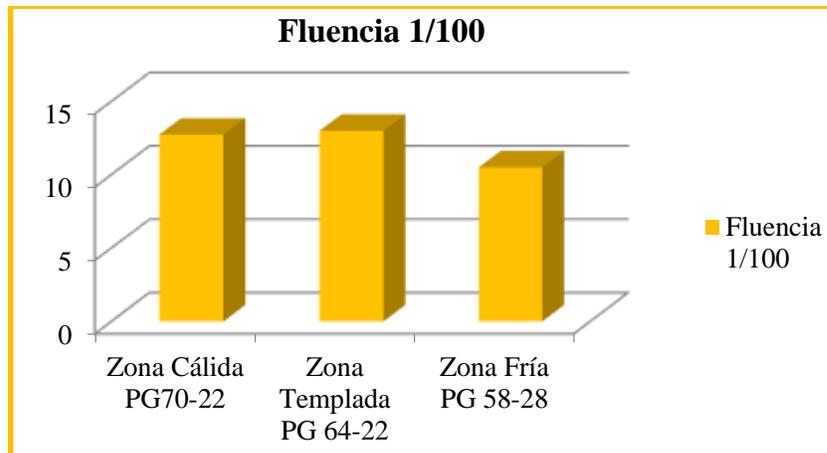


Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se puede observar que la estabilidad corregida es menor en zona fría y mayor en la zona cálida de acuerdo al grado de desempeño del cemento asfáltico para la zonificación SUPERPAVE para el departamento de Tarija.

Figura 66. *Análisis de los resultados Marshall de la fluencia para la zonificación SUPERPAVE*



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados:

Se puede observar que la fluencia es menor en zona fría y mayor en la zona templada de acuerdo al grado de desempeño del cemento asfáltico para la zonificación SUPERPAVE para el departamento de Tarija.

4.3. ANÁLISIS Y JUSTIFICACIÓN DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE BANCOS DEL DEPARTAMENTO DE TARIJA

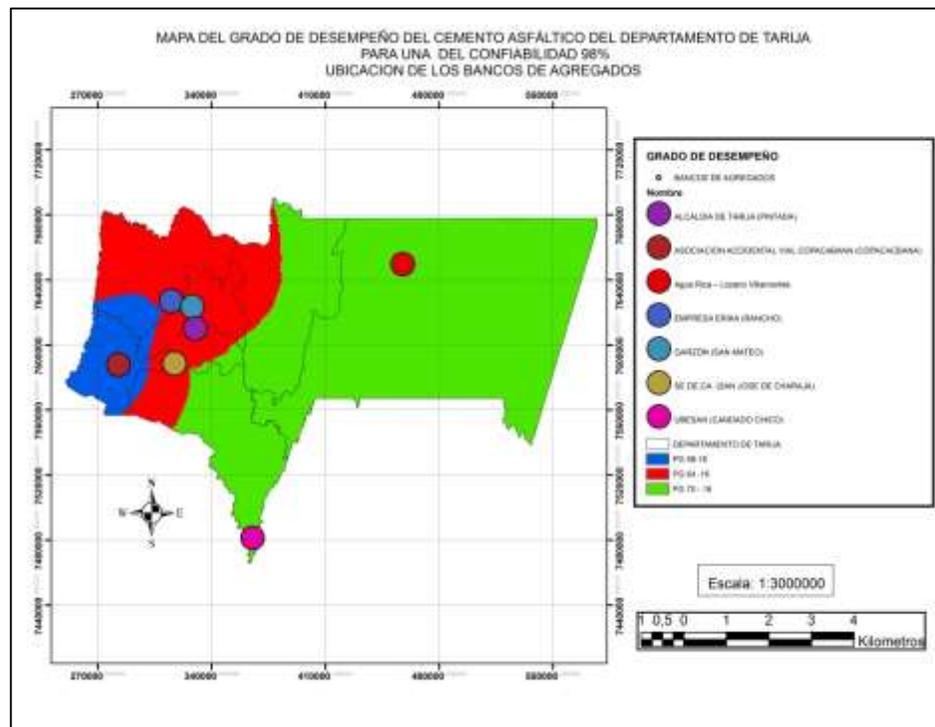
Se realizara el análisis mediante la granulometría SUPERPAVE para los siguientes bancos granulométrico. La curva granulométrica normal se muestra en el Anexo Q.

Tabla 113. Bancos de agregados del departamento de Tarija

Chancadora	Ubicación
Agua Rica – Lozano	Villa Montes (Zona Cálida)
Empresa Vial Copacabana	Copacabana (Zona Fría)
Charaja	San José de Charaja (Zona Templada)
Alcaldía de la provincia Cercado	Pintada (Zona Templada)
Garzón	San Mateo (Zona Templada)
Empresa Erika	Rancho (Zona Templada)
UBESAN	Candado Chico (Zona Cálida)

Fuente: Elaboración propia

Figura 67. Ubicación de los bancos de agregados del departamento de Tarija



Fuente: Elaboración propia

- Análisis y justificación de la curva granulométrica de la chancadora Agua Rica – Lozano de Villa Montes aplicado la granulometría SUPERPAVE a la granulometría normal

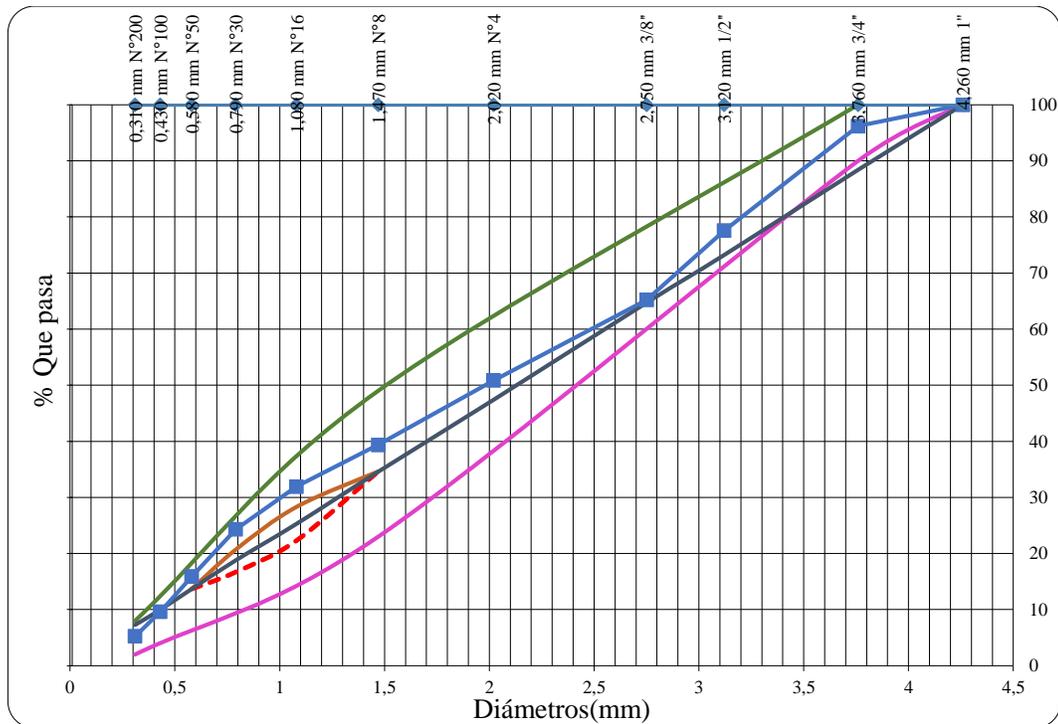
Tabla 114. Curva granulométrica SUPERPAVE de la chancadora Agua Rica – Lozano de Villa Montes

% Usado	GRAVA 50%		ARENA TRITURADA 50%		Curva De Trabajo	Puntos De Control		Zona Restringida		Línea de máxima densidad
	% Total	% Enc	% Total	% Enc.		Máx.	Mín.	Mín.	Máx.	
1"	100,0	50,0	100,0	50,0	100,0		100			7,3
3/4"	92,4	46,2	100,0	50,0	96,2	100	90			10
1/2"	42,1	21,0	100,0	50,0	71,6					13,7
3/8"	30,4	15,2	100,0	50,0	65,2					18,8
N° 4	3,6	1,8	98,1	49,1	50,8	49	23			25,3
N° 8	0,4	0,2	78,3	39,2	39,4			34,6	34,6	34,6
N° 16	0,4	0,2	63,5	31,8	32,0			22,3	28,3	47,4
N° 30	0,0	0,0	53,6	24,3	26,8			16,7	20,7	64,7

N° 50	0,0	0,0	36,8	15,9	18,4			13,7	13,7	73,2
N° 100	0,0	0,0	19,2	9,6	9,6					88,4
N° 200	0,0	0,0	10,5	5,3	5,3	8	2			100

Fuente: Chancadora Agua Rica – Lozano

Figura 68. Curva granulométrica SUPERPAVE de la chancadora Agua Rica – Lozano de Villa Montes



Fuente: Chancadora Agua Rica – Lozano

Como se puede observar la granulometría de la chancadora Agua Rica – Lozano de Villa Montes cumple con la granulometría SUPERPAVE, con la cual se justifica que esta puede ser utilizada en la elaboración de las mezclas asfálticas para la zona cálida de nuestro departamento utilizando el cemento asfáltico por grado de desempeño de PG 70 – 16.

- Análisis y justificación de la curva granulométrica de la chancadora de la empresa Vial Copacabana, ubicada en Copacabana aplicado la granulometría SUPERPAVE.

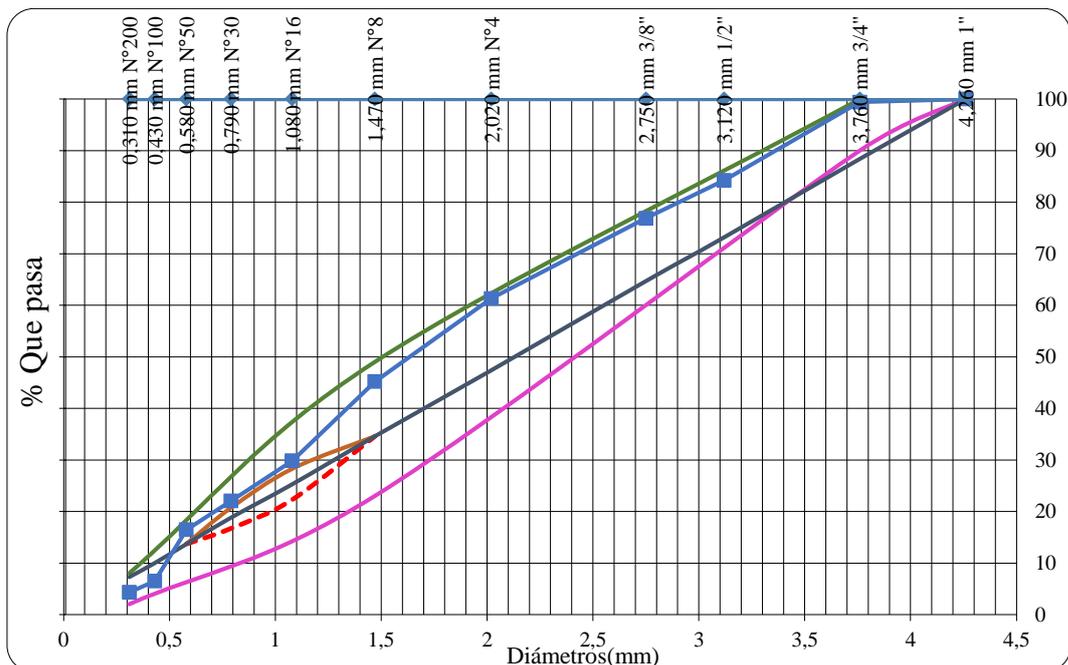
Tabla 115. Curva granulométrica SUPERPAVE de la chancadora de la empresa Vial Copacabana ubicada en Copacabana

% Usado	GRAVA 15%		GRAVILLA 27%		ARENA TRITURADA 48%		Curva De Trabajo	Puntos De Control		Zona Restringida		Línea de máxima densidad
	Tamiz	% Total	% Enc	% Total	% Enc.	% Total		% Enc.	Máx.	Mín.	Mín.	
1"	100,0	30,0	100,0	30,0	100,0	40,0	100,0		100			7,3
3/4"	98,0	29,4	100,0	30,0	100,0	40,0	99,4	100	90			10
1/2"	72,5	21,8	75,0	22,5	100,0	40,0	84,3					13,7
3/8"	55,9	16,8	67,0	20,1	100,0	40,0	76,9	0	0			18,8
N° 4	26,0	7,8	45,2	13,6	99,9	40,0	61,3	49	23			25,3
N° 8	0,3	0,1	45,0	13,5	79,0	31,6	45,2			34,6	34,6	34,6
N° 16	0,3	0,1	9,0	2,7	67,6	27,0	29,8	0	0	22,3	28,3	47,4
N° 30	0,3	0,1	6,0	1,8	50,4	20,2	22,1			16,7	20,7	64,7
N° 50	0,3	0,1	5,0	1,5	37,2	14,9	16,5			13,7	13,7	73,2
N° 100	0,3	0,1	2,1	0,6	14,4	5,8	6,5		!			88,4

N° 200	0,3	0,1	0,2	0,1	10,4	4,2	4,3	8	2			100
--------	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	---	---	--	--	-----

Fuente: Elaboración propia

Figura 69. Curva granulométrica SUPERPAVE de la chancadora de la empresa Vial Copacabana ubicada en Copacabana



Fuente: Chancadora Vial Copacabana

Como se puede observar la granulometría de la chancadora Vial Copacabana ubicada en la comunidad de Copacabana cumple con la granulometría SUPERPAVE, con la cual se justifica que esta puede ser utilizada en la elaboración de las mezclas asfálticas para la zona fría de nuestro departamento utilizando el cemento asfáltico por grado de desempeño de PG 58 – 16.

- Los demás bancos de agregados se muestran en el Anexo Q, los cuales cumplen con esta granulometría y se utilizan para realizar una extrapolación por la similitud de condiciones climáticas de acuerdo a su zona a utilizar su correspondiente cemento asfáltico por grado de desempeño.

4.4. RESULTADO DE LAS VARIABLES

De acuerdo al punto **1.5.2 identificación de variables**, donde se identificó las variables independientes, la variable dependiente para la presente investigación las cuales se muestran en los siguientes puntos:

4.4.1. Variables independientes

Como variables independientes se tiene a las temperaturas del pavimento:

- Temperatura máxima del pavimento.
- Temperatura intermedia del pavimento.
- Temperatura mínima del pavimento.

Las variables independientes que se obtuvieron son las temperaturas del pavimento para cada estación meteorológica del departamento que cumplieron un previo análisis son las siguientes:

Tabla 116. *Variables independientes*

Estaciones meteorológicas	VARIABLES INDEPENDIENTES: Temperaturas del pavimento:		
	Máxima	Intermedia	Mínima
Tarija - Aeropuerto	58,15	17,9	-5,76
San Andrés	58,78	17,5	-5,76
San Jacinto Sud	60,00	18,4	-5,80
Yesera Norte	55,15	15,0	-6,78
El Tejar Tarija	57,92	18,0	-6,11
Campanario	48,58	10,0	-10,79
Coimata	56,50	16,9	-7,08
Sella Quebradas	57,59	17,5	-7,18
El Puente	61,26	19,2	-5,30
Trancas	58,24	17,9	-6,32
Agüaraycito	65,85	24,1	-3,64
Palmar Grande	66,09	23,0	-4,92
Yacuiba – Aeropuerto	62,22	21,1	-2,90
Villa Montes – Aeropuerto	66,37	23,5	-4,83
Itau	65,18	20,4	-4,02
Bermejo – Aeropuerto	65,28	22,3	-1,80

Cañas	56,72	16,9	-7,11
Emborozu	64,59	20,2	-2,32
Ce.Na.Vit.	59,24	18,0	-7,43
Juntas	60,88	18,1	-5,64
Copacabana	51,63	11,5	-10,74
Entre Ríos	59,40	19,0	-5,35

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Variable dependiente

Como variable dependiente se tiene el cemento asfáltico por grado de desempeño.

Las variables dependientes que se obtuvieron de acuerdo a las variables independientes son el grado de desempeño del cemento asfáltico para cada estación meteorológica seleccionada los cuales son:

Tabla 117. Variables dependientes

Estaciones meteorológicas	VARIABLE DEPENDIENTE: Grado de desempeño del cemento asfáltico:		
	Máxima	Intermedia	Mínima
Tarija - Aeropuerto	64	28	16
San Andrés	64	28	16
San Jacinto Sud	64	28	16
Yesera Norte	58	25	16
El Tejar Tarija	58	25	16
Campanario	52	22	16
Coimata	58	25	16
Sella Quebradas	58	25	16
El Puente	64	28	16
Trancas	64	28	16

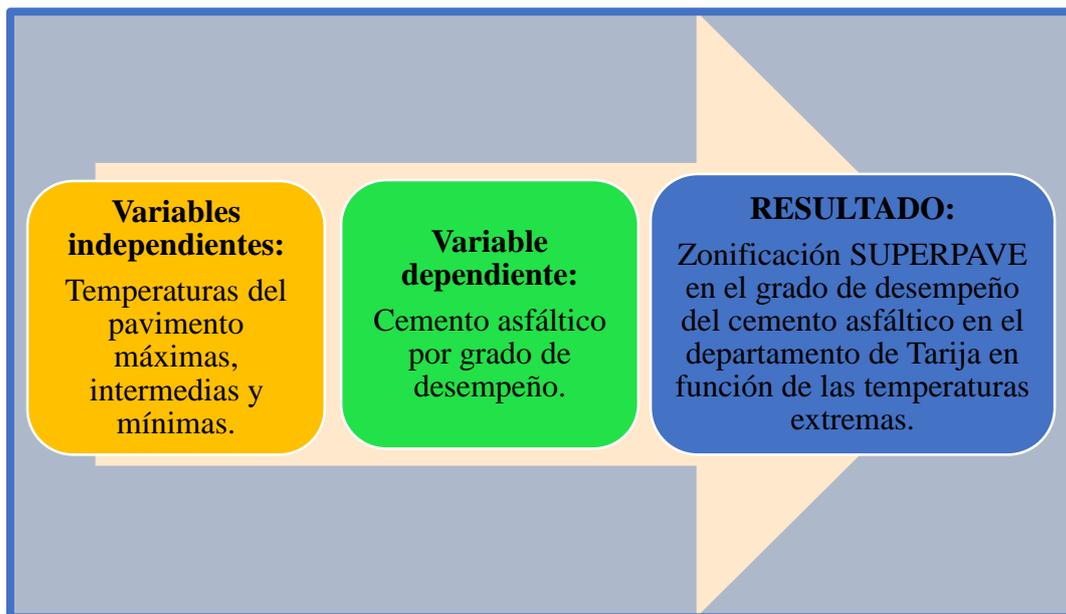
Agüaraycito	70	31	16
Palmar Grande	70	31	16
Yacuiba – Aeropuerto	64	28	16
Villa Montes – Aeropuerto	70	31	16
Itau	70	31	16
Bermejo – Aeropuerto	70	31	16
Cañas	58	25	16
Emborozu	70	31	16
Ce.Na.Vit.	64	28	16
Juntas	64	28	16
Copacabana	52	22	16
Entre Ríos	64	28	16

Fuente: Elaboración propia

4.4.3. Relación de las variables con el producto y resultados

De acuerdo a las temperaturas extremas de las 22 estación meteorológicas seleccionadas para esta investigación se obtuvieron las variables independientes que son las temperaturas máxima, mínima e intermedia a la que el pavimento estará expuesto durante su funcionamiento se determinó la variable dependiente que es el cemento asfáltico por grado de desempeño y con este se realizó la zonificación SUPERPAVE para una confiabilidad del 50% y del 98% para el departamento de Tarija siendo el resultado del producto la zonificación SUPERPAVE en el grado de desempeño del cemento asfáltico en el departamento de Tarija en función de las temperaturas extremas con una confiabilidad del 98%, de las cuales está relacionado directamente los resultados con sus variables.

Figura 70. Resultado de la investigación en función de sus variables



Fuente: Elaboración propia

Mediante los resultados de la zonificación SUPERPAVE con una confiabilidad del 98%, se aplicó el cemento asfáltico por grado de desempeño en la elaboración de las mezclas asfálticas para las tres zonas determinadas mediante la zonificación SUPERPAVE a las cuales se las nombro zona fría para un cemento asfáltico con grado de desempeño PG: 58 – 16 el cual corresponde al 7,4% del territorio del departamento equivale a un área de 2765 km², zona templada para un cemento asfáltico con grado de desempeño PG: 64 – 16 el cual corresponde al 22,1% del territorio del departamento equivale a un área de 8322 km² y zona cálida para un cemento asfáltico con grado de desempeño PG: 70 – 16 el cual corresponde al 70,5% del territorio del departamento equivale a un área de 26536 km² y así se determinó sus propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas para cada una de las zonas.

Figura 71. *Cementos asfálticos por grado de desempeño para el departamento de Tarija mediante la zonificación SUPERPAVE*



Fuente: Elaboración propia

4.5. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE VERDAD DE LA HIPÓTESIS

➤ **Dentro de la presente investigación se tiene la siguiente hipótesis:**

Es posible realizar la zonificación SUPERPAVE para determinar los cementos asfálticos por grado de desempeño a utilizar en nuestro departamento.

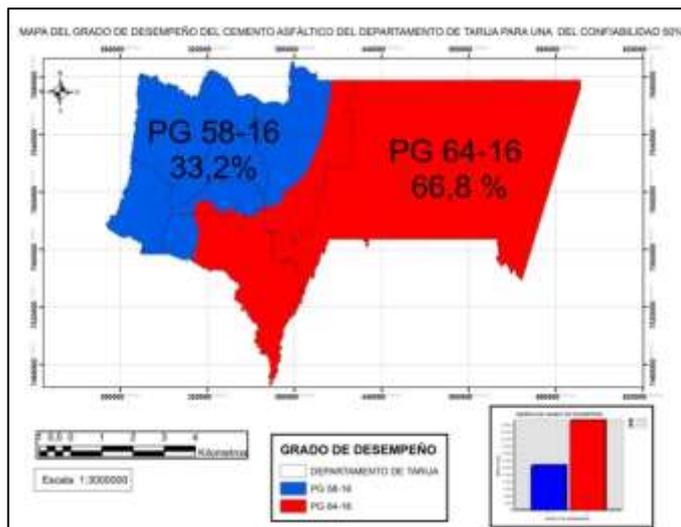
➤ **Comprobación del valor de verdad de la hipótesis**

Se puede comprobar el valor de verdad de las hipótesis ya que se realizó la zonificación SUPERPAVE, mediante las temperaturas extremas a la que el pavimento estará expuesto durante su funcionamiento, y se obtuvo el cemento asfáltico por grado de desempeño adecuado para las tres zonas del departamento de Tarija mediante la zonificación SUPERPAVE para una confiabilidad del 98%, y se realizó la aplicación de los cementos asfálticos por grado de desempeño para estas tres zonas en la elaboración de las mezclas asfálticas con una confiabilidad del 95%. Por lo tanto se determina así el valor de verdad de la hipótesis.

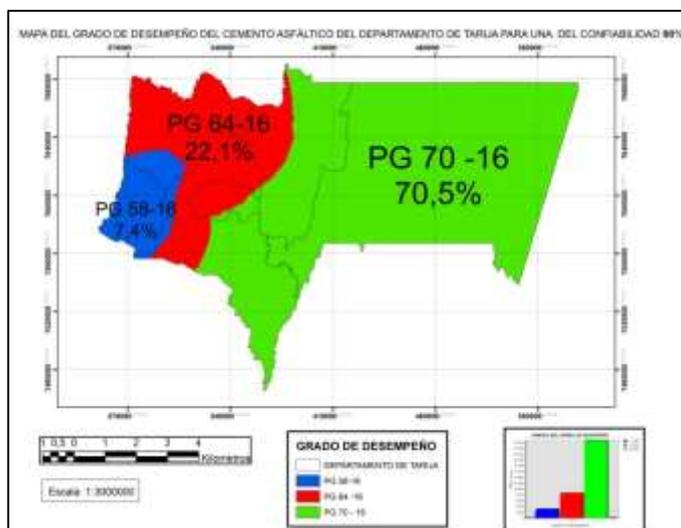
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se realizó la zonificación SUPERPAVE, utilizando las temperaturas ambientales extremas del departamento de Tarija y se determinó el cemento asfáltico por grado de desempeño a utilizarse en nuestro departamento.
 - Para una confiabilidad del 50%, el mapa se muestra a continuación:



- Para una confiabilidad del 98% el mapa se muestra a continuación:



- Luego de realizar una revisión bibliográfica del método SUPERPAVE en la selección del grado de desempeño del cemento asfáltico de trabajos realizados en otros países, nos ayudó a aplicar la metodología de diseño a nuestro departamento.
- Luego de analizar las 22 estaciones meteorológicas, mediante el análisis de consistencia con la curva doble masa se observa que estas son consistentes.
- Se aplicó el modelo SHRP del método SUPERPAVE en la conversión de las 22 estaciones meteorológicas a temperaturas del pavimento las cuales están en función a la latitud, y las temperaturas extremas de la zona. Determinando los grados de desempeño de los cementos asfálticos para cada estación meteorológica, del departamento de Tarija.

- Se elaboró mezclas asfálticas Marshall para la zona fría, utilizando el cemento asfáltico por penetración 85-100 el cual equivale a un cemento asfáltico por grado de desempeño de PG 58-16.
- Se elaboró mezclas asfálticas Marshall para la zona templada, utilizando el cemento asfáltico por penetración 60-70 el cual equivale a un cemento asfáltico por grado de desempeño de PG 64-16.
- Se elaboró mezclas asfálticas Marshall para la zona cálida, utilizando el cemento asfáltico por penetración 70-100 el cual equivale a un cemento asfáltico por grado de desempeño de PG 70-16.
- Se utilizó el programa ArcGis en la elaboración de los mapas para una confiabilidad del 50% y del 98%, identificando los cementos asfálticos para las distintas regiones del departamento de Tarija.
- Para la validación del mapa de la zonificación SUPERPAVE para una confiabilidad del 50% y del 98%, se utilizó 13 estaciones meteorológicas las cuales están dentro los rangos de acuerdo al grado desempeño del cemento asfáltico, cumpliendo los mapas de la zonificación realizada
- En lo que a confiabilidad corresponde, es mejor utilizar el mayor porcentaje posible, así el resultado que se obtendrá será más cercano a la realidad.
- Se determinó el valor de verdad de las hipótesis ya que se realizó la zonificación SUPERPAVE, mediante las temperaturas extremas a la que el pavimento estará expuesto durante su funcionamiento, y se obtuvo el cemento asfáltico por grado de desempeño adecuado para las tres zonas del departamento de Tarija mediante la zonificación SUPERPAVE para una confiabilidad del 98%, y se realizó la aplicación de los cementos asfálticos por grado de desempeño para estas tres zonas en la elaboración de las mezclas asfálticas con una confiabilidad del 95%. Por lo tanto se determina así el valor de verdad de la hipótesis.

- Se aplicó la metodología SUPERPAVE para la caracterización y granulometría de los agregados para cada una de las zonas. Su combinación de los agregados para cada zona son:
 - Zona cálida (PG 70-16), grava 3/4" 15%, gravilla 3/8" 27%, arena triturada 48% y arena natural 10%.
 - Zona templada (PG 64-16), grava 3/4" 18%, gravilla 3/8" 32%, arena triturada 50% y arena natural 10%.
 - Zona fría (PG 58-16), grava 3/8" 30%, gravilla N°4 35%, arena triturada 20% y arena natural 15%.

- De acuerdo a la proporción de agregados se elaboraron las mezclas de prueba con la metodología Marshall para cada zona, para evaluar los puntos con un porcentaje de cemento asfáltico de 4.8%, 5.3%, 5.8%, 6.3% y 6.8% que fueron determinados en base al contenido óptimo teórico de asfalto.

- Se realizó el diseño de mezclas asfálticas con el método Marshall y determinó sus propiedades mecánicas, obteniendo así los datos necesarios para ser comparados con las especificaciones para tráfico pesado que establece el Instituto del Asfalto. Para cada zona se obtiene la mezcla asfáltica con la proporción de agregados propuesto y se obtiene los siguientes porcentajes óptimos del cemento asfálticos:
 - Zona cálida (PG 70-16), porcentaje óptimo de 6,17 de cemento asfáltico.
 - Zona templada (PG 64-16), porcentaje óptimo de 5,92 de cemento asfáltico.
 - Zona fría (PG 58-16), porcentaje óptimo de 6,03 de cemento asfáltico.

- Debido que no se utilizó bancos de agregados para el chaco para la elaboración del diseño de mezclas asfálticas, se realizó una extrapolación de los resultados obtenidos en zona de similar condiciones de temperaturas la cual es de Bermejo.

5.2. RECOMENDACIONES

- Utilizar la mayor cantidad de estaciones meteorológicas que sea posible y tratar que estas cubran la mayor parte del territorio, de esta forma se podrá realizar una mejor zonificación.
- Que el SENAMHI Y AASANA u otras instituciones, lleven registros de las estaciones meteorológicas con la información diaria que permita en un futuro una determinación más exacta de las temperaturas del pavimento por el método SUPERPAVE.
- En futuro trabajos se debe golpear el martillo compactador a una velocidad y altura constante debido que el ensayo Marshall es una práctica sensible y cuidadosa un pequeño error puede hacer fallar los resultados.
- En la elaboración de mezclas asfálticas y caracterización del cemento asfáltico tener cuidado en no sobrecalentar varias veces el cemento asfáltico debido que este perderá sus propiedades.
- Que en nuestro medio el diseño de mezclas asfálticas en caliente se elaboren con granulometría SUPERPAVE y cemento asfáltico por Grado de Desempeño, para el primer paso que de nuestro departamento hacia la implementación por completo del método SUPERPAVE.
- Utilizar en futuros trabajos mayor bancos de agregados de diferentes zonas del departamento como son las del chaco, la zona alta del departamento.
- Elaborar mezclas asfálticas con equipos de método SUPERPAVE para cada zona del departamento.

- Utilizar los equipos SUPERPAVE para la caracterización de los cementos asfálticos, elaboración de las mezclas asfálticas y análisis de estas a temperaturas extremas para obtener su comportamiento que tendrá durante su funcionamiento.

ENSAYOS DEL MÉTODO SUPERPAVE	PROPÓSITO
Viscosímetro Rotacional Brookfield (RV)	Mide las propiedades del cemento asfáltico a temperaturas altas
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	Mide las propiedades del cemento asfáltico a temperaturas altas e intermedias
Reómetro de Viga de Flexión (BBR)	Mide las propiedades del cemento asfáltico a temperaturas bajas
Ensayo de Tracción Directa (DTT)	
Horno de Película Delgada Rotatoria (RTFO)	Simula el envejecimiento inicial del cemento asfáltico
Envejecimiento en Recipiente Presurizado (PAV)	Simula el envejecimiento durante la vida de servicio del cemento asfáltico

