

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción.

El uso de concreto asfáltico se ha incrementado en los últimos años, tanto a nivel nacional como a nivel mundial, debido al impulso por parte de las autoridades a contribuir con la mejora de sus infraestructuras viales y de esta forma influir directamente en el desarrollo del país.

La utilización de asfaltos modificados se convirtió en la estrategia clave para diseñar cementos asfálticos más resistentes a las condiciones climáticas extremas y tráfico intenso. Estos nuevos cementos asfálticos incorporaron una mejora del material para resistir variaciones de temperatura y las cargas vehiculares intensas, resultando en pavimentos más duraderos y de mayor desempeño, lo que permitió que se adaptaran a proyectos de alto tráfico y a condiciones climáticas adversas, elevando los estándares de calidad en la construcción de carreteras y siendo los precursores para futuros desarrollos en la búsqueda constante de soluciones más eficientes y sostenibles en el ámbito de la infraestructura vial. (Loría et al., 2023)

La interacción entre el asfalto y los agregados puede influir en las propiedades mecánicas y térmicas del asfalto, afectando su rendimiento y vida útil.

Por lo tanto, este trabajo buscará brindar información sobre el comportamiento que tiene el asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) y como los agregados influyen, a través de una serie de ensayos y análisis, se espera revelar patrones y correlaciones que puedan ayudar a optimizar la selección de este tipo de agregado asfáltico. Los resultados obtenidos podrían ayudar a los ingenieros a implementar el empleo del asfalto modificado Tipo I (PG 76-28), lo que a su vez podría llevar a seleccionar mejor los agregados con el fin de diseñar carreteras más duraderas y seguras.

1.2 Antecedentes.

Desde hace varias décadas el empleo de polímeros para el mejoramiento de ciertos comportamientos del asfalto, como las deformaciones permanentes, el agrietamiento

térmico, por fatiga y mayor durabilidad de la mezcla en general ha ido ganando terreno a nivel internacional (Walker, 2014). En el Ecuador el empleo de estos modificadores ha sido escaso y es posible que esto se deba a las condiciones del mezclado de los asfaltos con polímeros, donde son usuales las elevadas temperaturas y los prolongados tiempos de mezcla, que sin dudas ocasionan una afectación importante en la calidad de nuestro asfalto. A esta situación debe añadirse los costos de los polímeros. No obstante, a finales de los noventa se construyó el primer tramo experimental de pavimento empleando asfaltos mejorados con polímeros SBS (Vila, 1999) y poco tiempo después se construyeron los carriles exclusivos de la llamada Ecovía, donde se empleó un polímero tipo plastómero. Ambas obras en la ciudad de Quito.

En general los asfaltos modificados se utilizan cuando las necesidades de determinadas propiedades están por encima de aspectos meramente económicos. O sea, que conocer el efecto de los polímeros en el asfalto, al menos los más comunes en el mercado, es interesante y necesario para el país, especialmente ante las nuevas pruebas de calificación Superpave que ya se aplican. (Romaní & Briceño, 2018)

En los últimos años en México el uso de asfalto modificado ha tenido un incremento en la fabricación de mezclas asfálticas, uno de los principales objetivos ha sido desarrollar mezclas asfálticas que cuenten con un grado de desempeño superior a las fabricadas con asfalto convencional, además, que mejoren el comportamiento ante los principales mecanismos de falla de los pavimentos flexibles como son: fatiga y deformación permanente. (Adame et al., 2019)

1.3 Justificación.

El presente trabajo de investigación busca comparar el comportamiento del asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) y convencional con agregados de la ciudad de Tarija y Tupiza, con el fin de brindar una alternativa para la construcción de vías que logre contribuir con el aprovechamiento de estos materiales y adicionalmente, ofrecer una mejora en las propiedades de la mezcla asfáltica, garantizando durabilidad, ya que en el país las vías constituyen uno de los pilares principal para el crecimiento económico y productivo.

Aunque el asfalto modificado de Tipo I (PG76-28) es conocido por su resistencia a las temperaturas extremas, la interacción de este asfalto con los diferentes tipos de agregados

disponibles en estas ciudades aún no se ha estudiado en profundidad. Esta carencia de información genera incertidumbre en la toma de decisiones técnicas, lo que puede resultar en la construcción de pavimentos menos duraderos y eficientes, aumentando los costos asociados a reparaciones y mantenimiento prematuro.

La inversión de los costos de mantenimiento de carreteras que realiza el Gobierno de Bolivia y la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) es una preocupación constante en el país. Por ejemplo, a continuación, se muestran reportes de esto:

- En un artículo según el reporte del 4 de diciembre de 2020, se informó que la ABC garantizó un presupuesto de Bs 46,3 millones para el mantenimiento de las carreteras en Bolivia. Este presupuesto se destina a la reparación de baches, la limpieza de cunetas y la señalización de las carreteras. (“ABC Cuenta Con Bs 46,3 MM Para Mantenimiento de Carreteras,” 2020)
- En un artículo del medio El País reporta que a pesar de que la mayoría de los accidentes son provocados por errores humanos, el mal estado de algunas vías también ha sido un factor. Un dirigente del transporte local mencionó que, en su experiencia, ha habido accidentes por fallas mecánicas y por el mal estado de las carreteras, como en el tramo Isiri-La Central. (“Más Del 90% de Los Accidentes En Tarija Se Da Por Imprudencia,” 2023)
- En un artículo de ABI del 31 de mayo de 2023, se informó que la ABC prioriza la construcción de nuevas carreteras y puentes en el país, con miras a fortalecer el desarrollo nacional y garantizar la vinculación caminera entre departamentos, informó el gerente nacional técnico, Luis Antonio Tejada. (“ABC Prioriza La Construcción de Nuevas Carreteras Para Fortalecer El Desarrollo Nacional,” 2023)
- En un artículo de ANF del 20 de agosto de 2021, se informó que el presidente de Bolivia, Luis Arce, destacó la inversión de Bs 7.000 millones en construcción y mantenimiento de carreteras para la gestión 2021, a través de la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.). (“Presidente Destaca Inversión de Bs 7.000 Millones,” 2021)

1.4 Diseño Teórico.

1.4.1 Planteamiento del problema.

La calidad y durabilidad de las carreteras es un problema crítico al momento de su construcción, debido a que se ven afectadas por variaciones extremas de temperatura y condiciones climáticas variables, lo que puede causar su degradación rápida de las carreteras si no se utilizan los materiales adecuados. Para agravar la situación, la elección y utilización de los materiales de construcción disponibles localmente, como los agregados, no siempre se realiza de manera óptima.

En nuestra actualidad los pavimentos viales se encuentran sometidos a exigencias cada vez mayores, como el incremento de volúmenes de tráfico, cargas más pesadas y mayor presión en los neumáticos, son los que contribuyen a un mayor deterioro en las capas de rodadura, como ser la deformación plástica de la mezcla asfáltica, rotura por diferencias térmicas y/o fatiga, así como el desprendimiento de los agregados. Estos pueden ocasionar diferentes tipos de accidentes de tránsito, por lo que el gobierno y la ABC utilizan cada año altos presupuestos para las frecuentes reparaciones de las capas de rodadura en la red vial del país, siendo una gran inversión económica por parte del estado, lo cual hace la búsqueda de nuevas y mejores alternativas para mejorar lo que es la calidad y durabilidad de las mezclas asfálticas, lo que se ha hecho hasta nuestros tiempos para disminuir tales problemáticas es mediante el empleo de asfalto modificado con polímeros en general y con elastómeros SBS en particular.

1.4.2 Formulación del Problema.

¿Cómo se comportan los diferentes tipos de asfalto convencional y modificado Tipo I (PG 76-28) con los agregados de Tarija y Tupiza?

1.5 Objetivos de la investigación.

1.5.1 Objetivo General:

Estudiar el comportamiento del asfalto convencional y modificado Tipo 1 (PG 76-28) con diferentes tipos de agregados de las ciudades de Tarija y Tupiza, mediante el método Marshall, para determinar su resistencia y deformación.

1.5.2 Objetivos Específicos:

- Caracterizar, mediante ensayos de laboratorio, los materiales que componen las mezclas asfálticas, verificando que cumplan con lo establecido en la normativa.
- Diseñar las mezclas asfálticas con cemento asfáltico convencional y cemento asfáltico modificado, empleando la metodología Marshall en mezclas asfálticas en caliente.
- Realizar pruebas para obtener las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas con asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) y asfalto convencional.
- Construir los gráficos de densidad, % vacíos de la mezcla, % VAM, % VFA, estabilidad y fluencia de acuerdo a cada uno de los porcentajes de cemento asfáltico.
- Comparar la resistencia y deformación de las mezclas asfálticas con asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) frente a las mezclas con asfalto convencional.
- Estimar los precios unitarios de mezclas asfálticas con asfalto modificado (PG 76-28) en comparación con el asfalto convencional.

1.6 Hipótesis.

Si elaboramos las mezclas de asfaltos modificados Tipo I (PG 76-28) con los agregados de Tarija y Tupiza, entonces se podrá obtener una mezcla asfáltica optimizada en sus propiedades de resistencia y estabilidad en relación al tráfico para su comparación con las mezclas asfálticas convencionales.

1.7 Definición de las variables independientes y dependientes.

1.7.1 Variable Independiente:

- **Tipo de asfalto.** En este caso, se considerará dos tipos de asfalto, ya que se están analizando el comportamiento del asfalto convencional y el asfalto modificado de PG (76-28).
- **Tipo de agregado.** Esta es la segunda variable independiente en el estudio, ya que se están comparando diferentes tipos de agregados disponibles en las ciudades de Tarija y Tupiza.

1.7.2 Variable Dependiente:

- **Mezcla asfáltica Convencional.** Incluye aspectos como contenido de asfalto, vacíos en la mezcla, densidad, estabilidad, flujo y costo, utilizando agregados provenientes de las ciudades de Tarija y Tupiza.
- **Mezcla asfáltica Modificada de Tipo I (PG 76-28).** Ésta es la principal variable dependiente que se está estudiando. Incluye aspectos como contenido de asfalto, vacíos en la mezcla, densidad, estabilidad, flujo y costo, utilizando agregados provenientes de las ciudades de Tarija y Tupiza.

Tabla.1. Operacionalización de variables.

Variablen	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos	Escala de Medición
Variable Independiente	Tipo de asfalto	- Asfalto convencional - Asfalto modificado PG 76-28	Especificaciones técnicas Caracterización del asfalto	Nominal (Convencional / Modificado PG 76-28)
	Tipo de agregado	- Agregados de Tarija - Agregados de Tupiza	Especificaciones técnicas Caracterización de los agregados	Nominal (Tarija / Tupiza)
Variable Dependiente	Mezcla asfáltica Convencional	- Contenido de asfalto - Vacíos en la mezcla - Densidad - Estabilidad - Flujo - Costo	Pruebas Marshall Ensayos de laboratorio Cotizaciones	Intervalo (valores medidos en ensayos)
	Mezcla asfáltica Modificada PG 76-28	- Contenido de asfalto - Vacíos en la mezcla - Densidad - Estabilidad - Flujo - Costo	Pruebas Marshall Ensayos de laboratorio Cotizaciones	Intervalo (valores medidos en ensayos)

Fuente: Elaboración Propia

1.8 Diseño Metodológico.

1.8.1 Componentes.

1.8.1.1 Unidades de estudio y decisión muestral.

Unidad de estudio: Mezclas asfálticas.

Población: Mezclas asfálticas calientes.

Muestra: Mezclas asfálticas calientes diseñadas con asfaltos modificados TIPO I (PG 76-28).

Muestreo: Se dispondrá de dos modelos de mezclas asfálticas para evaluar su comportamiento. La primera mezcla que será la mezcla convencional. La segunda mezcla, la cual estará sometida a estudio, es la que determinará el comportamiento de la mezcla asfáltica caliente diseñadas con asfaltos modificados TIPO I (PG 76-28).

Para la investigación se disponen de tres tipos de áridos:

Agregado Grueso: Obtenido de la planta productora de agregados (Los gobiernos Municipales de Tarija y Tupiza).

Agregado Fino: Obtenido de la planta productora de agregados (Gobierno Municipal Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija y de la ciudad de Tupiza).

Filler: Es un material en polvo que se utiliza en la construcción, especialmente en la fabricación de mezclas asfálticas, su función principal es llenar los espacios vacíos entre los agregados, mejorando así las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto

1.8.2 Por el enfoque de investigación.

1.8.2.1 Enfoque Cuantitativo.

Objetivo: Medir y analizar variables numéricas para establecer relaciones causales, patrones o tendencias. Se enfoca en la objetividad y la generalización.

Métodos: Utiliza encuestas, experimentos, análisis estadísticos y recolección de datos numéricos. Los datos son estructurados y se presentan en forma de gráficos o tablas.

Análisis: Se realiza de manera deductiva, probando hipótesis a través de métodos estadísticos que permiten hacer inferencias sobre una población más amplia.

Resultados: Proporciona conclusiones que pueden ser generalizadas a partir de una muestra representativa, permitiendo hacer predicciones y recomendaciones basadas en datos cuantificables.

1.8.3 Nivel del tipo de Investigación.

1.8.3.1 Investigación descriptiva.

La investigación descriptiva busca describir las características de un fenómeno o población específica sin entrar en causas o efectos.

Características:

- Proporciona un panorama detallado sobre el objeto de estudio, incluyendo sus propiedades y relaciones.
- Utiliza métodos cuantitativos y cualitativos para recolectar datos.
- Incluyen encuestas que miden actitudes o comportamientos.

1.8.3.2 Investigación Explicativa.

La investigación explicativa se centra en determinar las causas y efectos de un fenómeno. Busca responder al "por qué" y "cómo" de los eventos.

Características:

- Utiliza diseños experimentales o correlacionales para establecer relaciones causales.
- Implica un análisis más profundo que la investigación descriptiva, buscando explicar los mecanismos detrás de los fenómenos observados.

1.8.4 Diseño de la Investigación.

1.8.4.1 Diseño Experimental.

Es cuando el investigador manipula una o más variables (variables independientes) para observar su efecto en otra variable (variable dependiente).

Características:

- Se controlan las condiciones y variables.
- Se suelen hacer en ambientes controlados (como un laboratorio).

- Permite establecer relaciones de causa y efecto.

1.8.5 Métodos y técnicas empleadas.

1.8.5.1 Método Inductivo.

La inducción es un razonamiento que analiza una porción de un todo; parte de lo particular a lo general, es decir, va de lo individual a lo universal.

La característica de este método es que utiliza el razonamiento para obtener conclusiones que parten de hechos particulares, aceptados como válidos para llegar a conclusiones cuya aplicación es de carácter general. El método se inicia con la observación individual de los hechos, se analiza la conducta y características del fenómeno, se hacen comparaciones, experimentos, etc., y se llega a conclusiones universales para postularlas como leyes, principios o fundamentos.

Las reglas del método de inducción son:

Observar cómo ciertos fenómenos están asociados y por inducción intentar descubrir la ley o los principios que permiten dicha asociación.

A partir de la ley anterior, inducir una teoría más abstracta que sea aplicable a fenómenos distintos de los que se partió.

Deducir las consecuencias de la teoría con respecto a esos nuevos fenómenos.

Efectuar observaciones o experimentos para ver si las consecuencias son verificadas por los hechos.

Dicho método considera que entre mayor sea el número de experimentos realizados, mayores serán las probabilidades de que las leyes resulten verídicas.

El método inductivo se puede dividir en los siguientes pasos:

- a) Observación: El primer paso es observar un conjunto de datos. Estos datos pueden ser cualitativos, como las opiniones de las personas, o cuantitativos, como los resultados de un experimento.
- b) Formulación de hipótesis: El segundo paso es formular una hipótesis. Una hipótesis es una posible explicación para los datos observados.
- c) Prueba de la hipótesis: El tercer paso es probar la hipótesis. Esto se puede hacer mediante la recolección de más datos o mediante experimentos.

- d) Conclusión: El cuarto paso es llegar a una conclusión. La conclusión es la teoría o la tesis que se deriva de los datos observados y de la hipótesis probada. (Romero, 2019)

1.8.5.2 Técnicas

Este proyecto aplicará la técnica de muestreo estratificado.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i * \sigma^2}{N(\frac{e}{Z})^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i * \sigma^2}{N}}$$

Donde:

n = Muestra

Z = Valor del nivel de confianza es 1,96 cuando el nivel de confianza es de 95%.(Yurquina, 2024).

$\sigma^2 = 0,10$; Investigaciones que requieran entre 4-6 meses de tiempo. (Yurquina, 2024).

e = El valor de error esta siempre en el orden del 5%. (Yurquina, 2024).

El número de ensayos que se realizarán en todo el estudio es de 140 ensayos.

Este proyecto de investigación será empleado con la metodología experimental, todos los ensayos correspondientes se realizaron en el laboratorio de Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. En la siguiente tabla se detalla el plan de ensayos para la conformación de mezclas asfálticas de acuerdo al manual de ensayos y materiales asfálticos elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.).

Tabla.2. Planilla de muestreo.

ENSAYOS	Tarija	Tupiza	Cantidad de ensayos (Ni)	σ^2	$Ni*\sigma^2$	Ni/Nt	ni	Asumido
Granulometría de áridos.	9	9	18	0.1	1.8	0.0304	3.71	4.00
Desgaste de los ángeles.	6	6	12	0.1	1.2	0.0203	2.47	3.00
Densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.	6	6	12	0.1	1.2	0.0203	2.47	3.00
Densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos.	3	3	6	0.1	0.6	0.0101	1.24	2.00
Densidad de masa (peso unitario) y vacíos del agregado grueso.	12	12	24	0.1	2.4	0.0405	4.95	5.00
Densidad de masa (peso unitario) y vacíos del agregado fino.	6	6	12	0.1	1.2	0.0203	2.47	3.00
Equivalente de arena.	3	3	6	0.1	0.6	0.0101	1.24	2.00
Caracterización de cemento asfáltico								
ENSAYOS	Convencional	Modificado	Cantidad de ensayos (Ni)	σ^2	$Ni*\sigma^2$	Ni/Nt	ni	Asumido
Peso específico	3	3	6	0.1	0.6	0.0101	1.24	2
Penetración	3	3	6	0.1	0.6	0.0101	1.24	2
Punto de ablandamiento	3	3	6	0.1	0.6	0.0101	1.24	2
Ductilidad	3	3	6	0.1	0.6	0.0101	1.24	2
Punto de inflamación	3	3	6	0.1	0.6	0.0101	1.24	2
Película delgada	3	3	6	0.1	0.6	0.0101	1.24	2
Residuo de película delgada	3	3	6	0.1	0.6	0.0101	1.24	2
Propiedades mecánicas								
ENSAYOS	Convencional	Modificado	Cantidad de ensayos (Ni)	σ^2	$Ni*\sigma^2$	Ni/Nt	ni	Asumido
Estabilidad	46	46	92	0.1	9.2	0.1554	18.96	19
Fluencia	46	46	92	0.1	9.2	0.1554	18.96	19
Porcentaje de vacíos de aire	46	46	92	0.1	9.2	0.1554	18.96	19
Porcentaje de vacíos de agregado mineral	46	46	92	0.1	9.2	0.1554	18.96	19
Peso específico	46	46	92	0.1	9.2	0.2235	27.27	28.00
TOTAL			592		59.2			140.00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.3. Plan de ensayos en general

Agregado Grueso
Método para determinar la granulometría (ASTM E 40; AASHTO T27-99; ABC A0506)
Método para determinar el desgaste mediante la Máquina de los Ángeles (ASTM E 131; AASHTO T96-99; ABC A0511)
Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127; AASHTO T85-91; ABC A0519)
Método para determinar la densidad de masa (peso unitario) y vacíos del agregado (ASTM E-30; AASTHO T19M-00; ABC A0518).
Agregado Fino
Método para determinar la granulometría (ASTM E 40; AASHTO T27-99; ABC A0506)
Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D 2419; AASHTO T176-00; ABC A0509)
Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128; AASHTO T84-00; ABC A0520)
Método para determinar la densidad de masa (peso unitario) y vacíos del agregado (ASTM E-30; AASTHO T19M-00; ABC A0518).
Filler
Método para determinar la granulometría de filler. A0502
Método para determinar el peso específico de Filler.
Asfalto convencional
Método para determinar la densidad (ASTM D 71-94; AASHTO T229-97; ABC A0102)
Método de ensayo de penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97; ABC A0103)
Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato anillo y bola (ASTM D 36; AASHTO T53-96; ABC A0110)
Método para determinar la ductilidad (ASTM D-113; AASHTO T51-00; ABC A0105)
Método para determinar los puntos de inflamación y combustión (vaso abierto de Cleveland) (ASTM D1310-01; AASHTO T79-96; ABC A0106)
Método de ensayo de película delgada (ASTM D-1754; AASHTO T179-05; ABC A0119).
Método de ensayo de ductilidad sobre el residuo de película delgada.
Asfalto modificado PG 76-28
Método para determinar la densidad (ASTM D 71-94; AASHTO T229-97; ABC A0102)
Método de ensayo de penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97; ABC A0103)
Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato anillo y bola (ASTM D 36; AASHTO T53-96; ABC A0110)
Método para determinar la ductilidad (ASTM D-113; AASHTO T51-00; ABC A0105)
Método para determinar los puntos de inflamación y combustión (vaso abierto de Cleveland) (ASTM D1310-01; AASHTO T79-96; ABC A0106)
Método de ensayo de película delgada (ASTM D-1754; AASHTO T179-05; ABC A0119).
Método de ensayo de ductilidad sobre el residuo de película delgada.
Diseño Marshall
Preparación de probetas (AASHTO T 245-97). A0608
Método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas. A0606
Método de diseño de Marshall. A0613

Fuente: Elaboración Propia

1.8.6 Alcance de la investigación.

El propósito de esta investigación es estudiar el comportamiento de las mezclas asfálticas, tanto convencionales como modificadas, utilizando diferentes tipos de agregados en las ciudades de Tarija y Tupiza. Se busca determinar cómo estas variables influyen en la estabilidad y deformación de las mezclas a través del método Marshall.

El contexto del estudio se limitó a las áreas urbanas de Tarija y Tupiza, donde este tipo de asfalto modificado es el más adecuado debido a las mismas condiciones climáticas que tienen estas ciudades.

Es importante resaltar que este estudio podría enfrentar limitaciones relacionadas con la variabilidad en la calidad de los agregados disponibles localmente y las condiciones ambientales durante el proceso de mezcla y compactación. Sin embargo, se prevé que los hallazgos sean significativos para mejorar la durabilidad y resistencia de las obras viales en Tarija y Tupiza.

Se llevó a cabo una serie de ensayos para la caracterización de los materiales según la Norma Boliviana del ABC del manual de ensayos de agregados y asfaltos.

Se realizó las mezclas asfálticas con 3 briquetas para cada porcentaje de asfalto 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5%, 7% para obtener el óptimo de mezclas con asfalto convencional y modificado Tipo I (PG 76-28) donde se logró analizar, interpretar y comparar cada una de las propiedades que nos ofrece el método Marshall para estas mezclas asfálticas como ser densidad, porcentaje vacíos de la mezcla, porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM), porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA), estabilidad y fluencia. En particular, se puso un mayor énfasis en los parámetros de estabilidad y fluencia, debido a su relevancia en la resistencia y durabilidad de las mezclas asfálticas. Este estudio permitió una comparación precisa entre los dos tipos de asfalto, destacando las diferencias en su comportamiento y desempeño.

La investigación mostró una comparación de los resultados mediante tablas y graficas de cómo es el comportamiento de los asfaltos convencionales y modificados de Tipo I (PG 76-28) y como este estudio brinda información valiosa sobre el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas en función de los materiales empleados, contribuyendo así a la optimización de técnicas constructivas en la región.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Agregados.

2.1.1 Generalidades.

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en la mezcla y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras viales (Chan, 1993).

2.1.2 Definición.

La designación ASTM D8 define al agregado como “un material granular de composición mineral tal como la arena, escoria o piedra partida, usando con un medio cementante para formar morteros o concretos o solo como capas de bases, balastos de ferrocarriles, etc.”

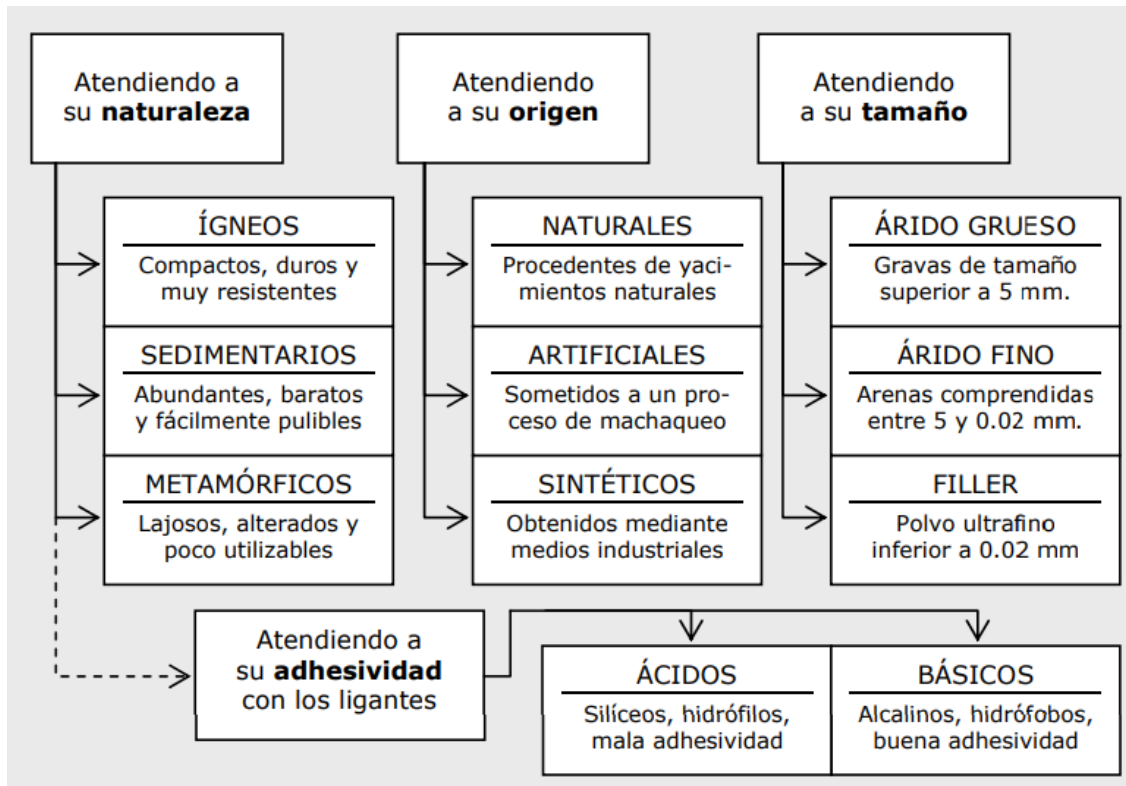
2.1.3 Clasificación de los agregados.

Como agregado mineral para la elaboración de mezclas asfálticas se puede utilizar arenas y gravas naturales procedentes de chancado o trituración. Deben elegirse de acuerdo a su naturaleza, resistencia, forma, absorción del agua, durabilidad, granulometría y otros.

Sin embargo, ésta dependerá de la ubicación de la obra, ya que se tendrá que utilizar el agregado que se encuentra por la zona.

Pueden establecerse diferentes criterios de clasificación de los materiales pétreos atendiendo a distintos aspectos, como su composición mineralógica, su procedencia o el tamaño de sus partículas. La siguiente gráfica resume dichos criterios:

Gráfica 1. Criterios de clasificación de los agregados.



Fuente: Manual de Carreteras, (Bañón & Beviá, 2000)

2.1.3.1 Clasificación de acuerdo a su tamaño.

Genéricamente se los clasifica en agregado grueso y agregado fino, donde:

- **Agregado grueso:** Están compuestos fundamentalmente por gravas. Este tipo de áridos presentan tamaños comprendidos entre 1" y N°4 y conforman el esqueleto mineral en cualquier tipo de mezcla bituminosa.
- **Agregado fino:** Se corresponden con las arenas por lo que se excluyen aquellas partículas que no atraviesen el tamiz de N°4 de la serie. Generalmente se emplean como recebo del árido grueso, de forma que se ocupen los huecos existentes, para hacer la mezcla más compacta.
- **Polvo mineral o filler:** Se define como la fracción mineral que pasa por el tamiz N°200 esta especie de polvillo fino se obtiene como producto residual procedente del lavado de los áridos machacados en las mezclas bituminosas, mejorando ciertos casos sus propiedades reológicas. (Bañón & Beviá, 2000)

Los agregados se clasifican genéricamente en agregado grueso y agregado fino. No obstante, una clasificación más amplia se la muestra en la siguiente tabla:

Tabla.4. *Clasificación por tamaño de los agregados*

Tamaño, pulg (mm)	Nombre	Nombre Genérico	Observaciones
Mayor que 2 1/2	Piedra	Agregado grueso	Agregado para utilizar
2 1/2 a 3/4 (63 a 19)	Grava		
3/4 a N°4 (19 a 4,75)	Gravilla		
N°4 a N°10 (4,75 a 2,00)	Arena gruesa	Agregado fino	
N°10 a N°40 (2,00 a 0,425)	Arena media		
N°40 a N°200 (0,425 a 0,075)	Arena fina		
N°200 a 0,002 (0,075 a 0,002)	Limo Arcilla	Fracción muy fina	Fracción no recomendable
Menor a 0.002 mm			

Fuente: Introducción al diseño de mezclas de hormigón, (Cerruto, 2015)

2.1.3.2 Clasificación respecto a la fuente de origen.

Existen diferentes formas de obtener materias primas para la construcción de carreteras, pudiendo establecerse una clasificación de los áridos en función de su lugar de procedencia:

- **Agregado de canto natural:** Dentro de este grupo se engloban aquellos áridos que se encuentran ya chancados, pudiendo ser directamente empleados tal y como se encuentran en la naturaleza; únicamente es necesario someterlos a un proceso de selección, refinado y clasificación por tamaños. Se hallan en graveras canteras y otro tipo de yacimientos al aire libre, por lo que su extracción es relativamente sencilla.
- **Agregados de trituración o chancado:** Obtenidos a partir de la desintegración de un macizo rocoso, empleando generalmente procedimientos de voladura con explosivos. Necesitan un mayor tratamiento que los anteriores, por lo que es necesario procesarlos en plantas de machaqueo; en ellas, el material es limpiado, chancado, clasificado y almacenado en acopios.
- **Agregados sintéticos industriales** Este grupo lo componen materiales de diversa índole, como productos de desecho o subproductos de procesos industriales,

materiales calcinados, procedentes de la demolición y reciclado de firmes existentes o áridos manufacturados con características mejoradas.

2.1.4 Propiedades de los agregados.

2.1.4.1 Angularidad y textura superficial de las partículas.

El material mineral puede ser triturado o rodado, proporcionando el primero una mezcla más flexible y trabajable, mientras que el segundo imparte cierta rugosidad a la mezcla que dificulta la construcción en obra. En ambos casos, la arena tiene mayor efecto que la grava. El agregado triturado proporciona una mejor trabajabilidad, lo que se refleja en una mayor resistencia a la tracción.

Las partículas de los agregados deben ser cortas y gruesas, libres de cantidades excesivas de piezas en forma de placas o alargadas. Las piezas en forma de astillas, largas, se deben evitar o limitarse a un máximo de 15% en peso del agregado total. Los ensayos de “Angularidad del agregado grueso, caras fracturadas” y “Partículas planas y alargadas” permiten observar estas propiedades de origen. (Neville & Brooks, 2013)

2.1.4.2 Granulometría de los agregados.

Especifica el número de dimensiones diferentes que componen la agregación. La prueba se lleva a cabo pasando una cantidad de agregado a través de una serie de tamices con aberturas progresivamente más pequeñas. Las mallas son cuadradas y están estandarizadas según AASTHO y ASTM E-11 (Sistema Internacional Milimétrico). Se dice que un agregado tiene un tamaño de grano continuo si el agregado tiene una variedad de cortes desde el más grande al más pequeño. Sin embargo, los mejores resultados se obtienen cuando la discontinuidad del tamaño desaparece, no hay agregados de ningún tamaño sin grandes defectos o excesos y la curva adopta una disposición suave y continua.

- **Tamaño del agregado:** Existen dos formas para designar estos tamaños:

a. Tamaño máximo nominal (TMN): Se define como la malla más grande que retiene más del 10% de las partículas de agregado en una serie normal de mallas. Esto significa que la TMN es el tamaño de malla que separa las partículas más grandes de las más pequeñas y es el punto en el que comienza una retención significativa de partículas.

b. Tamaño máximo del agregado (TM): Se define como el tamiz más grande y menor que el tamaño máximo nominal de partícula. Es decir, es el tamiz más pequeño por el que pasan el 100% de las partículas de relleno. Esto significa que todas las partículas del agregado son menores o iguales a este tamaño.

- **Módulo de finura:** Es la suma de los porcentajes retenidos acumulados en tamices de la serie estándar y dividida por 100. Nos da la idea del tamaño medio del agregado utilizando para la mezcla asfáltica.(Apaza, 2022)

2.1.4.3 Capacidad de absorción y pesos específicos del agregado.

Es la capacidad del agregado para absorber agua o asfalto, ya que un agregado poroso requiere más asfalto que un agregado que requiere agregado menos poroso. Si el agregado es altamente absorbente, continuará absorbiendo el asfalto después de la mezcla inicial, reduciendo la cantidad de asfalto que une otras partículas y reduciendo los vacíos de asfalto necesarios para el diseño de la mezcla asfáltica.

El peso específico del agregado, nos permite conocer los volúmenes compactados del agregado, relacionado con el peso unitario permite conocer la capacidad del agregado (contenido de vacíos). Los agregados tienen poros que pueden ser accesibles o inaccesibles. Por lo que no se puede hablar de un solo peso específico del agregado sino de varios.(Apaza, 2022)

- **Porosidad:** La porosidad y la absorción ejercen una gran influencia en la adherencia con el asfalto, por ende, en la durabilidad (congelamiento, deshielo, humedecimiento, secado y otros) así como la resistencia al desgaste o abrasión.
- **Peso específico:** Es la relación de la masa o peso en el aire, de un volumen unitario de un material a la masa, del mismo volumen de agua a temperatura ambiente, los valores obtenidos son adimensionales.
- **Peso específico en estado seco:** Se obtiene dividiendo el peso seco de las partículas entre su volumen, tomando en cuenta en este volumen los huecos accesibles e inaccesibles, pero no los huecos entre partículas.
- **Peso específico saturado superficialmente seco (SSS):** Se obtiene dividiendo el peso en estado SSS de las partículas entre su volumen, tomando en cuenta en este volumen los huecos accesibles e inaccesibles, pero no los huecos entre las partículas.

- **Mínimo de huecos o vacíos entre partículas:** Cuando se combinan agregados, los huecos disminuyen, al añadirse partículas de varios tamaños se reduce el volumen de los huecos. Es conveniente mantener al mínimo el volumen de huecos.

Los ensayos de “peso específico y absorción de agregado grueso” y “peso específico y absorción de agregado fino” nos permiten conocer estas propiedades.

El peso unitario indica el grado de alineación de las partículas. Cuanto menor es el peso unitario, menor es el volumen vacío (volumen aparente) entre las partículas. El peso de una unidad en un determinado estado comprimido le permite convertir peso en volumen y viceversa, existen dos tipos:

- a. **Peso unitario suelto:** Se coloca en estado seco, en un recipiente hasta el tope, luego, se nivela sin ejercer presión alguna.
- b. **Peso unitario compactado:** El material es sometido a compactación modificando el grado de ajuste de las partículas y por ende el peso unitario. Con este valor se determina el volumen absoluto de los agregados.(Apaza, 2022)

2.1.4.4 Resistencia a la abrasión.

La resistencia a la abrasión depende de las propiedades de la roca madre, lo cual es importante si la mezcla continúa desgastándose. Los agregados están sujetos a desgaste abrasivo durante la construcción, colocación y compactación de mezclas de pavimentos asfálticos. Cuando los agregados están en la capa de desgaste, requieren más rigidez que los agregados subyacentes porque resistirán las cargas del tráfico. Por tanto, deben ser capaces de resistir la fragmentación, la degradación y la disolución.

El ensayo de “Desgaste de Los Ángeles” nos permite ver la resistencia del agregado al desgaste y a la abrasión.

2.1.4.5 Resistencia al corte.

Cuando una masa de agregados es cargada, puede generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas se han deslizado o cizalladas unas respecto a otras, lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. En este plano donde las tensiones de corte exceden a la resistencia de corte de la masa de agregados como la resistencia al corte del agregado es de crítica importancia en las mezclas asfálticas en caliente.(Apaza, 2022)

2.1.5 Ensayos y especificaciones técnicas del Agregado.

2.1.5.1 Cuarteo de la muestra (AASTHO T248; ASTM C-702; ABC A0505).

Debido a que las muestras varían en tamaño, es necesario reducir su tamaño o volumen a una muestra representativa para diferentes ensayos.

Debido a que este proceso de reducción puede causar segregación, se debe tener mucho cuidado para mantener la integridad de la muestra. Este método se puede realizar de forma manual y mecánica, para reducir el total del suelo, áridos y áridos minerales. Para obtener mejores resultados, se recomienda utilizar el cuarteador de metal.

- Material y equipo.

- Cuarteador metálico.
- Pala.
- Muestra de agregado.

- Procedimiento.

Para el proyecto se utilizó el cuarteador metálico que está compuesto por una serie de canales o compartimentos de igual tamaño y forma, que están alineados de manera alternada. Cuando se vierte una muestra sobre el cuarteador, los canales guían la muestra hacia diferentes direcciones, dividiendo así la muestra original en dos partes iguales.

1. Se coloca la muestra en un recipiente del cuarteador.
2. Se vacía la muestra en el cuarteador.
3. Se pesa el material correspondiente a un recipiente.
4. Se repite el proceso hasta obtener el peso necesario para el ensayo correspondiente.
5. Si realiza el mismo procedimiento tanto para el agregado fino como grueso.

2.1.5.2 Análisis granulométrico (ASTM E-40; AASHTO T11-96; ABC A0506).

Este ensayo establece el método para tamizar y determinar la granulometría de los agregados tanto finos como gruesos.(ABC, 2010a). El análisis de tamices implica pasar la muestra a través de una serie de tamices con aberturas de tamaños específicos. Estos tamices se identifican según el tamaño de sus aberturas. Las partículas más grandes se retienen en los tamices superiores, las de tamaño medio pasan a través de los tamices intermedios, y las partículas más pequeñas pasan por los tamices inferiores.

La granulometría de los agregados se refiere a la distribución porcentual en masa de los diferentes tamaños de partículas presentes en el material. El porcentaje parcial retenido en un tamiz corresponde a la fracción de material, en masa, que queda directamente retenida en ese elemento de separación. El porcentaje acumulado retenido se obtiene sumando los porcentajes parciales retenidos en esa malla y en las de aberturas mayores, representando el porcentaje en masa de las partículas más grandes que la abertura correspondiente. Por otro lado, el porcentaje acumulado que pasa se calcula como el porcentaje en masa de todas las partículas más pequeñas, restando al 100% el porcentaje acumulado retenido. Los tamices que se utilizaron en la gradación del agregado grueso y fino son:

Tabla.5. Tamices para utilizar en la gradación del agregado grueso y fino.

Agregado grueso.		Agregado fino	
Tamiz (plg)	Abertura (mm)	Tamiz (plg)	Abertura (mm)
1"	25	N°4	4,75
3/4"	19	N°8	2,36
1/2"	12,5	N°10	2
3/8"	9,5	N°30	0,6
N°4	4,75	N°40	0,425
N°8	2,36	N°50	0,3
N°10	2	N°80	0,18
N°30	0,6	N°200	0,075
N°40	0,425		
N°50	0,3		
N°80	0,18		
N°200	0,075		

Fuente: ADMINISTRADORA BOLIVIANA DE CARRETERAS(ABC, 2010)

- **Material y equipo**

- Tamices.
- Recipientes.
- Balanza.
- Brocha.
- Cuchara.

- **Procedimiento**

La muestra cuarteada es lavada y secada a peso constante de 110 +/- 5 °C, se deja enfriar hasta que sea manipulable.

1. Se selecciona un juego de tamices, se ordenan en orden decreciente montados sobre el depósito receptor y provista de su tapa; las muestras finas y gruesas son tamizadas separadamente.
2. Se determina la masa de la muestra a ensayar en estado seco, la vaciamos sobre el tamiz superior y cubrimos con la tapa.
3. Agitamos y movemos cuidadosamente los tamices.
4. Se retira uno por uno los tamices y se coloca el contenido en recipientes cuidándose que no se quede ni una partícula atrapada en los tamices.
5. Se obtiene el peso del contenido en cada tamiz y se procede a registrar los datos.

2.1.5.3 Porcentaje de partículas planas y alargadas (ASSHTO C 142; ASTM D-4791 ABC AO503).

Este ensayo cubre la determinación del contenido de partículas planas y alargadas en los agregados gruesos, limitándose a un máximo de 15%.

El ensayo se basa en considerar como planas y alargadas las partículas cuya longitud excederá en 3 veces su espesor y cuando sea necesario por irregularidad de este, se tomará el promedio de 3 mediciones.

- **Material y equipo**

- Balanza.
- Tamices.
- Recipientes.
- Calibrador
- Horno

- **Procedimiento:**

1. Se pesa una muestra seca y se registra el peso inicial (Pi).
2. Se extiende el contenido en un recipiente, por inspección visual se separan las partículas planas y alargadas en un sector, de las que no tienen forma de partículas planas y alargadas y en otro sector se colocan las partículas que se tengan dudas.

3. Se introduce al calibrador las partículas que fueron seleccionadas como planas y alargadas, para sacar dudas.
4. Pesamos el total de las partículas de cada grupo, registramos datos.

2.1.5.4 Equivalente arena del agregado fino (ASTM D-2419; AASHTO T176-00; ABC A0509).

Este ensayo establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz de 4,75 mm (Nº 4) (ABC, 2010).

- **Material y equipo**

- Muestra de arena (2,0 kg).
- Probeta graduada.
- Solución dispersante (cloruro de calcio anhidrido diluida con agua destilada).
- Embudo.
- Irrigador.
- Tapón o corcho.

- **Procedimiento:**

1. Se coloca la solución disgregante en una probeta hasta el nivel de 100 +/- 5mm.
2. Se llena una medida; se deja que asiente el material golpeando el fondo de la medida contra la mesa de trabajo cuatro veces, enrase y vierta en la probeta.
3. Se golpea firmemente el fondo de la probeta contra la palma de la mano para que salgan todas las burbujas. Dejar en reposo la probeta por 10 minutos.
4. Se coloca el tapón y agitamos la probeta para que suelte la arena. Para agitar la probeta debe estar en posición horizontal y se agita moviendo de forma lineal de un lado al otro durante 30 segundos.
5. Colocamos la probeta en la mesa y lavamos las paredes.
6. Con el irrigador movemos todo el material del fondo de la probeta.
7. Llenamos con la solución a este nivel final de la probeta. Dejamos reposar durante 20 minutos.
8. Se registra el nivel superior de arcilla (Nt) y el nivel superior de arena (Na).

2.1.5.5 Resistencia a la degradación del agregado grueso, por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles (ASTM E-131; AASHTO T96- 99; ABC A0511).

La muestra se selecciona de acuerdo con la tabla siguiente.

Tabla.6. Gradación y peso de la muestra

Tamaño de tamiz				Gradación y peso de la muestra			
Pasa		Retenido		A	B	C	D
38,10 mm	1 1/2 "	25,0 mm	1"	1250+/-25			
25,0 mm	1"	19,0 mm	3/4"	1250+/-25			
19,0 mm	3/4"	12,50 mm	1/2"	1250+/-10	2500+/-10		
12,50 mm	1/2"	9,50 mm	3/8"	1250+/-10	2500+/-10		
9,50 mm	3/8"	6,30 mm	1/4"			2500+/-10	
6,30 mm	1/4"	4,75 mm	Nº 4			2500+/-10	
4,75 mm	Nº 4	2,36 mm	Nº 8				5000+/-10
TOTAL, gramos				5000+/-10	5000+/-10	5000+/-10	5000+/-10
Número de Esferas				12	11	8	6
Nº revoluciones				500	500	500	500
Peso de la Carga				5000	4584	3330	2500

Fuente: Guía de ensayos, (Cerruto, 2015)

Este ensayo evalúa la degradación de los agregados minerales de graduación estándar como resultado de una serie de acciones combinadas, que incluyen abrasión o desgaste, impacto y trituración dentro de un tambor de acero que gira, en el cual se colocan una cantidad específica de esferas de acero. El número de esferas utilizadas varía según la graduación de la muestra que se está probando.

La pérdida de material o desgaste se expresa como un porcentaje que representa la pérdida de peso de la muestra en relación con su peso inicial. Este ensayo proporciona información sobre la resistencia estructural, la dureza y la tenacidad del agregado.

El procedimiento implica colocar la muestra de agregado, preparada según su distribución granulométrica, en una máquina rotatoria junto con las esferas de acero adecuadas para la carga abrasiva requerida, y hacerla girar durante 500 revoluciones.

- **Material y equipo**

- Máquina de Los Ángeles (tambor de acero).
- Tamices.
- Balanza.
- Esferas de acero.
- Horno.
- Muestra de agregado.

- **Procedimiento:**

1. Se pesan los tamaños de las fracciones correspondientes al grado elegido de acuerdo a la tabla 7, anteriormente mostrada.
2. Se coloca la masa inicial en la máquina de Los Ángeles y se ensaya de acuerdo al grado elegido (número de esferas y revoluciones).
3. Una vez completado el número de revoluciones se saca el material de la máquina.
4. Se separa la carga abrasiva del material obtenido en el ensayo.
5. Se tamiza el material en el tamiz N° 8 y N° 12.
6. Se reunirá todo el material retenido en ambos tamices, se lavará y se secará a peso constante en el horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, se dejará enfriar a temperatura ambiente.
7. Se pesa y se registran los datos obtenidos.

2.1.5.6 *Peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM E- 127; AASHTO T85-91; ABC A0519).*

Este ensayo describe los métodos para determinar el peso específico y la absorción del agregado grueso. El peso específico puede expresarse como el peso específico en masa, el peso específico en masa saturado superficialmente seco (SSS), y la absorción se mide con agregados que han sido previamente remojados durante 24 horas. Conocer el peso específico ayuda a calcular los volúmenes compactados del agregado. La absorción está estrechamente relacionada con la porosidad interna de los granos del agregado.

Para realizar el ensayo, se mide el peso de una muestra en condiciones secas y en estado SSS. Luego, se determina su volumen calculando la diferencia entre los pesos de la muestra en el aire y cuando está sumergida en agua. Con estos datos, se calculan los pesos específicos y la absorción de agua.

- **Material y equipo**

- Balanza.
- Canastillo para sumersión.
- Tanque de agua.
- Recipiente.
- Horno.
- Muestra de agregado.

- **Procedimiento:**

1. La muestra limpia seca peso constante el horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, luego se deja enfriar hasta que se pueda manipular.
2. La muestra es sumergida a temperatura ambiente por 24 horas.
3. Se extrae la muestra y se seca superficialmente con un paño.
4. Se determina el peso, posteriormente la muestra se coloca en el canastillo porta muestra a $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 3 minutos. Se anota el dato.
5. Se retira la muestra del canastillo y se seca la muestra peso constante en el horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
6. Se deja enfriar entre una y tres horas, se anota el peso final.

2.1.5.7 *Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM E-128; AASHTO T84-00; ABC A0520).*

Este ensayo describe los procedimientos para determinar el peso específico de la masa, el peso específico en masa saturado superficialmente seco (SSS) o el peso específico aparente. El peso específico en masa SSS y la absorción se obtienen utilizando agregados que han sido remojados en agua durante 24 horas.

Se mide el peso de una muestra en estado seco y en estado SSS, y luego se calcula su volumen mediante el peso del agua desplazada cuando el agregado se sumerge en un matraz aforado. Con estos datos, se calculan los pesos específicos y la absorción de agua. La densidad de masa (peso unitario) y los vacíos del agregado (según la norma ASTM C-29) también se determinan en este ensayo. Este procedimiento evalúa la densidad de masa en condiciones compactadas o sueltas, así como los vacíos presentes en los agregados. El peso unitario en un estado específico de compactación permite convertir el peso en

volumen o viceversa. Al relacionar esto con el peso de la masa, se puede determinar el grado de compacidad o el porcentaje de vacíos en el agregado.

Para obtener el peso unitario, se vierte el agregado en un recipiente con una capacidad volumétrica conocida, se mide el peso del agregado que llena el recipiente y se divide este peso por la capacidad volumétrica del recipiente.

- **Material y equipo**

- Balanza.
- Picnómetro.
- Tamices
- Recipiente
- Horno.
- Muestra de agregado.

- **Procedimiento:**

1. Se elimina el exceso de agua con cuidado para evitar pérdidas, y se revuelve la muestra para garantizar un secado uniforme.
2. Se llena parcialmente el picnómetro con agua y se introducen 500 gramos de agregado fino en condición SSS (Saturado Superficialmente Seco).
3. Se llena el picnómetro hasta dos tercios de su capacidad con agua y se agita suavemente.
4. Se golpea el picnómetro contra la palma de la mano para eliminar todas las burbujas de aire y se deja reposar durante una hora.
5. Se llena el picnómetro completamente con agua hasta su capacidad y se determina el peso total del picnómetro, la muestra y el agua.
6. Se retira el agregado fino del picnómetro, evitando pérdidas, y se seca en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar un peso constante.
7. Se deja enfriar la muestra a temperatura ambiente durante 1 a 2 horas, y finalmente, se registra el peso final.

2.1.5.8 Densidad de masa (peso unitario) y vacíos del agregado (ASTM E-30; AASTHO T19M-00; ABC A0518).

Este ensayo se utiliza para determinar la densidad de masa de los agregados en estado compactado o suelto, así como los vacíos presentes en ellos. El peso unitario en un estado específico de compactación facilita la conversión de peso a volumen o viceversa. Al comparar con el peso de la masa, se puede evaluar el grado de compactación o el porcentaje de vacíos en el agregado.

Para realizar la prueba, se coloca el agregado en un recipiente con una capacidad volumétrica conocida. Luego, se mide el peso del agregado que llena el recipiente y se calcula el peso unitario dividiendo este peso por la capacidad volumétrica del recipiente.

- Material y equipo

- Balanza.
- Pisón.
- Pala o cucharón.
- Recipiente.
- Muestra de agregado.

- Procedimiento:

1. Llenar el recipiente en 3 capas de espesores aproximadamente iguales, dejando en la última un pequeño exceso.
2. Nivelar la superficie con los dedos y compactar cada capa con 25 golpes.
3. Al apisonar la primera capa debe evitarse golpear el fondo, y las otras capas deben comportarse con la fuerza necesaria para penetrar hasta la primera capa.
4. Se tiene que eliminar el exceso empleando una regla.
5. Se termina y se registra el peso en kilogramos del agregado compactado.

2.1.5.9 Determinación del peso específico del filler (ASTM D 854; AASTHO T100).

Cuando el suelo contiene partículas mayores y menores de 5 mm, se realiza una separación utilizando el tamiz de 4,75 mm (Nº 4). Se determina y registra el porcentaje en masa seca de cada fracción. Posteriormente, ambas fracciones se ensayan por separado, aplicando el método correspondiente a cada una. El resultado final se obtiene como el promedio ponderado de los resultados de ambas fracciones.

- **Material y equipo**

- Frasco Volumétrico, con marca de enrase. Con curva de calibración.
- Termómetro con aproximación de 0.01°C.
- Balanza con aproximación de 0.01 o 0.1 gramos
- Accesorios para baño maría.
- Pipeta.
- Hielo
- Muestra de suelo Balanza.

- **Procedimiento:**

1. Pesar 80 gramos de suelo húmedo.
2. Colocar el suelo en un plato, añadir agua y mezclar hasta formar una pasta suave.
3. Colocar dentro del frasco la pasta y batir hasta que se forme una suspensión uniforme.
4. A partir de este punto se repite el proceso usado en los suelos granulares.
5. Una vez obtenidos los tres puntos de pesos específicos hay que vaciar el contenido del frasco dentro de un plato para introducir al horno y obtener el peso del suelo seco (W_s).
6. Llenar el recipiente en 3 capas de espesores aproximadamente iguales, dejando en la última un pequeño exceso.

2.2 Cemento Asfáltico

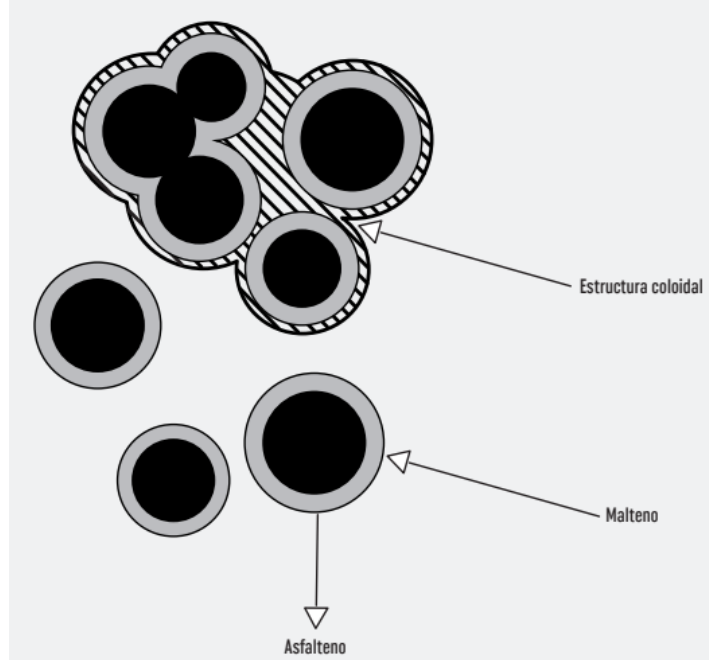
2.2.1 Definición.

El cemento asfáltico es un material derivado del petróleo, está conformado por largas cadenas de hidrocarburos y compuestos inorgánicos. Su comportamiento es viscoso o viscoelástico, dependiendo de la temperatura. A bajas temperaturas, actúa como sólido, pero a medida que la temperatura aumenta, su comportamiento se vuelve líquido. (Villegas et al., 2012)

2.2.2 Composición química del asfalto.

El cemento asfáltico exhibe una distinción fundamental en su composición molecular, dividiéndose en dos grupos claramente diferenciados: máltenos y asfáltenos. Los máltenos son el componente líquido y aceitoso del asfalto; mientras que los asfáltenos, la fracción más pesada, presentándose en estado sólido.

Figura.1. Esquema de estructura coloidal del cemento asfáltico.



Fuente: Tomado de la Introducción a los cementos y ligantes asfálticos: Caracterización reología y producción. (Loría et al., 2023)

En términos de disposición molecular, la teoría predominante es la coloidal (Figura 1), que postula una estructura coloidal para el asfalto, sugiriendo una organización compleja de partículas dispersas en el medio líquido, lo cual influye significativamente en las propiedades y comportamiento del cemento asfáltico en diversas aplicaciones, como la construcción de carreteras y pavimentos.

Desde el punto de vista de su naturaleza, el asfalto es un sistema coloidal de tipo gel, cuya fase continua está constituida por un medio fluido aceitoso, mientras que la fase discontinua se halla compuesta por una micro emulsión de cuatro tipos de compuestos diferentes (Bañón & Beviá, 2000):

- **Máltenos:** Son blandos, ya que contienen la práctica totalidad de la parafina del asfalto, confiriéndole a este ductilidad y plasticidad y proporcionándole estabilidad a temperatura ambiente.
- **Asfáltenos:** Partículas negras y amorfas que por la acción de calor aumentan de volumen, no se funden, transformándose en cabernos y perdiendo sus propiedades

aglomerantes. Son componentes más duros, confiriendo al asfalto estabilidad, cuerpo y adhesividad; también son las responsables de buena parte de sus propiedades reológicas.

2.2.3 Tipología y nomenclatura.

Los cementos asfálticos también reciben el nombre de asfaltos de penetración, debido a que el ensayo de penetración el que los clasifica de forma primaria y establece su nomenclatura en función de dicho ensayo:

$$PEN\ MIN - MAX$$

Donde:

MIN es el valor mínimo tolerable de penetración en decimas de milímetro.

MAX es el valor máximo tolerable de penetración en decimas de milímetro.

En función de su penetración, se clasifican en dos grandes grupos (Bañón & Beviá, 2000):

- **Blandos:** Presentan altos valores de penetración lo que los hace apropiado para zonas cálidas, ya que pierden consistencia a temperaturas relativamente altas. Por otro lado, son idóneos en zonas frías, al no volverse rígidos y quebradizos. De este tipo son 85-100, 150/200, 200/300.
- **Duros:** Al contrario que los anteriores son más consistentes – rígidos y viscosos- a altas temperaturas, por lo que son aptos para su uso en zonas cálidas. En cambio, en climas más fríos tienen un peor comportamiento que los anteriores. A este grupo pertenecen los asfaltos 20-30, 30-50 y 60-70.

2.2.4 Propiedades del cemento asfáltico.

En general, todos los betunes presentan una serie de características físicas comunes, tales como su color oscuro, la facultad de presentar buena adhesividad con la superficie de las partículas minerales o su inmiscibilidad con el agua. (Bañón & Beviá, 2000)

Las propiedades más destacables de los betunes desde el punto de vista técnico de construcción de carreteras son las siguientes:

- **Adhesividad:** Facilidad que presenta el asfalto para adherirse a la superficie de una partícula mineral. Esta característica es muy importante en mezclas asfálticas, donde el asfalto y áridos deben formar un conjunto homogéneo y continuo.

- **Viscosidad:** Se define como la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a los rozamientos internos que ocurren en el seno del fluido.
- **Susceptibilidad térmica:** Indica la propensión que representa el asfalto a variar ciertas propiedades reológicas (especialmente la viscosidad) con la temperatura. Gracias a esta propiedad pueden manejarse con facilidad a altas temperaturas, presentando una mayor estabilidad a temperatura ambiente.
- **Plasticidad:** Define el comportamiento mecánico del asfalto ante diferentes estados físicos y temporales de carga. Un asfalto poco plástico no soportara deformaciones excesivas sin que se produzcan grietas.
- **Envejecimiento:** Fenómeno de degradación y transformación química de los componentes del asfalto debido a la acción oxidante del aire y la presencia de humedad y radiaciones solares, haciendo que el asfalto pierda sus propiedades reológicas y adhesivas.(Bañón & Beviá, 2000).

2.2.5 Ensayos y especificaciones técnicas del cemento asfáltico.

2.2.5.1 Ensayo de peso específico (ASTM D71-94; AASHTO T229-97; ABC A0102)

La densidad de los materiales bituminosos se determina mediante un método diferente al utilizado para otros materiales. La densidad de un material bituminoso se define como la relación entre el peso de un volumen específico del material y el peso de un volumen igual de agua destilada sin gas, con ambos materiales a una temperatura que generalmente es a 25 °C.

- **Material y equipo**
 - Picnómetro de vidrio de 24 a 30 ml.
 - Baño de agua capaz de mantener una temperatura constante de ensayo con una tolerancia de 0,1 °C.
 - Termómetro graduado en 8 °C de 32 °C.
 - Balanza.
 - Agua destilada.
 - Muestra bituminosa.

- **Procedimiento:**

1. Se debe pesar el picnómetro vacío con su tapa teniendo cuidado que esté seco y limpio. Se debe llenar el picnómetro con agua destilada recién hervida, y seguido se sumergió el picnómetro completamente en un baño de agua destilada a una temperatura de 25 °C, por un periodo de 30 minutos, cumplido el tiempo indicado se debe retirar el picnómetro del baño de agua secar superficialmente con un paño y pesarlo.
2. Se debe tener cuidado de no introducir burbujas al momento de colocar el material bituminoso en el picnómetro donde será llenado hasta la mitad. El tapón debe ser firmemente colocado, se debe esperar un cierto tiempo para que la muestra enfríe a temperatura ambiente, y se lo pesa juntamente con el tapón.
3. En el espacio restante del picnómetro se introduce agua destilada recién hervida se coloca el tapón. Se sumerge el picnómetro en el baño de agua destilada recién hervida, manteniendo a 25 °C por un periodo de 30 minutos. Cumplido el tiempo se seca el pino metro para luego ser pesado.

2.2.5.2 Ensayo de penetración (ASTM D-5; AASHTO T49-97; ABC A0103)

Este método se utiliza ampliamente para medir la consistencia o la dureza relativa de los cementos asfálticos en estado sólido o semisólido, así como para clasificar estos materiales. La penetración de un material bituminoso se define como la distancia, medida en décimas de milímetro, que una aguja estándar puede penetrar en una muestra bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura. A medida que el peso específico de un betún asfáltico aumenta y se endurece, su penetración disminuye. Sin embargo, la relación entre estas características varía según el tipo de apuesta.

- **Material y equipo:**

- Penetrómetro, con un peso total con aguja de peso (2,5 gr) de 50 gr y pesas adicionales de 50 y 100 gr, para obtener cargas totales de 100 y 200 gr respectivamente. La tolerancia en los pesos es de más menos 0,05 gr
- Aguja de penetración de acero inoxidable, según AISI 40-C, el extremo inferior tiene el diámetro reducido simétricamente terminado en una punta tronco cónica.

El conjunto de aguja más la cubierta metálica debe tener un peso de 2,5 gr. De largo tendrá 50 mm y de diámetro 1,00 a 1,02 mm.

- Recipiente metálico de dimensiones definidas.
- Baño de agua con capacidad de 10 L y una parrilla perforada situada a 5 cm del fondo, con una temperatura de 25 °C.
- Termómetro graduado.
- Cronómetro.
- Muestra bituminosa.

- **Procedimiento:**

1. Se debe calentar la muestra hasta que se torne fluida, teniendo cuidado de no quemar la muestra. Se debe evitar introducir burbujas al momento de colocar la muestra bituminosa en el recipiente metálico de penetración.
2. Se debe dejar la muestra a temperatura ambiente para que se enfríe por un tiempo de 90 minutos, una vez cumplido el tiempo se debe colocar en el baño maría por un tiempo de 90 minutos, después se debe sacar la muestra para llevarlo al penetrómetro, ésta debe estar en un recipiente con agua, para que no se enfríe bruscamente, una vez instalado el sistema se debe hacer la primera lectura con la ayuda del cronómetro se controlará el tiempo. Por lo menos se debe hacer 3 lecturas.

2.2.5.3 Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D 36; AASHTO T53-96; ABC A0110).

Este método explica cómo determinar el punto de ablandamiento de un material bituminoso dentro del rango de temperaturas de 30 °C a 175 °C. El punto de ablandamiento, conocido como el método del anillo y bola, se refiere a la temperatura registrada cuando una esfera metálica estándar pasa a través de un anillo estándar lleno de material bituminoso y alcanza una placa de referencia después de recorrer una distancia de 25,4 mm, todo bajo condiciones especificadas.

- **Material y equipo:**

- Anillo, de latón.
- Esferas de acero con un peso de 3,50 G.
- Recipiente, vaso precipitado aproximadamente de 300 mililitros.

- Soporte que mantiene fijo a los anillos y al termómetro.
- Termómetro.
- Fuente de calor.
- Vaso precipitado.
- Muestra bituminosa.
- Líquido del baño, etileno glicol, de punto de ebullición entre 193°C a 204 °C.

- **Procedimiento:**

1. Para iniciar, se debe calentar la muestra bituminosa hasta que se encuentre fluida. La placa debe ser superficialmente majada con la amalgama, se colocan los anillos sobre la placa, seguidamente se debe poner dentro los anillos el material bituminoso, teniendo cuidado de no introducir burbujas.
2. Se deja enfriar a temperatura ambiente por un tiempo de 30 minutos y enrazar con una espátula superficialmente caliente.
3. Se debe montar el aparato, colocando las guías de las bolas sobre los anillos he introducido el conjunto en el vaso a una temperatura de 5 °C por unos 15 minutos, después se debe colocar el vaso y el equipo sobre la fuente de calor, si no llegara a cumplir esto se debe regular la fuente de calor, y rápidamente accionar el cronómetro y revisar que suba 20 °C en un minuto si llega a cumplir, se prosigue con el ensayo en caso de que no cumpla se aborta el ensayo.

2.2.5.4 Ensayo de ductilidad (ASTM D-113; AASHTO T51-00; ABC A0105)

La ductilidad de un material bituminoso se define como la distancia en centímetros a la que se rompe bajo condiciones estándar. Se mide el alargamiento máximo, expresado en centímetros, que el betún puede soportar al ser estirado a una temperatura de 25 °C y una velocidad de 5 cm/min. El valor de ductilidad está relacionado con la velocidad de alargamiento; a mayor velocidad, menor adaptabilidad y mayor tendencia a la rotura.

Los materiales bituminosos con alta ductilidad son sensibles a las variaciones de temperatura. La curva de utilidad en función de la temperatura debe estar configurada de manera que el punto máximo de calidad coincida con la temperatura promedio a la cual el material bituminoso estará expuesto.

- **Material y equipo:**

- Molde de latón.
- Placa de latón.
- Baño de agua.
- Termostato.
- Máquina de ensayo ductilímetro.
- Termómetro.
- Horno eléctrico para calentar la muestra.
- Glicerina.
- Talco.
- Material bituminoso.

- **Procedimiento:**

1. Se debe preparar los moles de latón y colocarlo sobre la placa de latón, pero antes ésta debe ser amalgamada con talco y glicerina para evitar que se pegue la muestra.
2. Se calienta la muestra a peso constante en el horno a 110 ± 5 °C y se vierte dentro del molde.
3. Se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos, se enrasa con una espátula caliente y luego se coloca en el baño de agua.
4. El baño de agua debe estar a 25 °C, una vez colocada la muestra se deja reposar durante 85 a 95 minutos.
5. Pasado ese tiempo se levantan los moldes de la placa de latón y se colocan en los anillos de cada extremo de los clips en las clavijas del ductilímetro. Estos se irán separando a velocidad uniforme hasta la ruptura de las viñetas creadas con los moles.
6. Se mide la distancia en centímetros a la que se rompen las briquetas.

2.2.5.5 Ensayo de punto de inflamación y combustión (vaso abierto de Cleveland) (ASTM D1310-01; AASHTO T79-96; ABC A0106).

Este ensayo permite determinar los puntos de inflamación y combustión de los materiales bituminosos. El punto de inflamación es la temperatura más baja a la cual los vapores de la muestra se encienden momentáneamente al pasar una llama piloto. Por otro lado, el

punto de combustión es la temperatura en la que, después de ser encendida por la llama piloto, la muestra sigue ardiendo durante al menos 5 segundos.

- **Material y equipo:**

- Vaso abierto de Cleveland.
- Termómetro.
- Malla.
- Calentador.
- Copa de ensayo
- Aparato sujetador de la copa de ensayo.
- Muestra de cemento asfáltico.

- **Procedimiento:**

1. Se arma el aparato sobre una mesa niveladora, de forma que permita el paso de la llama piloto.
2. Se lava la copa de ensayo y colocamos las muestras hasta el menisco que está en la parte superior.
3. Se aplica calor con la llama piloto, y vamos controlando con el termómetro.
4. Se pasa la llamada a través del centro de la copa una y otra vez.
5. El punto de inflamación es la lectura cuando aparece el destello en cualquier punto de la superficie del material.
6. El punto de combustión es la temperatura en la que se inflama la superficie por 5 segundos como mínimo.
7. Se anotan las temperaturas como datos de ensayo.

2.2.5.6 Ensayo de película delgada (ASTM D1754; AASHTO T179-05; ABC A0119).

El ensayo TFOT (Thin Film Oven Testing) o de película delgada en horno, se utiliza para evaluar el impacto del calor y el aire en los materiales bit.

Este ensayo proporciona una indicación aproximada de la susceptibilidad del material bituminoso a resistirse o perder sus propiedades útiles durante el proceso de mezcla a una temperatura cercana a 150°C. Si la temperatura de mezclado es más baja, el endurecimiento y la disminución de la ductilidad en el mezclador serán menores en comparación con los cambios observados en el horno. Por el contrario, si se utiliza una

temperatura de mezclado más alta, es probable que se produzcan mayores cambios en la dureza y la ductilidad del material.

- **Material y equipo:**

- Horno (ASTM E 145)
- Plato giratorio.
- Termómetro.
- Platos.
- Muestra de cemento asfáltico.

- **Procedimiento**

1. Se calienta la muestra bituminosa.
2. Se pesan los 6 platos sin la muestra, luego se agrega 50 gr de muestra a cada plato.
3. Se calienta el horno a 163 °C, con ayuda del termómetro se controla la temperatura durante el ensayo.
4. Se colocan los platos en el plato giratorio y por 5 horas se mantiene la temperatura.
5. Al concluir el periodo de calentamiento, se retira las muestras del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente.
6. Se pesa cada plato y se anota los valores.
7. Se coloca durante 15 minutos los platos para luego retirar la muestra.
8. La muestra se la coloca en recipientes previamente preparados, con la ayuda de una espátula se raspa.
9. Se calientan estos recipientes nuevamente en el horno, luego de 20 minutos aproximadamente se coloca la muestra en los recipientes de utilidad y penetración.
10. Se realizan los ensayos de penetración y ductilidad por métodos correspondientes.

2.2.5.7 Ensayo de ductilidad sobre el residuo de película delgada

Este ensayo permite determinar la longitud en centímetros, a la cual se alarga una muestra de material bituminoso sometido a desgaste.

- **Material y equipo:**

- Moldes.
- Baño de agua.
- Ductilímetro.
- Termómetro.
- Platos.

- **Procedimiento:**

1. Se preparan los moldes para realizar el ensayo, la placa base se amalgama con una mezcla de talco y glicerina.
2. Se coloca la muestra en los 2 moldes, se deja a temperatura ambiente durante 30 minutos a 40 minutos, luego con una espátula caliente se retira el exceso.
3. Se coloca la placa y los moldes en el baño de agua a 25 °C durante 90 minutos.
4. Pasado este tiempo se coloca los moldes en el ductilímetro, y se inicia el ensayo.
5. Se controla la distancia de rotura hasta que termine el ensayo.

2.2.6 Especificaciones Técnicas.

Para caracterizar el cemento asfáltico, se emplearon las normas de penetración AASHTO M20 y de viscosidad AASHTO M226-80. Los parámetros correspondientes están en las tablas 7 y 8.

En la Tabla 7 se presentan los parámetros definidos por las normas AASHTO y ASTM para clasificar un asfalto convencional según su grado de penetración. En este caso, se trata de un asfalto convencional que corresponde a la categoría 85-100.

En la Tabla 8 se presentan los parámetros definidos por la norma AASTHO para clasificar un asfalto convencional por su grado de viscosidad, en este caso un asfalto convencional 85/100 pertenece a la categoría AC-10.

Tabla.7. Especificación AASHTO M20 por grado de penetración para Cementos Asfálticos

Ensayos	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Penetración, 25° C 100g., 5 segundos [1/10 mm]	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto inflamación, Cleveland, °C	232	-	232	-	232	-	218	-	177	-
Ductilidad (25° C, 5 cm por minuto) [cm]	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-
Solubilidad de tricloroetileno, [%]	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
TFO 3.2 mm, 63° C, 5 horas										
Pérdida por calentamiento, [%]	-	0,8	-	0,8	-	1	-	1,3	-	1,5
Penetración del residuo, [%] del original	58	-	54	-	50	-	46	-	40	-
Ductilidad del residuo a 25°C. 5 cm por min., cm	-	-	50	-	75	-	100	-	100	-

Fuente: Normas AASTHO, Parte I especificaciones,(American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2004)

Tabla.8. Especificación AASTHO M226-80 por grado de viscosidad para Cementos asfálticos

Ensayos	Grado de Viscosidad (ASTM D-3381-09)				
	AC-2,5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-40
Viscosidad, 60° poises	250-50	500±100	1000±200	2000±400	4000±800
Viscosidad 135° Cs-mínima	125	175	250	300	400
Penetración, 25° C 100 g.,5segundos- mínimo	220	140	80	60	40
Punto inflamación, cleveland copa abierta. °C (mínimo)	163(325)	177(350)	219(425)	232(450)	232(450)
Solubilidad en tricloroetileno,[%](mínimo)	99	99	99	99	99
Pruebas sobre el residuo del ensayo TFO:					
Pérdida por calentamiento, por ciento máximo (opcional)	1	1	0,5	0,5	0,5
Viscosidad, 60° C, poises – máximos.	1000	2000	4000	8000	16000
Ductilidad, 25° C, 5 cm por minuto, cm mínimo.	100	100	75	50	25

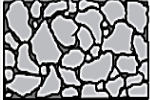
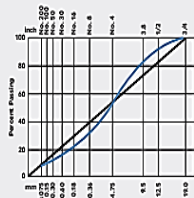
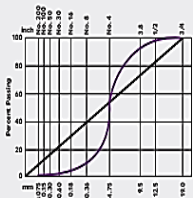
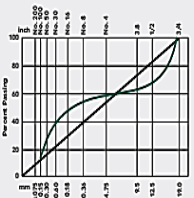
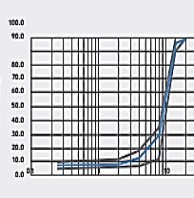
Fuente: Normas AASTHO, Parte I especificaciones,(American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2004)

2.3 Asfalto modificado.

2.3.1 Generalidades.

Actualmente, existe una amplia variedad de mezclas asfálticas que demanda la infraestructura vial y, conforme pasa el tiempo, el uso de los diferentes tipos de mezclas asfálticas requiere diferentes tipos de cementos asfálticos modificados con propiedades particulares y especificaciones prácticamente a la medida.

Gráfica 2. Tipos de mezclas asfálticas en caliente.

	MEZCLA DE GRADACIÓN Densa	MEZCLA DE GRADACIÓN ABIERTA	MEZCLA DE DISCONTINUA (SMA)	OPEN GRADE FRICTION COURSE (OGFC)
ESQUEMA TÍPICO	 Tamaño de partículas distribuidos equitativamente	 Primariamente agregado gruesos con pocos finos	 Agregado de tamaño medio inexistente o reducido	 Agregado grueso principalmente
GRANULOMETRÍA TÍPICA				
USOS:	Usadas exteriormente como una superficie de desgaste	Usadas como una superficie de desgaste o base permeable	Usadas como una superficie de desgaste	Usadas como capa de fricción y base permeable
MÉTODOS DISEÑO	Marshall Hvmm Superpave	FHWA NCAT	Típico Marshall Hvmm Superpave SMA NCAT Europeo	Superpave
% LIGANTE	4.5 - 6.0	Convencionales 5.0 - 7.0 Porosas 6.0 - 9.0	5.0 - 7.0	4.8% - 5.8%
% VACIOS COMPACTADA	6.0 - 8.0	Convencionales 10.0 - 12.0 Porosas 15.0 - 20.0	6.0 - 8.0	>12%
AGREGADOS	Modificados / No modificados	Modificados / No modificados	Modificados / No modificados	Modificados / No modificados + fibra
LIGANTE	Modificados / No modificados	Generalmente modificados	Modificados / No modificados	Modificados

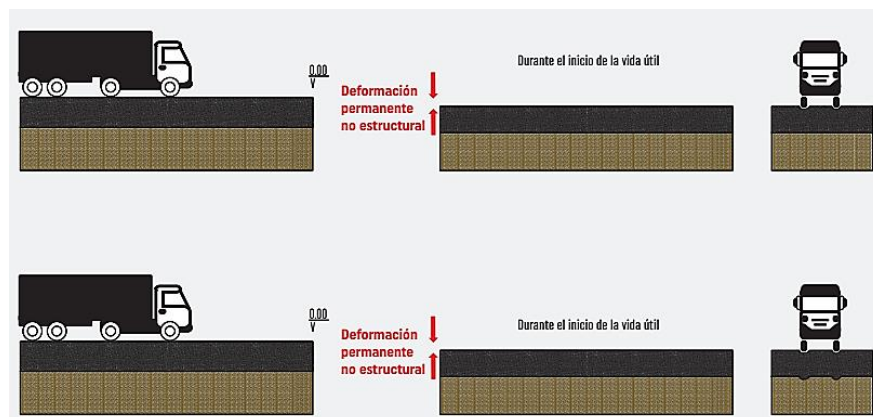
Fuente: Tomado de la Introducción a los cementos y ligantes asfálticos: Caracterización reología y producción. (Loría et al., 2023)

2.3.2 Definición.

El cemento asfáltico modificado busca controlar los mecanismos de deterioro más comunes, como lo son la deformación permanente y el agrietamiento, con el fin de ilustrar de manera muy general estos procesos (Loría et al., 2023), a continuación, se presenta en la gráfica 3.

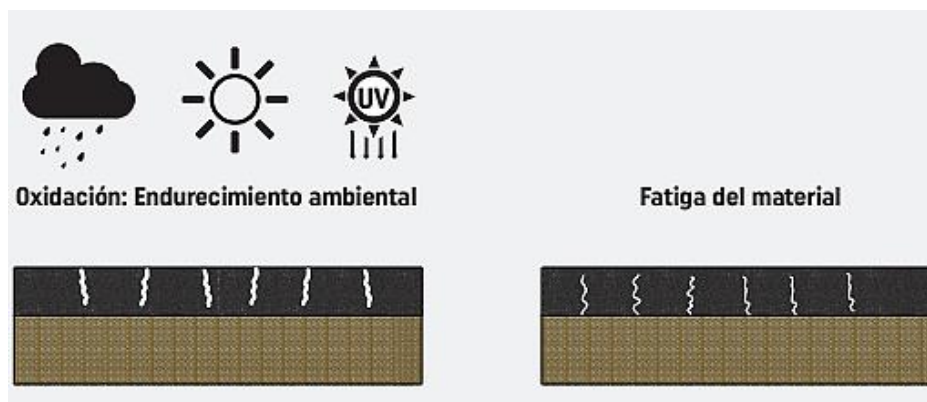
La deformación permanente no estructural se genera por la repetición de cargas ante asfaltos de bajo desempeño; cuando se presenta una deformación estructural permanente, se da por la deformación en todas las capas. El segundo mecanismo de deterioro más común es el agrietamiento, como se puede ver en la gráfica 4. Hay dos tipos de agrietamientos que pueden darse en un pavimento, el primero es el agrietamiento que generalmente se presenta en pavimentos delgados, debido al endurecimiento superficial del asfalto.

Gráfica 3. Deformación permanente.



*Fuente: Tomado de la Introducción a los cementos y ligantes
asfálticos: Caracterización reología y producción. (Loría et al., 2023)*

Gráfica 4. Agrietamiento.



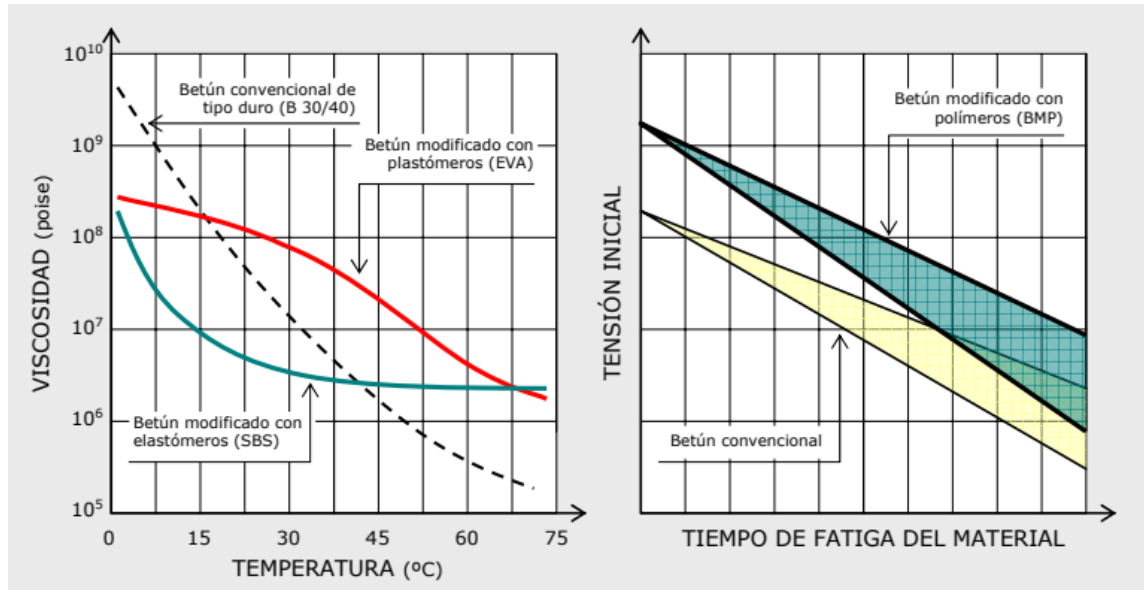
*Fuente: Tomado de la Introducción a los cementos y ligantes
asfálticos: Caracterización reología y producción. (Loría et al., 2023)*

Se caracteriza porque el agrietamiento se presenta de arriba abajo. El segundo tipo de agrietamiento es de abajo hacia arriba y se genera por las cargas de los vehículos y la fatiga del material.

El objetivo de incorporar agentes modificadores al cemento asfáltico es precisamente para controlar los mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos, entendiendo que, si un pavimento que se construye con una mezcla asfáltica y con un cemento asfáltico convencional y está expuesto a condiciones del tiempo muy calientes, altas carga y bajas velocidades, seguramente se va a deformar y agrietar durante su vida útil.

La inclusión de polímeros aumenta el costo inicial del ligante, llegando a alcanzar hasta el doble de valor que otro convencional. Sin embargo, este sobre costo queda ampliamente compensado a lo largo de la vida útil de la carretera, dado que este tipo de ligantes reduce las operaciones de mantenimiento y alarga la vida de servicio del pavimento. Además, con los asfaltos modificados pueden ejecutarse capas de menores espesores que las ordinarias obteniendo unas prestaciones equivalentes, además de una reducción de costos.

Gráfica 5. Diagramas comparativos entre asfaltos convencionales y modificados.



*Fuente: Tomado del Manual de Carreteras, Construcción
Mantenimiento (Bañón & Beviá, 2000)*

2.3.3 Propiedades.

Dependiendo de la fuente de asfalto y las condiciones climáticas promedio, las principales razones para incluir un modificador determinado son las siguientes (Roberts et al., 2009):

- Aumentar la rigidez de la mezcla para minimizar la formación de surcos.
- Suavizar y aumentar la elasticidad de la mezcla para minimizar el agrietamiento.
- Mejorar la resistencia a la fatiga de la mezcla.
- Mejorar la unión del agregado asfáltico para reducir el desprendimiento o la sensibilidad a la humedad.
- Mejorar la resistencia a la abrasión para reducir el deshilachado.
- Rejuvenecer los aglutinantes asfálticos envejecidos.
- Reducir el enrojecimiento o el sangrado.
- Mejorar la resistencia al envejecimiento o la oxidación.
- Reducir el espesor estructural de las capas de pavimento.
- Reducir los costos del ciclo de vida de los pavimentos HMA.
- Mejorar el rendimiento general de los pavimentos HMA.

2.3.4 Tipos de modificadores.

Tabla.9. Aditivos empleados en ligantes modificados.

TIPO DE ADITIVO		EJEMPLOS
POLÍMEROS	Plastómeros	Etileno- acetato de vinilo (EVA)
		Etileno- acetato de metilo (EMA)
		Polietileno (PE)
		Polipropileno (PP)
		Poliestireno (PS)
	Elastómeros termoplásticos	Estireno-butadieno-estireno (SBS)
		Estireno-butadieno (SBR)
		EPDM
		PBD
FIBRAS		Amianto
		Celulosa
		Fibras acrílicas
OTROS PRODUCTOS		Asfaltos naturales
		Caucho natural o reciclado
		Azufre

Fuente: Tomado del Manual de Carreteras, Construcción

Mantenimiento (Bañón & Beviá, 2000)

2.3.4.1 Definición de Polímeros.

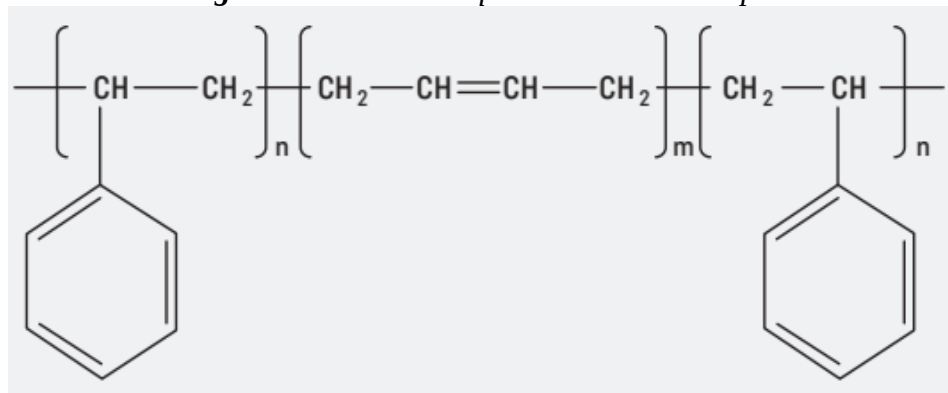
Actualmente, los aditivos poliméricos más comunes son el copolímero de estireno-butadieno-estireno (SBS), SBR y EVA. Los polímeros son macromoléculas que se obtienen mediante la reacción química de muchas moléculas (poli) más pequeñas (monómeros) entre sí para formar cadenas largas o grupos. La secuencia y estructura química de los monómeros determinan las propiedades físicas del polímero resultante. Los copolímeros consisten en una combinación de dos monómeros diferentes que pueden estar en una disposición aleatoria o en bloques. Por ejemplo, el poliestireno es un plástico duro y quebradizo, mientras que el polibutadieno es blando y gomoso; si estos dos monómeros claramente diferentes se mezclan aleatoriamente y reaccionan entre sí, se forma un nuevo polímero llamado co- polímero, con propiedades variables dependiendo de la relación molar de monómeros incorporados en las cadenas.

Los polímeros pueden diseñarse para obtener una amplia gama de propiedades físicas; sin embargo, se pueden dividir en tres categorías generales: fibras, plásticos (plastómeros) y

cauchos (elastómeros). Las divisiones están definidas por las propiedades térmicas y la morfología del polímero. Una fibra será predominantemente cristalina con un alto punto de fusión y una temperatura de transición vítrea modesta. Un plástico es predominantemente amorfo con una Tg (temperatura de transición vítrea, es la temperatura a la que un polímero amorfo cambia de un estado rígido y quebradizo a otro blando y maleable). Es una de las propiedades más importantes de cualquier polímero amorfo superior a su temperatura de uso. Un caucho es amorfo con una Tg muy por debajo de su temperatura de uso; para evitar que las moléculas de caucho, al fluir a temperatura ambiente, el caucho se entrecruza químicamente.

2.3.4.2 Polímeros SBS.

Figura.2. Estructura química lineal de un polímero SBS.



Fuente: Islam, S. et al 2021.

El asfalto modificado del proyecto se encuentra elaborado con copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS) cuya macromolécula está constituida por una sección corta de poliestireno, seguida por otra sección larga de polibutadieno y finalmente por otra sección corta de poliestireno. El poliestireno es un polímero duro y resistente y le da al SBS su durabilidad. El polibutadieno es un material parecido al caucho y le confiere al SBS sus características similares al caucho (SYNTEX ASPHALT S.R.L., 2023)

El copolímero tribloque SBS es un material elastomérico que se entrecruza químicamente; los bloques de poliestireno tienen una Tg superior a la temperatura de uso y sirven como enlaces cruzados. Cuando el material se calienta por encima de la Tg del bloque de poliestireno, el material se convierte en un líquido que fluye libremente y que es fácil de dispersar a las temperaturas de procesamiento del asfalto. La estructura del SBS puede

variar desde una cadena lineal polimérica a una cadena polimérica ramificada, que se designa como copolímero radial. Los copolímeros radiales SBS exhiben menores viscosidades de fusión que los copolímeros SBS lineales y, por lo tanto, permiten temperaturas de procesamiento más bajas.

El SBS es un modificante que se utiliza para dar flexibilidad, suavidad y resistencia al asfalto. También protege el asfalto de los cambios climáticos y los rayos UV y UVA. Además, tiene una mayor resistencia a las deformaciones en comparación con el asfalto convencional; también tiene una alta recuperación elástica.

2.3.5 Tipología y Nomenclatura.

La Gráfica 6 muestra los componentes de la nomenclatura Superpave PG. Las dos primeras letras, PG, significan “Performance Grade”, que en español es “Grado de Desempeño”.

Gráfica 6. Componentes de la nomenclatura Superpave.



*Fuente: Tomado de la Introducción a los cementos y ligantes
asfálticos: Caracterización reología y producción. (Loría et al., 2023)*

El par de dígitos que sigue se refiere a la temperatura alta, en grados Celsius, a la que se espera que el ligante trabaje satisfactoriamente en campo. El siguiente guion, signo negativo, y los últimos dos dígitos se refieren al límite de temperatura baja que se espera que el ligante se desempeñe una vez instalado. Obviamente, estas temperaturas toman en cuenta la variabilidad del clima. En el ejemplo presentado en la Gráfica 6, el ligante se denomina “Pe Ge Sesenta y Cuatro Menos Veintidós”.

2.3.6 Ensayos y especificaciones técnicas del asfalto modificado.

2.3.6.1 Método de ensayo de recuperación elástica para asfaltos modificados (ASTN D6084-06; AASHTO T301-99).

Este método se utiliza en los asfaltos modificados, que comprenden los cementos y emulsiones asfálticas modificadas. El ensayo se efectúa a una temperatura de $13 \pm 0,5$ °C y a una velocidad de 5 cm/min $\pm$ 5%. Para materiales bituminosos el astoméricos se considera una elongación inicial de 20 cm. para la muestra.

2.3.7 Especificaciones Técnicas del Asfalto Tipo I (PG 76-28).

Para realizar la caracterización del cemento asfáltico modificado Tipo I (PG 76-28) se utilizó la especificación proporcionada por la empresa que proporcionó el material, mostrándose en la siguiente tabla:

Tabla.10. Especificaciones de asfalto modificado con polímeros ASPHALT SYNTEX.

CARACTERÍSTICA	Especificación PG 76-28
Origen	
Penetración, 25° C 100g., 5 segundos [1/10 mm]	40-70
Punto de Ablandamiento, °C	mín. 70
Punto inflamación, Cleveland copa abierta. °C	mín. 235
Viscosidad de Brookfield a 135 °C, Spindle 21, a 20 rpm	máx. 3000
Viscosidad de Brookfield a 150 °C, Spindle 21, a 0 rpm	máx. 2000
Viscosidad de Brookfield a 177 °C, Spindle 21, a 100 rpm	máx. 1000
Recuperación Elástica a 25°C, 20cm, %	mín. 90
Después de envejecimiento en horno RTFO	
Porcentaje de Penetración original, %	mín. 70
Variación del punto de ablandamiento, °C	"-3 a +8"
Recuperación Elástica a 25°C, %	mín. 80
Después de envejecimiento de PAV	
Pérdida de masa, %	máx. 1

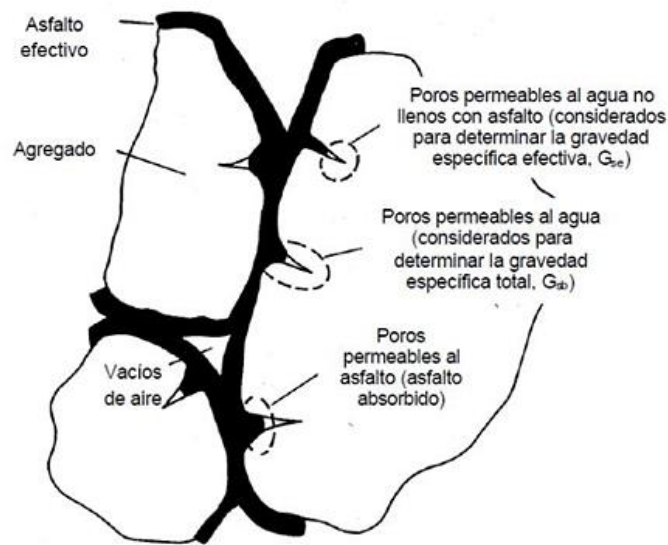
Fuente: (SYNTEX ASPHALT S.R.L., 2023)

2.4 Mezclas asfálticas.

2.4.1 Introducción.

Las mezclas asfálticas asumen un papel muy importante y fundamental en los pavimentos flexibles. Están formadas por una combinación de agregados y asfalto, está constituido aproximadamente por un 90% de agregado grueso finos, un 4% de polvo mineral (filler) y otros 6% de cemento asfáltico, esta mezcla bituminosa debe ser realizada en proporciones exactas, ya que ésta será sometida a un proceso de compactación, que hace que estas mezclas tengan propiedades resistentes al desgaste producido por los vehículos y a su vez pueda traspasar las solicitaciones del peso de ellos hacia abajo absorbiendo una cantidad apreciable de esta solicitación.(Apaza, 2022)

Figura.3. Ilustración de volumen en el agregado mineral



Fuente: Tomada de (Instituto de Asfalto, 1996), Ecuador.

2.4.2 Clasificación y tipología de mezclas asfálticas.

Existente diferentes tipos de mezclas asfálticas, estas se clasifican según las condiciones para las que fueron diseñadas, tomando en cuenta los siguientes parámetros, como se ve en la tabla.

Tabla.11. Clasificación de las mezclas

PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN	TIPOS DE MEZCLAS
Por el árido empleado	Mástic o mástico bituminoso
	Mortero bituminoso
	Hormigón bituminoso
	Macadam bituminoso
Por la Temperatura de puesta en obra	En frío
	En caliente
Porcentajes de vacíos	Mezclas densas
	Mezclas semidensas
	Mezclas gruesas
	Mezclas abiertas
	Mezclas drenantes o porosas
Tamaño máximo del agregado	Mezclas de textura fina
	Mezclas de textura gruesa
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

*Fuente: Tomada del Manual de Carreteras, Construcción
Mantenimiento (Bañón & Beviá, 2000)*

2.4.3 Propiedades de las mezclas asfálticas.

El estudio de su comportamiento reológico ante la aplicación de solicitaciones de diversa magnitud con una frecuencia y velocidad determinadas tiene una gran importancia de cara al análisis de las propiedades mecánicas de estos compuestos. En este sentido, se puede afirmar que las mezclas bituminosas presentan un comportamiento visco-elasto-plástico: elástico para tiempos de aplicación de carga muy pequeños y temperaturas bajas (módulo de elasticidad constante), y viscoplástico para temperaturas y tiempos de aplicación más elevados.

Dado la extraordinariamente compleja reología de este tipo de materiales, existen diversos modelos físico-matemáticos y experimentales que tratan de simplificarla y explicarla, tratando de relacionar deformación con tiempo de aplicación y temperatura (modelos viscoelásticos lineales termorreológicamente simples).

Las principales características exigibles a una mezcla bituminosa son las que a continuación se enumeran (Bañón & Beviá, 2000):

- **Estabilidad:** Es la primera característica que debe tenerse en cuenta en toda mezcla, ya que ésta debe de ser capaz de soportar cargas y de resistir las tensiones sin producir unas deformaciones excesivas. La estabilidad trata de representar la resistencia intrínseca del material, formada por su rozamiento interno y su cohesión.
Existen diversos métodos para evaluar la estabilidad o carga de rotura c una mezcla, la mayoría de ellos de tipo empírico. Destacan el ensay Marshall para mezclas gruesas y el de Hubbard-Field para finas.
- **Resistencia a la deformación plástica:** El comportamiento reológico anteriormente descrito condiciona la acumulación de deformaciones plásticas ante fuertes aplicaciones de carga prolongadas en el tiempo, provocando la fluencia del material (roderas). Una adecuada dosificación de la mezcla -en especial la relación filler/betún- ayuda a paliar este efecto.
- **Fatiga:** La acumulación de procesos de carga/descarga en una determinada sección del firme van provocando una progresiva pérdida de elasticidad y propiedades resistentes, aumentando las deflexiones y produciéndose el agrietamiento del firme.
- **Flexibilidad:** Si las mezclas van a extenderse en capas de reducido espesor total (menor de 10 cm.) o sobre firmes flexibles existentes, deben poseer suficiente flexibilidad para que no se rompan o fisuren con excesiva rapidez, es decir, que su fatiga no sea prematura.
- **Resistencia al deslizamiento:** En el caso de que la mezcla vaya a emplearse como capa de rodadura es fundamental que presente un alto coeficiente de resistencia al deslizamiento, para lo cual deben emplearse áridos angulosos y que den una macrotextura rugosa. En este aspecto, las mezclas porosas drenantes poseen grandes cualidades, generando además un escaso ruido de rodadura.
- **Impermeabilidad:** Otra función comentada hasta la saciedad es la capacidad que debe tener la capa superior del firme de proteger del agua a aquellas que se sitúan por debajo de ella. Las mezclas cerradas son las más impermeables, aunque por otro lado las drenantes canalizan el agua en su interior, suponiendo una solución alternativa siempre que se extiendan sobre otra capa que sí posea propiedades impermeabilizantes.
- **Durabilidad:** La exposición del firme a los distintos agentes meteorológicos radiación solar, agua, hielo, procesos químicos, así como a las propias cargas de tráfico acaban

por causar daños en su textura y estructura. Es lo que se conoce como envejecimiento del firme y acarrea la aparición de deterioros de mayor o menor gravedad, que deben subsanarse mediante las actuaciones de mantenimiento pertinentes.

2.4.4 Relaciones volumétricas y gravimétricas en el diseño de las mezclas asfálticas.

Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de las proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado; o más simplemente, parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. Este capítulo describe el análisis volumétrico de HMA, el cual juega un rol significativo en muchos procedimientos de diseño de mezclas (Anguas et al., 2004).

- Estimación del contenido de vacíos de aire (V_a) en la mezcla.
- Estimación del contenido de vacíos en el agregado mineral (VAM).
- Estimación del contenido de vacíos llenos de asfalto (VFA).
- Estimación del contenido efectivo de asfaltos de la mezcla (P_{eb}).

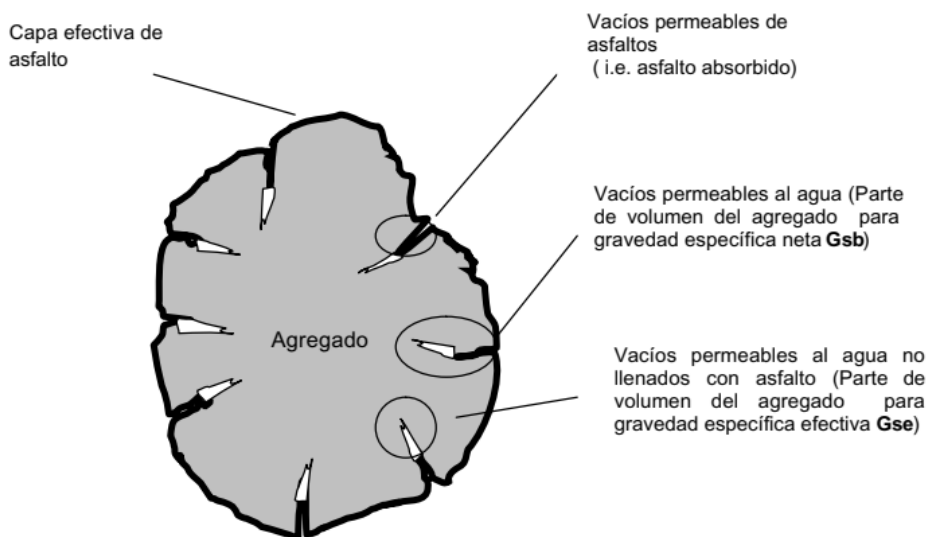
2.4.5 Análisis de pesos específicos en el agregado pétreo.

El coeficiente de absorción de un agregado, varía según su porosidad (absorbe agua y asfalto).

El coeficiente de absorción entre el agua y el asfalto varía con cada agregado. Existe para ello 3 métodos que ayudan a determinar la gravedad específica del agregado.

- **Peso específico neto G_{sb} :** Proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material permeable (incluyendo vacíos permeables e impermeables del material) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.
- **Peso específico aparente G_{sa} :** Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.
- **Peso específico efectivo G_{se} :** Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.

Figura.4. Parámetros de diseño Volumétrico.

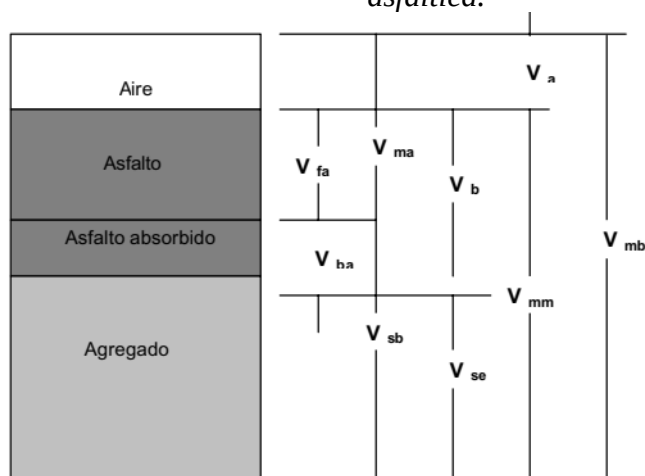


Fuente: Tomada de los Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas, (Anguas et al., 2004)

2.4.6 Análisis de los componentes en la mezcla asfáltica compactada.

Para describir las propiedades de las mezclas asfálticas más el volumen se utilizará el diagrama de componentes. Este considera una muestra compactada, con vacíos de aire, cemento asfáltico y agregado pétreo.

Figura.5. Diagrama de volúmenes de los componentes de una mezcla asfáltica.



Fuente: Tomada de los Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas, (Anguas et al., 2004)

V_{ma} = volumen de vacíos en agregado mineral.

V_{mb} = volumen total de la mezcla asfáltica.

V_{mm} = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos.

V_{fa} = volumen de vacíos llenados con asfalto.

V_a = volumen de vacíos de aire.

V_b = volumen de asfalto.

V_{ba} = volumen de asfalto absorbido.

V_{sb} = volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa).

V_{se} = volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva).

2.4.6.1 *Peso específico neto de la mezcla asfáltica compactada Bulk (ASTM D1188 - D2726).*

Dado que el modelo está hecho de diversos materiales, la gravedad específica de la muestra compactada se denomina gravedad específica neta y representa la densidad de la mezcla asfáltica compactada.

2.4.6.2 *Peso específico teórico máximo “RICE” (G_{mm}) (ASTM D2041).*

En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado, se necesitará la gravedad específica máxima, G_{mm} , para cada contenido de asfalto con el fin de calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto. Mientras que la gravedad específica máxima puede determinarse para cada contenido de asfalto mediante ASTM D 2041/ASSHTO T 209, la precisión del ensayo es mejor cuando la mezcla está cerca del contenido de asfalto de diseño. Además, es preferible medir la gravedad específica máxima por duplicado o triplicado. (Anguas et al., 2004)

2.4.6.3 *Contenido de asfalto “ P_b ”.*

El contenido de asfalto se refiere a la cantidad de masa de ligante asfáltico en la mezcla. Este contenido se puede expresar como un porcentaje de la masa total de la mezcla o como un porcentaje de la masa total del agregado. El contenido óptimo de asfalto en una mezcla depende principalmente de las propiedades del agregado, como la granulometría y la capacidad de absorción.

2.4.6.4 Porcentaje de asfalto efectivo de la mezcla.

El contenido de asfalto efectivo, P_{be} , de una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto, menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y es el contenido de asfalto que gobierna el desempeño de una mezcla asfáltica.

2.4.6.5 Porcentaje de vacíos de aire “VA”.

Los vacíos de aire, VA, en la mezcla asfáltica compactada consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado.

2.4.6.6 Cálculo de vacíos en el agregado mineral “VAM”.

Se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total. El VMA puede calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresado como un porcentaje del volumen mezcla asfáltica compactada. Por lo tanto, el VMA puede estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada. (Anguas et al., 2004)

2.4.6.7 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA).

Corresponde a los huecos en el agregado mineral que están llenos de asfalto.

2.4.6.8 Análisis del método Marshall.

La mezcla asfáltica en caliente preparada en el laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Las cuales se detallan a continuación (Apaza, 2022):

- Densidad:

Se define como su peso por unidad de volumen, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es un factor crucial para garantizar un buen

rendimiento a largo plazo. Si la densidad es baja, habrá más vacíos en la mezcla, lo que la hará susceptible al ingreso de agua. Por el contrario, si la densidad es alta, la cantidad de vacíos será menor y el agua no podrá penetrar, resultando en una capa de rodadura más duradera. La densidad de la muestra compactada se mide en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o en libras por pie cúbico (lb/pie^3), y se calcula multiplicando la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m^3 o 62.416 lb/pie^3).

La densidad estándar obtenida en el laboratorio se utiliza como referencia para evaluar si la densidad del pavimento compactado en el sitio es adecuada. Es raro alcanzar la densidad estándar en las compactaciones realizadas in situ, por lo que las especificaciones permiten un rango aceptable de variación.

- Vacíos en el aire:

En mezclas de asfalto compactadas, los vacíos se refieren a pequeños espacios de aire o bolsas de aire. Es fundamental que las mezclas graduadas contengan un porcentaje específico de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. En laboratorio, el porcentaje de vacíos debe estar entre 3% y 5% para capas de base y superficiales. La permeabilidad de una mezcla asfáltica afecta la durabilidad de un pavimento asfáltico: más permeabilidad, más vacíos y deterioro irreversible; menos permeabilidad, más exudación de asfalto.

La relación entre densidad y contenido de vacíos muestra que, a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos, y viceversa. En campo, las especificaciones de densidad requieren mantener un nivel inferior al 8% de vacíos.

- Vacíos en el agregado mineral VAM:

En una mezcla asfáltica compactada, los espacios de aire se encuentran entre las partículas de agregado y dentro de la propia mezcla. El Vacío Aparente de Mezcla (VAM) es el espacio disponible para acomodar tanto el volumen efectivo de asfalto como el necesario de vacíos en la mezcla. El volumen efectivo de asfalto incluye todo el asfalto menos la parte que se pierde al ser absorbido por el agregado.

Si el VAM es mayor, existe más espacio para una película gruesa de asfalto, lo cual proporciona mayor durabilidad a la mezcla. Debe tenerse en cuenta qué valores mínimos de VAM son recomendados y especificados según el tamaño del agregado. Disminuir los valores de VAM podría resultar perjudicial al reducir la calidad de la carpeta asfáltica,

obteniéndose películas delgadas de asfalto y una mezcla con baja durabilidad y apariencia seca.

- **Contenido de asfalto:**

El contenido de asfalto en una mezcla específica se establece mediante los criterios definidos por el método de diseño seleccionado. La cantidad óptima de asfalto depende en gran medida de la granulometría y capacidad de absorción del agregado. Una granulometría con un alto porcentaje de finos requiere mayor cantidad de asfalto debido al área superficial total aumentada, mientras que mezclas más gruesas necesitan menos asfalto debido a menor área superficial.

Agregando pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado) puede conducir a una absorción excesiva del contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Por otro lado, disminuciones pequeñas de filler pueden generar mezclas muy ricas (húmedas). Estos cambios en el filler afectan las propiedades de la mezcla, cambiándola de seca a húmeda.

El contenido total de asfalto representa la cantidad necesaria para lograr las cualidades deseadas en la mezcla, mientras que el contenido efectivo de asfalto es el volumen no absorbido por el agregado. El contenido efectivo se calcula restando la cantidad absorbida del contenido total. La capacidad de absorción del agregado es un factor clave al determinar el contenido de asfalto en una mezcla.

- **Vacíos llenos de asfalto VFA:**

Son el porcentaje de vacíos intergranular entre las partículas de agregado VAM que se encuentran llenos de asfalto. El VAM abarca asfalto y ahí, por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire del VAM, y luego dividiendo por el VMA, y expresado su valor como un porcentaje (Apaza, 2022).

2.4.7 Mezclas asfálticas convencionales.

2.4.7.1 Introducción.

Estas mezclas no incluyen ninguna modificación en el asfalto ni en la propia mezcla. Este tipo de mezcla está diseñado con materiales pétreos y asfalto convencional, sin ningún tratamiento especial o aditivo para mejorar sus propiedades.

2.4.7.2 Ventajas y desventajas.

Ventajas:

- Más económico en su construcción.
- La baja rugosidad y flexibilidad proporcionan mayor comodidad al usuario.
- Tiene un período de vida útil entre 10 a 15 años, siempre y cuando se mantenga adecuadamente.
- Se mezcla fácilmente tanto en planta como en obra.

Desventajas:

- Las cargas pesadas pueden causar hundimiento, deslizamientos del asfalto, grietas por temperatura, grietas tipo piel de cocodrilo e intemperismo, lo que requiere tratamientos frecuentes con selladores o recubrimientos superficiales.
- Para cumplir con su vida útil, necesita mantenimiento constante.
- Las distancias de frenado son mayores sobre asfalto, especialmente cuando está húmedo.
- Una vez se formen huellas en el pavimento de asfalto, la colocación de una capa de asfalto sobre el pavimento no evitará que vuelva a ocurrir.
- Las huellas aparecen cuando no se logra una compactación adecuada en las huellas dejadas por las ruedas o cuando el asfalto no puede resistir las presiones del neumático y los volúmenes de tráfico.

2.4.8 Mezclas asfálticas con asfaltos modificados.

2.4.8.1 Introducción.

Las mezclas asfálticas en caliente se emplean como capa de rodadura en pavimentos de alto rendimiento, con el objetivo principal de prolongar la vida útil del pavimento, aumentar la resistencia al tráfico y mejorar la comodidad para los usuarios de la vía.

En este proyecto, se analizará la utilización del asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) en las mezclas asfálticas. El estudio se centra principalmente en las capas finales de las secciones de pavimento asfáltico. El propósito es investigar el comportamiento requerido para la capa de rodadura, que es la que se encuentra en contacto con los vehículos y los agentes climáticos, lo cual requiere especificaciones específicas para nuestro país.

2.4.8.2 Ventajas y desventajas.

Ventajas:

- Reducir la formación de grietas debido a las retracciones y contracciones.
- No es corrosivo ni magnético.
- Excelente estabilidad a altas temperaturas.
- Proporciona una capa de rodadura más duradera.
- Mejora el comportamiento ante el agua en acción.
- Mayor vida útil entre 20 y 25 años.
- Mayor resistencia a la ruptura y propagación de fisuras de origen térmico.
- Estabiliza la mezcla asfáltica y evita la disgregación.

Desventajas:

- El costo aumenta debido a la adición de polímeros en comparación con la mezcla convencional.
- Alto contenido de asfalto.
- Es necesario tener cuidado al diseñar la mezcla con adición de asfalto modificado para evitar perjuicios si no se realiza un buen diseño.

2.4.9 Ensayos y especificaciones técnicas del diseño de mezclas asfálticas.

2.4.9.1 Procedimiento para la preparación de las briquetas.

Para obtener el contenido de asfalto óptimo en una mezcla definida mediante el método Marshall, se debe preparar una serie de briquetas con diferentes cantidades de cemento asfáltico. En este proyecto de grado, las briquetas se realizaron con los siguientes porcentajes de asfalto para ambos tipos de mezclas asfálticas: convencionales y modificadas.

- Porcentaje de cemento asfáltico: 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5% y 7,0%.
- La cantidad de material para cada briqueta es de 1200 gramos.
- Los agregados deben estar pesados y separados en diferentes fracciones.
- Las temperaturas de mezclado y compactado se detallan en el capítulo III.
- La briqueta será diseñada para tráfico pesado con un número de 75 golpes en el compactador manual de Marshall.

2.4.9.2 Procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente utilizando el método Marshall (ASTM D-1559; AASTHO T-225; ABC A0613).

Este método implica un proceso especificado para calentar, mezclar y compactar la mezcla de agregados pétreos con cemento asfáltico. Las briquetas cilíndricas normalizadas de 2,5 pulgadas de altura y 4 pulgadas de diámetro se utilizan en este proceso.

El objetivo principal de este método es analizar la densidad, los vacíos y determinar la estabilidad y el flujo de cada briketa elaborada. La estabilidad se define como la carga máxima que puede resistir una briketa normalizada y ensayada bajo las condiciones específicas requeridas por este método. Por otro lado, el flujo se refiere a la deformación total que ocurre en la briketa desde el comienzo hasta la carga máxima durante el ensayo de durabilidad.

- **Material y equipo:**

- Baño para probetas Marshall.
- Molde de compactación con base y collar.
- Pistón de compactación y espátula.
- Base de compactación.
- Compactadora manual para ensayos Marshall.
- Máquina de compresión Marshall.

2.4.9.3 Determinación del peso específico Bulk (ASTM D-1188; AASHTO T166; ABC A0606).

La densidad se realiza cuando las briquetas han alcanzado la temperatura ambiente. Existen dos métodos para realizar este ensayo: cubriendo las briquetas con parafina y sin parafina.

En este trabajo, se utilizará el segundo método, es decir, sin parafina, ya que la mezcla está adecuadamente cerrada y las partículas están muy unidas. Esto permite obtener resultados más precisos en cuanto a la densidad de las briquetas.

- **Material y equipo:**

- Baño de agua.
- Balanza.
- Termómetro.

- Canastillo para la sumersión de la briqueta.

- **Procedimiento.**

Primero, se debe pesar la briqueta al aire, registrar el dato, seguidamente se procede a sumergirla en el baño de agua, se registra el tiempo en cero y a los cuatro minutos, después se la seca superficialmente y se lo pesa. Y es el mismo procedimiento para todas las briquetas.

Ensayo de estabilidad y flujo.

Una vez que se ha determinado la densidad de las briquetas, se realiza el ensayo de estabilidad y flujo. Se introduce a las briquetas en un baño maría a una temperatura de aproximadamente 60 °C durante un período mínimo de 30 minutos y máximo de 40 minutos.

Una vez cumplido el tiempo, se coloca la briqueta en la máquina de compresión Marshall para aplicar una carga constante a las briquetas a una velocidad de 50,8 mm/minuto hasta que se rompa. La carga máxima que soporta la briqueta al momento de romperse se denomina estabilidad Marshall, mientras que la deformación observada desde el comienzo de la carga se llama flujo Marshall.

- **Material y equipo:**

- Baño de agua.
- Termómetro.

- **Procedimiento.**

1. Se sumerge las probetas en el baño de agua caliente a una temperatura de 60°C manteniendo las sumergidas durante un período de tiempo comprendido entre 30 y 40 minutos.
2. Las probetas ensayan aplicando las cargas en sentido diametral por medio de un dispositivo compuesto de 2 mordazas semicirculares. Se lleva el conjunto a la prensa de rotura.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

CAPITULO III

MARCO METODOLOGICO

3.1 Caracterización de los Agregados.

En este capítulo se examinarán los resultados obtenidos en el laboratorio a partir de los ensayos realizados en el agregado, siguiendo las normas establecidas para asegurar su buen desempeño en la mezcla asfáltica.

3.1.1 Fuente de provisión de los agregados.

3.1.1.1 Tarija.

Los agregados que se analizaron para la dosificación de la mezcla, tanto convencional y modificada, fueron grava $\frac{3}{4}$ ", gravilla $\frac{1}{2}$ " y arena natural N°4 obtenida de la gobernación de Tarija.

Figura.6. Acopio del Agregado Tarija



Fuente: Elaboración Propia.

Los agregados que se utilizarán para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente son áridos triturados provenientes de la localidad de La Pintada, ubicada en el sureste de la provincia Cercado del departamento de Tarija, su latitud es $21^{\circ} 36' 27'S$ y su longitud es $64^{\circ} 38'$

37'O los mismos han sido sometidos a procesos de trituración para que cumplan con las especificaciones requeridas.

Los ensayos realizados de caracterización se encuentran resumidos en la Tabla 51.

3.1.1.2 Tupiza.

Los agregados que se analizaron para la dosificación de la mezcla, tanto convencional como modificada, fueron grava de $\frac{3}{4}$ ", gravilla de $\frac{1}{2}$ " y arena chancada N°4, obtenidos de la localidad de Tupiza (Altura de la comunidad de Río Blanco).

Figura.7. Acopio del agregado Tupiza



Fuente: Elaboración Propia. Comunidad de Río Blanco – Tupiza.

Los agregados que se utilizarán para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente son áridos triturados provenientes de la localidad de Río Blanco, ubicada en el norte de la provincia Sud Chichas del municipio de Tupiza, su latitud es 21° 9.524'S y su longitud es 65° 37.965'O los mismos han sido sometidos a procesos de trituración para que cumplan con las especificaciones requeridas.

Los ensayos realizados de caracterización se encuentran resumidos en la Tabla 52.

3.1.2 Elección del agregado.

El agregado proporcionado tiene la siguiente característica:

Tabla.12. Descripción del agregado

TARIJA	Tipo de material	Tamaño máximo nominal (TMN)	Procedencia
	Grava 3/4"	3/4"	Triturado
	Gravilla 1/2"	1/2"	Triturado
	Arena Natural	Nº 4	Natural
TUPIZA	Tipo de material	Tamaño máximo nominal (TMN)	Procedencia
	Grava 3/4"	3/4"	Triturado
	Gravilla 1/2"	1/2"	Triturado
	Arena Natural	Nº 4	Triturado

Fuente: Elaboración Propia.

Los agregados de Tupiza son triturados, a diferencia de los agregados de Tarija, ya que la arena de Tupiza es procesada, mientras que la de Tarija tiene procedencia natural, como se observa en la siguiente figura:

Figura.8. Arena Natural Tarija, Arena Triturada Tupiza



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Hormigón y Resistencia de materiales 2024.

Para el tamaño máximo de un agregado está definido por el tamiz más reducido a través del cual pasa el 100 por ciento del material.

El tamaño máximo nominal está definido por el menor tamiz donde la mayor parte de la muestra de agregado grueso puede pasar, puede retener del 5% al 15% de la masa característica.

Para determinar el tamaño máximo nominal de la Tabla 12 se encuentra calculado en los ensayos y cálculos de granulometría de las Tablas 13, 14, 15, 16, 17 y 18.

3.1.3 Cálculos de los ensayos realizados a los agregados.

3.1.3.1 Cuarteo de la muestra (AASTHO T248; ASTM C-702; ABC A0505).

Este ensayo se utiliza para reducir el tamaño de la muestra con el fin de obtener una muestra representativa que pueda ser utilizada en ensayos posteriores.

De esta manera, se asegura que los resultados obtenidos sean precisos y reflejen adecuadamente las características del material original.

Figura.9. Cuarteo de la Grava



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Hormigón y Resistencia de materiales 2024.

3.1.3.2 Análisis de granulometría (ASTM E-40; AASHTOO T11-96; ABC A0506).

Este ensayo establece la distribución del tamaño de las partículas del agregado grueso y fino mediante el uso de tamices.

Figura.10. Ensayo Granulometría Grueso, Ensayo Granulometría Fino.



Fuente: Elaboración propia; laboratorio de suelos, U.A.J.M.S.

Cálculos.

- Determinar la masa que es retenida por cada tamiz por medio de una balanza.
- Sumar los pesos retenidos en cada tamiz, la suma no debe diferir de la masa inicial registrada, para agregado fino la diferencia no debe ser mayor a 3% y para agregado grueso no debe ser mayor a 5% en caso de no cumplir se debe rechazar el ensayo.
- Calcular el porcentaje acumulado que pasa en cada tamiz.

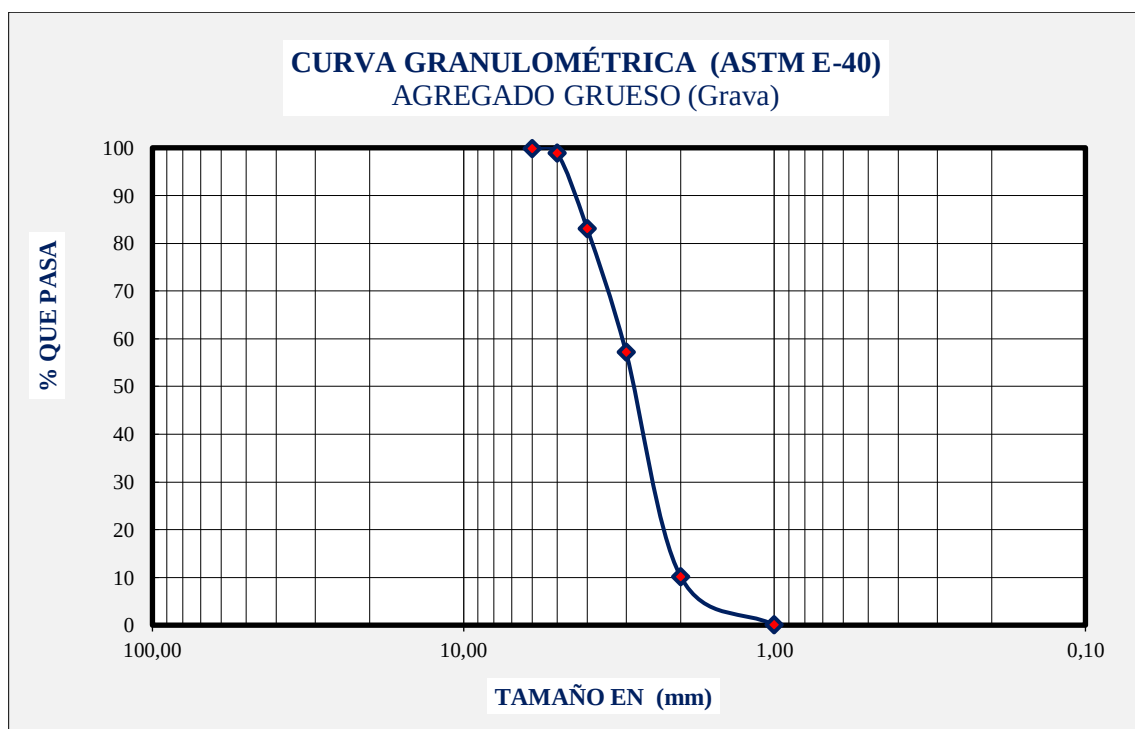
Para la grava:

Tabla.13. Análisis Granulométrico Agregado Grueso – Grava – Tarija.

Peso total(gr.)			5000		
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Retenido Acumulado		% Que pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	del total
1	25.00	0.10	0.10	0.00	100.00
3/4	19.00	505.90	506.00	10.12	89.88
1/2	12.50	2352.50	2858.50	57.17	42.83
3/8	9.50	1294.20	4152.70	83.05	16.95
1/4	6.30	791.80	4944.50	98.89	1.11
Nº4	4.75	47.30	4991.80	99.84	0.16
BASE		8.20	5000.00	100.00	0.00
SUMA =		5000.00	TAMAÑO MAX = 3/4		
PÉRDIDAS =		0.00			
MF =		4.49			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 7. Curva Granulométrica Grava-Tarija.



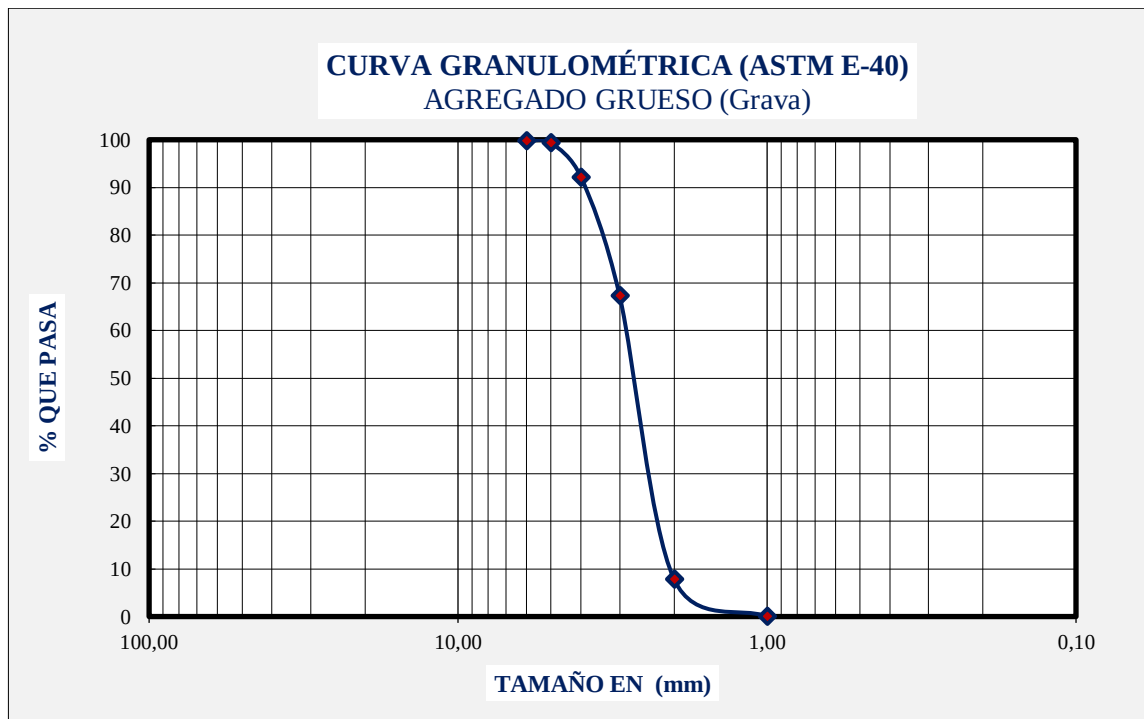
Fuente: Elaboración Propia

Tabla.14. Análisis Granulométrico Agregado Grueso – Grava – Tupiza.

Peso total(gr.)			5000		
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Retenido Acumulado		% Que pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	del total
1	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	19.00	391.40	391.40	7.83	92.17
1/2	12.50	2972.10	3363.50	67.27	32.73
3/8	9.50	1243.70	4607.20	92.14	7.86
1/4	6.30	358.10	4965.30	99.31	0.69
Nº4	4.75	24.00	4989.30	99.79	0.21
BASE		10.70	5000.00	100.00	0.00
SUMA =		5000.00	TAMAÑO MAX = 3/4		
PÉRDIDAS =		0.00			
MF =		4.66			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 8. Curva Granulométrica Grava-Tupiza.



Fuente: Elaboración Propia

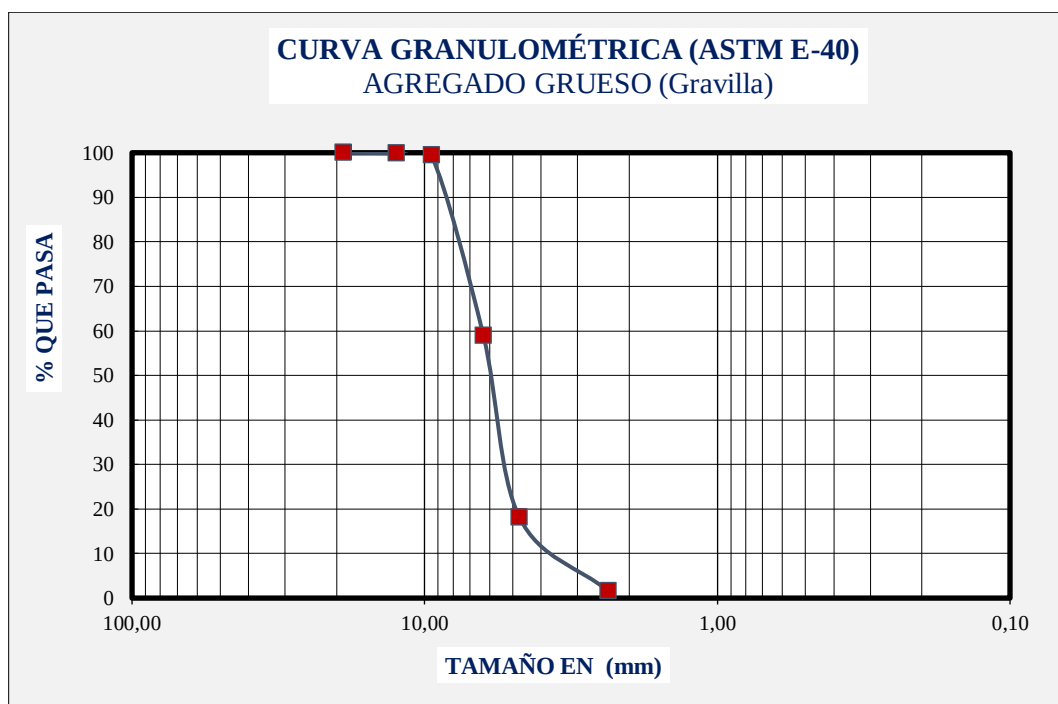
Para la gravilla:

Tabla.15. Análisis Granulométrico Agregado Grueso – Gravilla – Tarija.

Peso total(gr.)		5000			
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Retenido Acumulado		% Que pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	del total
3/4	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2	12.50	7.10	7.10	0.14	99.86
3/8	9.50	18.30	25.40	0.51	99.49
1/4	6.30	2027.70	2053.10	41.06	58.94
Nº4	4.75	2038.10	4091.20	81.82	18.18
Nº8	2.36	829.10	4920.30	98.41	1.59
Nº16	1.18	22.90	4943.20	98.86	1.14
BASE		56.80	5000.00	100.00	0.00
SUMA =		5000.00	TAMAÑO MAX = 1/2		
PÉRDIDAS =		0.00			
MF =		4.21			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 9. Curva Granulométrica Gravilla- Tarija.



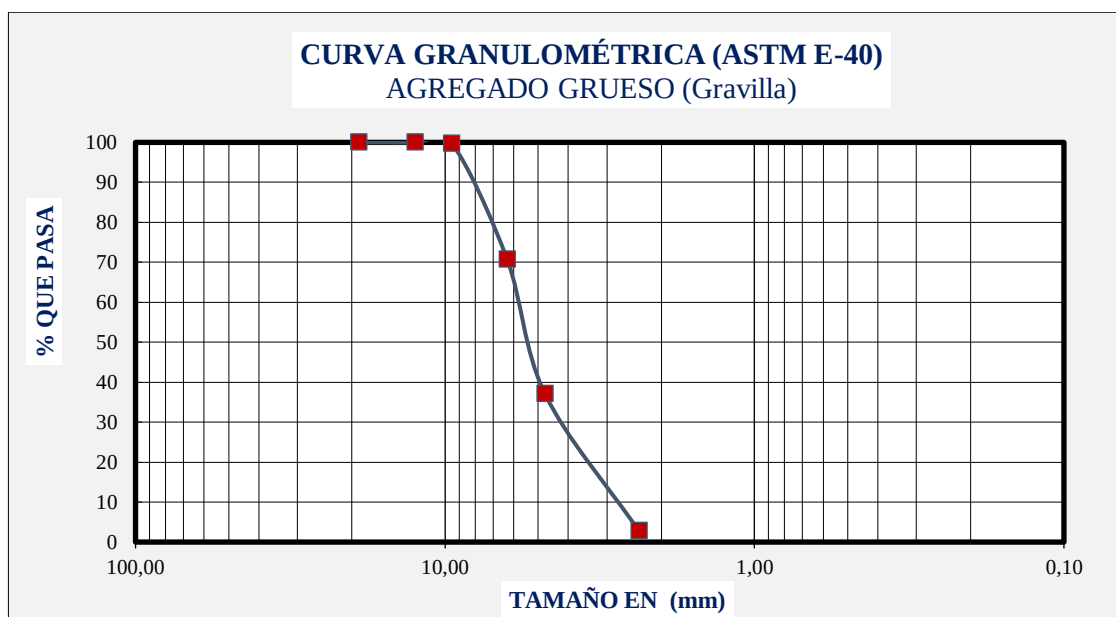
Fuente: Elaboración Propia

Tabla.16. Análisis Granulométrico Agregado Grueso – Gravilla – Tupiza.

Peso total(gr.)			5000		
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Retenido Acumulado		% Que pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	del total
3/4	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2	12.50	3.30	3.30	0.07	99.93
3/8	9.50	12.10	15.40	0.31	99.69
1/4	6.30	1446.70	1462.10	29.24	70.76
Nº4	4.75	1686.30	3148.40	62.97	37.03
Nº8	2.36	1715.50	4863.90	97.28	2.72
Nº16	1.18	127.70	4991.60	99.83	0.17
BASE		8.40	5000.00	100.00	0.00
SUMA =		5000.00	TAMAÑO MAX = 1/2		
PÉRDIDAS =		0.00			
MF =		3.90			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 10. Curva Granulométrica Gravilla-Tupiza.



Fuente: Elaboración Propia

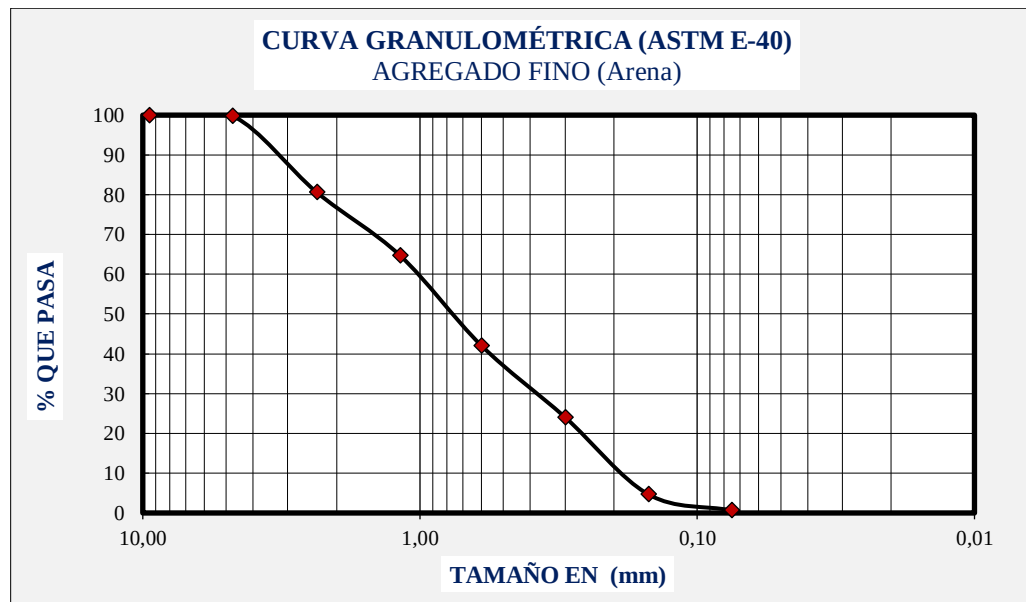
Para la arena:

Tabla.17. Análisis Granulométrico Agregado Fino – Arena – Tarija.

Peso total(gr.)			500		
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Retenido Acumulado		% Que pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	del total
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	1.00	1.00	0.20	99.80
Nº8	2.36	95.90	96.90	19.38	80.62
Nº16	1.18	79.60	176.50	35.30	64.70
Nº30	0.60	113.30	289.80	57.96	42.04
Nº 50	0.30	89.80	379.60	75.92	24.08
Nº100	0.15	97.00	476.60	95.32	4.68
Nº200	0.0750	20.20	496.80	99.36	0.64
BASE	-	3.20	500.00	100.00	0.00
SUMA =		500.00	TAMAÑO MAX = Nº4		
PÉRDIDAS =		0.00			
MF =		4.83			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 11. Curva Granulométrica Arena- Tarija.



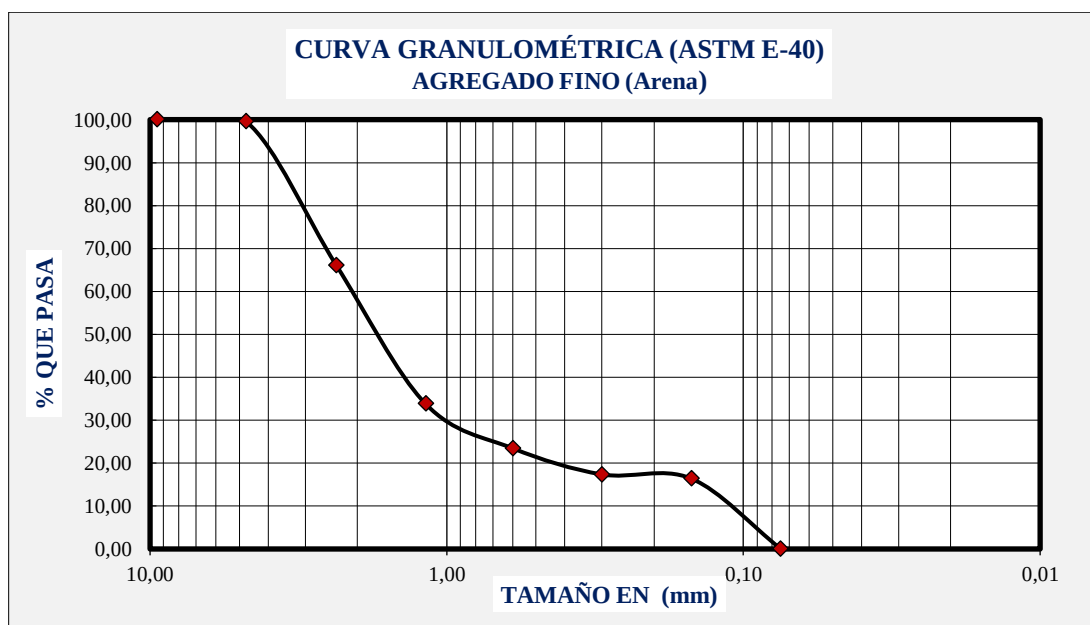
Fuente: Elaboración Propia

Tabla.18. Análisis Granulométrico Agregado Fino – Arena – Tupiza.

Peso total(gr.)			500		
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Retenido Acumulado		% Que pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	del total
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	2.10	2.10	0.42	99.58
Nº8	2.36	167.20	169.30	33.86	66.14
Nº16	1.18	161.50	330.80	66.16	33.84
Nº30	0.60	51.90	382.70	76.54	23.46
Nº 50	0.30	30.50	413.20	82.64	17.36
Nº100	0.15	4.80	418.00	83.60	16.40
Nº200	0.0750	81.60	499.60	99.92	0.08
BASE	-	0.40	500.00	100.00	0.00
SUMA =		500.00	TAMAÑO MAX = Nº4		
PÉRDIDAS =		0.00			
MF =		5.43			

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 12. Curva Granulométrica Arena-Tupiza.



Fuente: Elaboración Propia

3.1.3.3 Porcentaje de partículas planas y alargadas (ASSHTO C 142; ASTM D-4791 ABC AO503).

El porcentaje de partículas planas y alargadas en agregados gruesos es un criterio importante para asegurar la calidad y el desempeño de las mezclas asfálticas.

Figura.11. Ensayo de partículas planas y alargadas.



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Hormigón y Resistencia de materiales 2024.

Cálculos

$$IP_i = \frac{M_{Pi}}{M_{Ii}} \times 100$$

Donde:

IP_i = Índice de partículas de la fracción i (%).

M_{Pi} = Masa de material que pasa por la abertura del calibrador para la fracción i (g).

M_{Ii} = Masa total de ensaye de la fracción i (g).

Tabla.19. Índice de Partículas Planas y Alargadas Agregado Grueso - Grava -Tarija.

MASA INICIAL DE LA MUESTRA	5000 [g]				
Cápsula	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"
Masa total de cada fracción [g]	0	87.3	462.5	2273.3	1223.3
Retenido parcial [%]	0.00	1.75	9.25	45.47	24.47
Masa individual de planas y alargadas [g]	0	104.2	448.8	539.1	125.00
Masa individual de ni planas ni alargadas [g]	0	720	1740	365	755
Porcentaje de las partículas planas y alargadas por tamiz de la muestra [%]	0.00	119.36	97.04	23.71	10.22
Porcentaje de las partículas planas y alargadas por tamiz ponderado a la granulometría [%]	0.00	2.08	8.98	10.78	2.50
Σ PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS	24.34				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.20. Índice de Partículas Planas y Alargadas Agregado Grueso - Grava -Tupiza.

MASA INICIAL DE LA MUESTRA	5000 [g]				
Cápsula	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"
Peso Tamiz	1087.3	1102.3	1053.1	1054.9	1011.9
Peso Tamiz + Retenido	1087.3	1299.7	4256.7	2135.6	1448.5
Masa total de cada fracción [g]	0	197.4	3203.6	1080.7	436.6
Retenido parcial [%]	0.00	3.95	64.07	21.61	8.73
Masa individual de planas y alargadas [g]	0	77.5	400.3	155	336.60
Masa individual de ni planas ni alargadas [g]	0	119.9	2803.3	925.7	100
Porcentaje de las partículas planas y alargadas por tamiz de la muestra [%]	0.00	39.26	12.50	14.34	77.10
Porcentaje de las partículas planas y alargadas por tamiz ponderado a la granulometría [%]	0.00	1.55	8.01	3.10	6.73
Σ PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS	19.39				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.21. Índice de Partículas Planas y Alargadas Agregado Grueso - Gravilla -Tarija.

MASA INICIAL DE LA MUESTRA	5000 [g]				
Cápsula	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"
Masa total de cada fracción [g]	0	0	0	30.6	2403.9
Retenido parcial [%]	0.00	0.00	0.00	0.61	48.08
Masa individual de planas y alargadas [g]	0	0	0	10.2	478.40
Masa individual de ni planas ni alargadas [g]	0	0	0	20.4	1925.50
Porcentaje de las partículas planas y alargadas por tamiz de la muestra [%]	0.00	0.00	0.00	33.33	19.90
Porcentaje de las partículas planas y alargadas por tamiz ponderado a la granulometría [%]	0.00	0.00	0.00	0.20	9.57
Σ PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS	9.77				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.22. Índice de Partículas Planas y Alargadas Agregado Grueso -
Gravilla -Tupiza.

MASA INICIAL DE LA MUESTRA	5000 [g]				
Cápsula	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"
Peso Tamiz	1087.3	1102.3	1053.1	1054.9	1011.9
Peso Tamiz + Retenido	1087.3	1102.3	1178.6	1199	3332.8
Masa total de cada fracción [g]	0	0	125.5	144.1	2320.9
Retenido parcial [%]	0.00	0.00	2.51	2.88	46.42
Masa individual de planas y alargadas [g]	0	0	37.85	18.52	342.70
Masa individual de ni planas ni alargadas [g]	0	0	87.65	125.58	1978.2
Porcentaje de las partículas planas y alargadas por tamiz de la muestra [%]	0.00	0.00	30.16	12.85	14.77
Porcentaje de las partículas planas y alargadas por tamiz ponderado a la granulometría [%]	0.00	0.00	0.76	0.37	6.85
Σ PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS	7.98				

Fuente: Elaboración Propia

3.1.3.4 Equivalente arena del agregado fino (ASTM D2419; AASHTO T176; ABC A0509).

Es un método ágil que permite detectar la presencia o ausencia de partículas finas que podrían ser dañinas para la estructura de un pavimento. Este procedimiento es fundamental para asegurar la calidad y durabilidad del pavimento, ya que la presencia de finos en exceso puede afectar negativamente su estabilidad y resistencia.

Cálculos

$$\text{Equivalente arena} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

Tabla.23. Resumen ensayo de Equivalente Arena Tarija (Pintada)

N° de Muestra	H1 (cm)	H2 (cm)	Equivalente de Arena (%)
1	9.60	10.50	91.43
2	9.80	10.20	96.08
3	9.80	10.70	91.59
Promedio			93.03

$$E.A. = \frac{H_1}{H_2} * 100$$

Equivalente de Arena (%)	NORMA
93.03	> 90%

Fuente: Elaboración Propia

93.03% > 90% (ASTM D2419)

Tabla.24. Resumen ensayo de Equivalente Arena Tupiza (Río Blanco)

N° de Muestra	H1 (cm)	H2 (cm)	Equivalente de Arena (%)
1	9.90	10.80	91.67
2	10.30	11.00	93.64
3	10.10	10.90	92.66
	Promedio		92.65

Equivalente de Arena (%)	NORMA
92.65	> 90%

Fuente: Elaboración Propia

92.65% > 90% (ASTM D2419)

Figura.12. Ensayo Equivalente arena.



Fuente: Elaboración Propia, laboratorio de asfaltos 2024.

3.1.3.5 Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los ángeles (ASTM E131; AASHTO T96, ABC A0511).

Este ensayo nos determina la resistencia a la abrasión de los agregados gruesos grava y gravilla por medio de la máquina de los ángeles.

Figura.13. Ensayo desgaste de los ángeles.



Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de Hormigón y Resistencia de materiales 2024.

Cálculos

Para calcular el desgaste se tiene la siguiente ecuación:

$$P_a = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Donde:

P_a = Porcentaje de pérdida de peso de la muestra (%).

P_i = Peso inicial de la muestra de ensayo (gr).

P_f = Peso final, retenido en el tamiz de 1,7 mm (N-12) (gr).

Para el ensayo se deberá identificar el grado a que pertenece la grava y la utilizando la granulometría.

Para la grava se escoge la gradación B esto debido que la muestra tiene mayor materia representativa en los tamices correspondientes.

Para la gravilla se escoge la gradación C esto debido que la muestra tiene mayor materia representativa en los tamices correspondientes.

Para determinar el número de esferas tenemos que utilizar la tabla 16, el número de esferas está en función a la gradación escogida de la misma tabla.

Tabla.25. Ensayo de desgaste para el agregado Grueso - Grava

MÉTODO		A	B	C	D
DIÁMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
PESO TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
NÚMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N° DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACIÓN		30	15	15	15

Fuente: Tomada de ADMINISTRADORA BOLIVIANA DE CARRETERAS,
Manual de ensayos de suelos y materiales asfaltos vol.4, (ABC, 2010)

Para Grava:

Tabla.26. Resumen del ensayo de desgaste para el agregado Grueso – Grava – Tarija.

DATOS DE LABORATORIO							
MÉTODO A		MÉTODO B		MÉTODO C		MÉTODO D	
TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO
1"	1250	1/2"	2500	1/4"	2500	N°8	5000
3/4"	1250	3/8"	2500	N°4	2500		
1/2"	1250	$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{\text{INICIAL}} - P_{\text{FINAL}}}{P_{\text{INICIAL}}} * 100$					
3/8"	1250						
MATERIAL		PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACIÓN ASTM		
B		5000.00	4024.00	19.52	40% MAX		

SEPARACIÓN DE PIEDRA
PIZARRA

PESO DE LA MUESTRA	PESO DE LA PIEDRA PIZARRA	PESO FINAL
5000.00	976.00	4024.00

Fuente: Elaboración propia.

19,52% < 40% (ASTM C131 y AASHTOT96)

Tabla.27. Resumen del ensayo de desgaste para el agregado Grueso – Grava – Tupiza.

DATOS DE LABORATORIO							
MÉTODO A		MÉTODO B		MÉTODO C		MÉTODO D	
TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO
1"	1250	1/2"	2500	1/4"	2500	N°8	5000
3/4"	1250	3/8"	2500	N°4	2500		
1/2"	1250	$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{INICIAL} - P_{FINAL}}{P_{INICIAL}} * 100$					
3/8"	1250						

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACIÓN ASTM
B	5000.00	3871.10	22.58	40% MAX

SEPARACIÓN DE PIEDRA PIZARRA

PESO DE LA MUESTRA	PESO DE LA PIEDRA PIZARRA	PESO FINAL
5000.00	1128.90	3871.10

Fuente: Elaboración Propia

22,58% < 40% (ASTM C131 y AASHTOT96)

Para la gravilla:

Tabla.28. Resumen del ensayo de desgaste para el agregado Grueso- Gravilla- Tarija.

DATOS DE LABORATORIO							
MÉTODO A		MÉTODO B		MÉTODO C		MÉTODO D	
TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO
1"	1250	1/2"	2500	1/4"	2500	N°8	5000
3/4"	1250	3/8"	2500	N°	2500		
1/2"	1250	$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{INICIAL} - P_{FINAL}}{P_{INICIAL}} * 100$					
3/8"	1250						

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACIÓN ASTM
C	5000.00	3895.20	22.10	40% MAX

SEPARACIÓN DE PIEDRA PIZARRA

PESO DE LA MUESTRA	PESO DE LA PIEDRA PIZARRA	PESO FINAL
5000.00	1104.80	3895.20

Fuente: Elaboración Propia

22,10% < 40% (ASTM C131 y AASHTOT96)

Tabla.29. Resumen del ensayo de desgaste para el agregado Grueso– Gravilla-Tupiza.

DATOS DE LABORATORIO							
MÉTODO A		MÉTODO B		MÉTODO C		MÉTODO D	
TAMI Z	PESO RETENID O	TAMIZ	PESO RETENID O	TAMIZ	PESO RETENID O	TAMI Z	PESO RETENID O
1"	1250	1/2"	2500	1/4"	2500	N°8	5000
3/4"	1250	3/8"	2500	N°4	2500		
1/2"	1250	$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{INICIAL} - P_{FINAL}}{P_{INICIAL}} * 100$					
3/8"	1250						
MATERIAL		PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGAST E	ESPECIFICACIÓN ASTM		
C		5000.00	3560.10	28.80	40% MAX		
SEPARACIÓN DE PIEDRA PIZARRA							
PESO DE LA MUESTRA		PESO DE LA PIEDRA PIZARRA		PESO FINAL			
5000.00		1439.90		3560.10			

Fuente: Elaboración Propia

28,80% < 40% (ASTM C131 y AASHTOT96)

3.1.3.6 *Peso específico de agregado grueso (ASTM E127; AASHTO T85-91; ABC A0519).*

Figura.14. Cálculo del peso de la muestra sumergida.



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Hormigón y Resistencia de materiales 2024.

Este ensayo tiene el objetivo de determinar el peso específico bruto (Gb), el peso específico saturado (Gbs) y el peso específico aparente (G) de los agregados gruesos. A partir de estos valores, se puede calcular la absorción de materiales como grava y gravilla después de haber sido sumergidos en agua durante 24 horas. Este procedimiento es esencial para evaluar la calidad y las características físicas de los agregados utilizados en construcción, asegurando que cumplan con los estándares necesarios.

Cálculos:

- Peso específico aparente:

$$G = \frac{A}{A - C}$$

- Peso específico bruto:

$$G_b = \frac{A}{B - C}$$

- Peso específico saturado superficialmente seco:

$$G_{SSS} = \frac{B}{B - C}$$

- Peso específico aparente:

$$A_{bs} = \frac{B - A \times 100}{A}$$

Donde:

A = Peso del agregado secado en estufa, en gramos.

B = Peso del agregado saturado superficialmente seco, en gramos.

C = Peso del agregado sumergido en agua, en gramos.

Para la grava:

Tabla.30. Resumen peso específico del Agregado Grueso – Grava -Tarija.

MUESTRA Nº	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3)	% DE ABS.
1	2948.00	3000.08	1843.00	2.55	2.59	2.67	1.77
2	2947.00	3000.05	1845.00	2.55	2.60	2.67	1.80
3	2948.00	3000.07	1842.00	2.55	2.59	2.67	1.77
PROMEDIO				2.55	2.60	2.67	1.78

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.31. Resumen peso específico del Agregado Grueso – Grava - Tupiza.

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3)	% DE ABS.
1	2977.30	3000.30	1863.00	2.62	2.64	2.67	0.77
2	2977.90	3000.50	1869.00	2.63	2.65	2.69	0.76
3	2976.70	3000.10	1667.00	2.23	2.25	2.27	0.79
PROMEDIO				2.62	2.64	2.68	0.77

Fuente: Elaboración Propia

Para la gravilla:

Tabla.32. Resumen peso específico del Agregado Grueso – Gravilla -Tarija.

MUESTRA	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3)	% DE ABS.
1	2935.00	3000.00	1854.00	2.56	2.62	2.72	2.21
2	2943.00	3000.00	1855.00	2.57	2.62	2.70	1.94
3	2934.00	3000.00	1859.00	2.57	2.63	2.73	2.25
PROMEDIO				2.57	2.62	2.71	2.08

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.33. Resumen peso específico del Agregado Grueso – Gravilla -Tupiza.

MUESTRA	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3)	% DE ABS.
1	2944.50	3000.30	1854.00	2.57	2.62	2.70	1.90
2	2940.70	3000.30	1850.00	2.56	2.61	2.70	2.03
3	2943.50	3000.10	1851.00	2.56	2.61	2.69	1.92
PROMEDIO				2.56	2.61	2.70	1.96

Fuente: Elaboración Propia

3.1.3.7 Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM E128; AASHTO T84; ABC A0520).

Peso específico y absorción de la arena:

Figura.15. Muestra húmeda del agregado fino, Picnómetro más muestra.



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Hormigón y Resistencia de materiales 2024.

Cálculos:

Tabla.34. Ensayo de Peso Específico y Absorción Agregado Fino - Tarija.

MUESTRA	PESO DE LA MUESTRA	PESO MATRAZ	P. MUESTRA+	AGUA	PESO	VOL. DEL	P. E.	P. E.	P. E.	%
			MATRAZ+	AGREG.AL	MUESTRA	MATRÁZ	A GRANEL	SAT. CON	APARENTE	DE
			AGUA	MATRAZ "w"	SECADA"A"	"V"	(gr/cm3)	SUP. SECA	(gr/cm3)	ABSORC.
	(gr)	(gr)	(gr)	(ml) ó (gr)	(gr)	(ml)		(gr/cm3)		
1	500.00	166.90	993.90	327.00	494.50	500.00	2.86	2.89	2.95	1.10
2	500.00	196.10	984.10	288.00	494.50	500.00	2.33	2.36	2.39	1.10
3	500.00	221.60	1021.60	300.00	495.00	500.00	2.48	2.50	2.54	1.00
PROMEDIO							2.56	2.58	2.63	1.07

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.35. Ensayo de Peso Específico y Absorción Agregado Fino -Tupiza.

MUESTRA	PESO DE LA MUESTRA	PESO MATRAZ	P. MUESTRA+	AGUA	PESO	VOL. DEL	P. E.	P. E.	P. E.	%
			MATRAZ+	AGREG.AL	MUESTRA	MATRAZ	A GRANEL	SAT. CON	APARENTE	DE
			AGUA	MATRAZ "w"	SECADA "A"	"V"	(gr/cm3)	SUP. SECA	(gr/cm3)	ABSORC.
	(gr)	(gr)	(gr)	(ml) ó (gr)	(gr)	(ml)		(gr/cm3)		
1	500.30	166.90	995.90	328.70	494.50	500.00	2.89	2.92	2.98	1.16
2	500.00	193.50	988.40	294.90	494.50	500.00	2.41	2.44	2.48	1.10
3	500.20	196.00	983.40	287.20	495.00	500.00	2.33	2.35	2.38	1.04
PROMEDIO							2.54	2.57	2.61	1.10

Fuente: Elaboración Propia

3.1.3.8 Densidad de masa (peso unitario) y vacíos del agregado (ASTM E-30; AASTHO T19M-00; ABC A0518).

El peso unitario de los agregados grueso y fino según la norma ASTM C29/C29M. Este ensayo permite conocer la densidad aparente de los agregados, información crucial para el diseño de mezclas de asfálticas.

Figura.16. Ensayo de peso unitario



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Hormigón y Resistencia de materiales 2024.

Cálculos:

$$\text{Peso Unitario} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{\text{Peso del Agregado (kg)}}{\text{Volumen de la Probeta (m3)}}$$

Para la grava:

Tabla.36. Resumen de Calibración del Molde o Probeta

N° de prueba	1	2	3
Temperatura de Ensayo °C	25	25	25
Peso específico del agua gr/m3	9905	9905	9905
Peso del molde gr	5720	5720	5720
Peso agua + molde gr	15625	15625	15625

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.37. Ensayo de Peso Unitario Suelto Agregado Grueso – Grava - Tarija.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	5720.00	9934.11	19765.00	14045.00	1.414
2	5720.00	9934.11	19920.00	14200.00	1.429
3	5720.00	9934.11	19842.50	14122.50	1.422
PROMEDIO					1.422

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.38. Ensayo de Peso Unitario Compactado Agregado Grueso – Grava -Tarija.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm3)
1	5720.00	9934.11	21185.00	15465.00	1.557
2	5720.00	9934.11	21175.00	15455.00	1.556
3	5720.00	9934.11	21180.00	15460.00	1.556
PROMEDIO					1.556

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.39. Ensayo de Peso Unitario Suelto Agregado Grueso – Grava - Tupiza.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	5720.00	9977.00	20885.00	15165.00	1.520
2	5720.00	9977.00	20895.00	15175.00	1.521
3	5720.00	9977.00	20891.00	15171.00	1.521
PROMEDIO					1.521

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.40. Ensayo de Peso Unitario Compactado Agregado Grueso – Grava-Tupiza.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm3)
1	5720.00	9977.00	21805.00	16085.00	1.612
2	5720.00	9977.00	21755.00	16035.00	1.607
3	5720.00	9977.00	21760.00	16040.00	1.608
PROMEDIO					1.609

Fuente: Elaboración Propia

Para la Gravilla:

Tabla.41. Ensayo de Peso Unitario Suelto Agregado Grueso – Gravilla -Tarija.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	5720.00	9934.11	19540.00	13820.00	1.391
2	5720.00	9934.11	19530.00	13810.00	1.390
3	5720.00	9934.11	19535.00	13815.00	1.391
PROMEDIO					1.391

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.42. Ensayo de Peso Unitario Compactado Agregado Grueso – Gravilla - Tarija.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm3)
1	5720.00	9934.11	20665.00	14945.00	1.504
2	5720.00	9934.11	20545.00	14825.00	1.492
3	5720.00	9934.11	20555.00	14835.00	1.493
PROMEDIO					1.497

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.43. Ensayo de Peso Unitario Suelto Agregado Grueso – Gravilla - Tupiza.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	5720.00	9977.00	18900.00	13180.00	1.321
2	5720.00	9977.00	19045.00	13325.00	1.336
3	5720.00	9977.00	18990.00	13270.00	1.330
PROMEDIO					1.329

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.44. Ensayo de Peso Unitario Compactado Agregado Grueso – Gravilla - Tupiza.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm3)
1	5720.00	9977.00	19780.00	14060.00	1.409
2	5720.00	9977.00	20015.00	14295.00	1.433
3	5720.00	9977.00	20140.00	14420.00	1.445
PROMEDIO					1.429

Fuente: Elaboración Propia

Para la arena:

Tabla.45. Ensayo de Peso Unitario Suelto Agregado Fino – Arena - Tarija.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2605.00	3033.59	7020.00	4415.00	1.455
2	2605.00	3033.60	7055.00	4450.00	1.467
3	2605.00	3033.61	7040.00	4435.00	1.462
PROMEDIO					1.461

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.46. Ensayo de Peso Unitario Compactado Agregado Fino – Arena- Tarija.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm3)
1	2605.00	3033.59	7655.00	5050.00	1.665
2	2605.00	3033.59	7685.00	5080.00	1.675
3	2605.00	3033.59	7730.00	5125.00	1.689
PROMEDIO					1.676

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.47. Ensayo de Peso Unitario Suelto Agregado Fino – Arena - Tupiza.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2605.00	3033.59	7020.00	4415.00	1.455
2	2605.00	3033.60	7055.00	4450.00	1.467
3	2605.00	3033.61	7040.00	4435.00	1.462
PROMEDIO					1.461

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.48. Ensayo de Peso Unitario Compactado Agregado Fino – Arena -Tupiza.

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm3)
1	2605.00	3033.59	7655.00	5050.00	1.665
2	2605.00	3033.59	7685.00	5080.00	1.675
3	2605.00	3033.59	7730.00	5125.00	1.689
PROMEDIO					1.676

Fuente: Elaboración Propia

3.1.3.9 Determinación del peso específico del filler (ASTM D 854; AASTHO T100)

Este ensayo se realiza para determinar el peso específico relativo de un suelo compuesto por partículas menores a 5mm como se indica en el capítulo II.

Cálculos:

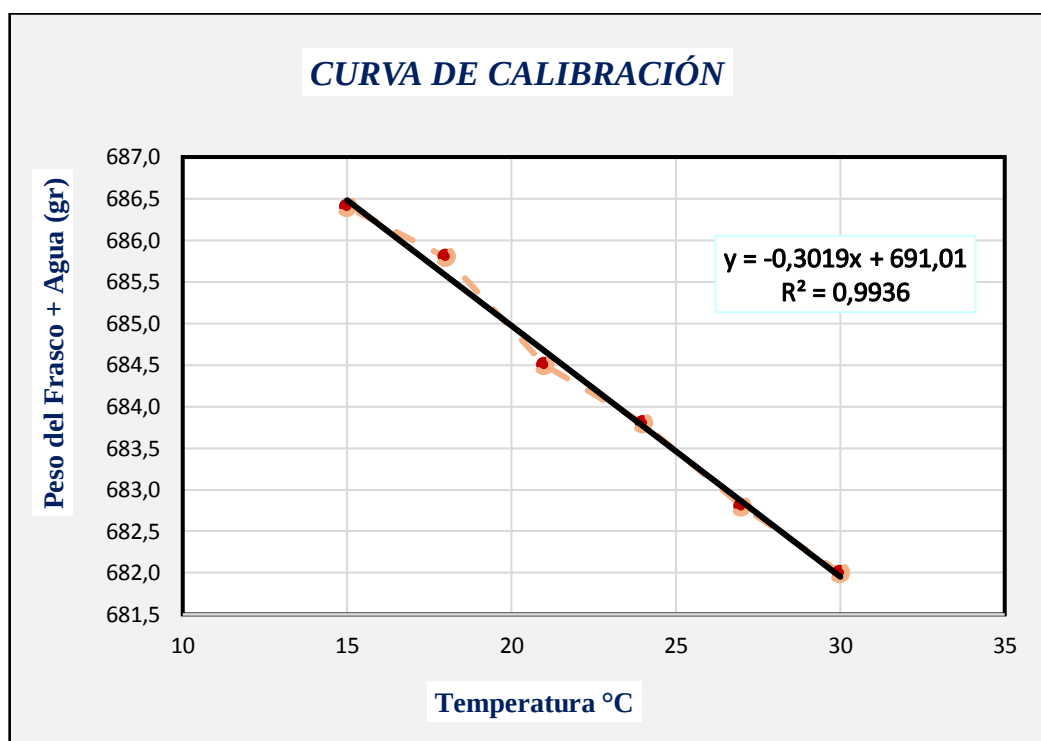
Peso del frasco seco y limpio: 212.00 gr

Tabla.49. Calibración del frasco.

Ensayo N°	Peso frasco + agua (gr)	Temperatura (°C)
1	682.00	30
2	682.80	27
3	683.80	24
4	684.50	21
5	685.80	18
6	686.40	15

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 13. Curva de calibración.



Fuente: Elaboración Propia

Figura.17. Ensayo de peso específico filler, calibración del frasco.



Fuente: Elaboración Propia; laboratorio de suelos, U.A.J.M.S.

Tabla.50. Ensayo del peso específico del filler.

Identificación de Ensayo	1				
Temperatura ensayada (°C)	30	25	20	18	15
Peso del suelo seco W_s	80	80	80	80	80
Peso del frasco + agua * W_{fw}	681.95	683.46	684.97	685.58	686.48
Peso del frasco + agua + suelo W_{fsw}	734.10	734.80	735.90	736.5	736.90
Peso específico	2.87	2.79	2.75	2.75	2.70
Factor de corrección K^{**}	0.9974	0.9989	1.0000	1.0004	1.0009
Peso específico corregido (gr/cm ³)	2.88	2.79	2.75	2.75	2.70
Peso específico promedio (gr/cm ³)	2.78				

Fuente: Elaboración Propia

3.1.4 Resultados finales de la caracterización del agregado.

Tabla.51. Resumen Caracterización del Agregado Tarija – La Pintada

AGREGADO TARIJA – LA PINTADA									
TIPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN		VALOR	OBSERVACIÓN			
			NORMAS	RANGO		ASTM	AASHTO	ABC	
PROPIEDADES DE ORIGEN									
Partículas Planas y Alargadas	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	%	ASSHTO C 142 ASTM D-4791 ABC AO503	máx. 15	22,34	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
		Gravilla 1/2"				9,77	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Equivalente Arena	AGREGADO FINO	Arena N°4	%	ASTM D-2419 AASHTO T176 ABC A0509	min. 90	93,03	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Desgaste de Los Ángeles	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	%	ASTM E-131 AASHTO T96-99 ABC A0511	máx. 40	19,52	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		Gravilla 1/2"				22,10	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
PROPIEDADES GRAVIMÉTRICAS									
Peso Específico	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	(gr/cm³)	ASTM E-127 AASHTO T85-91 ABC A0519	-----	2,67	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		Gravilla 1/2"	(gr/cm³)			2,71	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	AGREGADO FINO	Arena N°4	(gr/cm³)	ASTM E-128 AASHTO T84-00 ABC A0520	-----	2,63	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Absorción	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	%	ASTM E-127 AASHTO T85-91 ABC A0519	-----	1,78	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		Gravilla 1/2"				2,08	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	AGREGADO FINO	Arena N°4	%	ASTM E-128 AASHTO T84-00 ABC A0520	-----	1,07	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Peso Unitario Suelto	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	(gr/cm³)	ASTM E-127 AASHTO T85-91 ABC A0519	-----	1,42	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		Gravilla 1/2"	(gr/cm³)			1,39	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	AGREGADO FINO	Arena N°4	(gr/cm³)	ASTM E-128 AASHTO T84-00 ABC A0520	-----	1,46	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Peso Unitario Compactado	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	(gr/cm³)	ASTM E-127 AASHTO T85-91 ABC A0519	-----	1,57	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		Gravilla 1/2"	(gr/cm³)			1,50	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	AGREGADO FINO	Arena N°4	(gr/cm³)	ASTM E-128 AASHTO T84-00 ABC A0520	-----	1,68	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.52. Resumen Caracterización del Agregado Tupiza – Río Blanco

AGREGADO TUPIZA – RÍO BLANCO									
TIPO	DESCRIPCIÓN		UNIDAD	ESPECIFICACIÓN		VALOR	OBSERVACIÓN		
				NORMAS	RANGO		ASTM	AASHTO	ABC
PROPIEDADES DE ORIGEN									
Partículas Planas y Alargadas	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	%	ASSHTO C 142 ASTM D-4791 ABC A0503	máx. 15	19,39	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
		Gravilla 1/2"				7,98	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Equivalente Arena	AGREGADO FINO	Arena N°4	%	ASTM D-2419 AASHTO T176 ABC A0509	mín. 90	92,65	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Desgaste de Los Ángeles	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	%	ASTM E-131 AASHTO T96-99 ABC A0511	máx. 40	22,58	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		Gravilla 1/2"				28,80	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
PROPIEDADES GRAVIMÉTRICAS									
Peso Específico	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	(gr/cm³)	ASTM E-127 AASHTO T85-91 ABC A0519	-----	2,58	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		Gravilla 1/2"	(gr/cm³)			2,70	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		AGREGADO FINO	Arena N°4	(gr/cm³)	ASTM E-128 AASHTO T84-00 ABC A0520	-----	2,61	CUMPLE	CUMPLE
ABSORCIÓN	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	%	ASTM E-127 AASHTO T85-91 ABC A0519	-----	0,77	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		Gravilla 1/2"				1,96	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		AGREGADO FINO	Arena N°4	%	ASTM E-128 AASHTO T84-00 ABC A0520	-----	1,10	CUMPLE	CUMPLE
Peso Unitario Suelto	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	(gr/cm³)	ASTM E-127 AASHTO T85-91 ABC A0519	-----	1,52	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		Gravilla 1/2"	(gr/cm³)			1,33	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		AGREGADO FINO	Arena N°4	(gr/cm³)	ASTM E-128 AASHTO T84-00 ABC A0520	-----	1,46	CUMPLE	CUMPLE
Peso Unitario Compactado	AGREGADO GRUESO	Grava 3/4"	(gr/cm³)	ASTM E-127 AASHTO T85-91 ABC A0519	-----	1,61	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		Gravilla 1/2"	(gr/cm³)			1,43	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
		AGREGADO FINO	Arena N°4	(gr/cm³)	ASTM E-128 AASHTO T84-00 ABC A0520	-----	1,68	CUMPLE	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

3.2 Caracterización del Asfalto.

En este capítulo se evaluará las propiedades del cemento asfáltico a utilizar, el asfalto convencional 85-100 y el asfalto modificado DE Tipo I (PG 76-28) en el proyecto, identificando sus propiedades mediante ensayos normalizados de laboratorio realizados de acuerdo a normas que garanticen su comportamiento.

3.2.1 Fuente de provisión del cemento asfáltico.

3.2.1.1 Asfalto convencional.

El cemento asfáltico convencional (85-100) fue facilitado por el Director de Obras Públicas Municipales de la ciudad de Tarija, Ingeniero Marcelo Zenteno Castrillo.

La procedencia del Cemento Asfáltico convencional 85-100 es de Perú.

Figura.18. Lata del Cemento Asfáltico convencional 85-100



Fuente: Posta Municipal de Tarija

3.2.1.2 Asfalto Modificado Tipo I (PG 76-28).

El cemento asfáltico modificado Tipo I (PG 76-28) fue facilitado por los señores de la empresa de SYNTEX ASPHALT S.R.L.

La procedencia del Cemento Asfáltico Modificado es rusa.

Figura.19. Latas del CA modificado



Fuente: (SYNTEX ASPHALT S.R.L., 2023)

3.2.2 Cálculo de los ensayos realizados al cemento asfáltico convencional y modificado TIPO I (PG 76-28).

3.2.2.1 Ensayo de peso específico (ASTM D71-94; AASHTO T229-97; ABC A0102).

Figura.20. Ensayo de peso específico.



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024.

El procedimiento llevado a cabo para la realización del ensayo se detalla en el capítulo II, donde se describen los pasos específicos seguidos durante la prueba. Además, la figura 19 ilustra el equipo utilizado en el ensayo, proporcionando una representación visual de los instrumentos necesarios para llevar a cabo el proceso de manera adecuada y precisa.

Cálculos:

$$PE = \frac{C - A}{B - A - (D - C)}$$

Donde:

A=Peso del picnómetro vacío [gr]

B=Peso del picnómetro más agua [gr]

C=Peso del picnómetro más muestra, lleno hasta la mitad [gr]

D=Peso del picnómetro más muestra y agua [gr]

Tabla.53. Ensayo peso específico del Asfalto Convencional.

CONDICIONES DE ENSAYO			
TEMPERATURA = 25°C			
ENSAYO N°:	1	2	3
A= Peso Picnómetro (gr)	34.1	34.0	34.4
B= Peso Picnómetro + Agua (25°C) (gr)	85.9	87.2	89.7
C= Peso Picnómetro + Muestra (gr)	65.5	68.3	67.3
D= Peso Picnómetro + Agua + Muestra (gr)	86.6	87.5	89.8
Peso Específico (gr/cm³)	1.020	1.006	1.000
RESULTADO			
PESO ESPECÍFICO PROMEDIO (gr/cm³) =			1.01
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA =			1,00-1,05

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.54. Ensayo peso específico del Asfalto Modificado Tipo I (PG 76-28).

CONDICIONES DE ENSAYO			
TEMPERATURA = 25°C			
ENSAYO N°:	1	2	3
A= Peso Picnómetro (gr)	34.4	34.0	34.1
B= Peso Picnómetro + Agua (25°C) (gr)	89	87.1	88.7
C= Peso Picnómetro + Muestra (gr)	67.8	65.3	64.9
D= Peso Picnómetro + Agua + Muestra (gr)	88.9	88	88.2
Peso Específico (gr/cm³)	0.994	1.027	0.981
RESULTADO			
PESO ESPECÍFICO PROMEDIO (gr/cm³) =			1.00
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA =			-

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2.2 Ensayo de penetración (ASTM D-5; AASHTO T49-97; ABC A0103).

El procedimiento empleado para la realización del ensayo se explica en detalle en el capítulo II, donde se describen las etapas y técnicas utilizadas durante el proceso. En la figura 21, se puede observar una imagen del equipo empleado en el ensayo, lo cual permite una mejor comprensión de los instrumentos y dispositivos necesarios para efectuar la prueba correctamente.

Figura.21. Ensayo de penetración



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024.

Cálculos:

- Por muestra se tomará tres datos de penetración; Se obtendrá la media de cada muestra.
- El resultado se obtendrá de la media +/- la tolerancia, obteniéndose de esta forma el rango máximo y el rango mínimo de cada muestra.

Tabla.55. Ensayo de penetración del Asfalto Convencional.

CONDICIONES DE ENSAYO			
TEMPERATURA = 25°C			
CARGA TOTAL DEL EQUIPO + AGUJA = 100 gr			
ENSAYO DE ENSAYO = 5 seg.			
ENSAYO N°	1	2	3
Lectura N°1	94	90	95
Lectura N°2	90	89	93
Lectura N°3	85	88	85
Promedio (0,1 mm)	90	89	91
RESULTADO			
PENETRACIÓN (0,1 mm) = 90			
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA = 85-100			

Fuente: Elaboración Propia

PROMEDIO FINAL = 90 (CUMPLE)

Tabla.56. Ensayo de penetración del Asfalto Modificado Tipo I (PG 76-28).

CONDICIONES DE ENSAYO			
TEMPERATURA = 25°C			
CARGA TOTAL DEL EQUIPO + AGUJA = 100 gr			
ENSAYO DE ENSAYO = 5 seg.			
ENSAYO N°	1	2	3
Lectura N°1	61	60	67
Lectura N°2	55	53	60
Lectura N°3	55	52	55
Promedio (0,1 mm)	57	55	61
RESULTADO			
PENETRACIÓN (0,1 mm) = 58			
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA = 40-70			

Fuente: Elaboración Propia

PROMEDIO FINAL = 58 (CUMPLE)

3.2.2.3 Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D36; AASHTO T53-96; ABC A0110).

El procedimiento utilizado para llevar a cabo el ensayo ya se describió previamente en el Capítulo II. En la figura 22, se presenta el equipo empleado para la realización del ensayo.

Figura.22. Ensayo punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024.

Cálculos:

Tabla.57. Ensayo de Punto de ablandamiento del Asfalto Convencional.

CONDICIONES DE ENSAYO			
TEMPERATURA INICIAL =		5°C	
INCREMENTO DE TEMPERATURA =		5°C/mín.	
ENSAYO N°:	1	2	3
Lectura (°C)	43.0	44.0	42.0
RESULTADO			
TEMPERATURA (°C) =		43	
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA (°C) =		43-53	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.58. Ensayo Punto de ablandamiento del Asfalto Modificado Tipo I (PG 76-28).

CONDICIONES DE ENSAYO			
TEMPERATURA INICIAL =		5°C	
INCREMENTO DE TEMPERATURA =		5°C/mín.	
ENSAYO N°:	1	2	3
Lectura (°C)	73.0	75.0	71.0
RESULTADO			
TEMPERATURA (°C)=		73	
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA (°C) =		mín. 70	

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2.4 Ensayo de ductilidad (ASTM D-113; AASHTO T51-00; ABC A0105).

El procedimiento utilizado para llevar a cabo el ensayo ya se describió previamente en el Capítulo II. En la figura 23, se presenta el equipo empleado para la realización del ensayo.

Cálculos:

Tabla.59. Ensayo de ductilidad del Asfalto Convencional.

CONDICIONES DE ENSAYO			
TEMPERATURA = 25°C			
VELOCIDAD = 5 cm/min			
ENSAYO DE ENSAYO = 5seg.			
ENSAYO N°	1	2	3
Lectura Inicial (cm)	0	0	0
Lectura Final (cm)	101	101	102
Promedio (0,1 mm)	101	101	102
RESULTADO			
LECTURA FINAL DE ENSAYO (cm)= 101			
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA (cm) = Mín. 100			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.60. Ensayo de ductilidad del Asfalto Modificado Tipo I (PG 76-28).

CONDICIONES DE ENSAYO			
TEMPERATURA = 25°C			
VELOCIDAD = 5 cm/min			
ENSAYO DE ENSAYO = 5seg.			
ENSAYO N°	1	2	3
Lectura Inicial (cm)	0	0	0
Lectura Final (cm)	91	93	92
Promedio (0,1 mm)	91	93	92
RESULTADO			
LECTURA FINAL DE ENSAYO (cm)= 92			
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA (cm) = Mín. 90			

Fuente: Elaboración Propia

Figura.23. Ensayo de Ductilidad



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024.

3.2.2.5 Ensayo de punto de inflamación (Vaso abierto de Cleveland) (ASTM D-1310-01; AASHTO T79-96; ABC A0106).

El procedimiento utilizado para llevar a cabo el ensayo ya se describió previamente en el Capítulo II. En la figura 24, se presenta el equipo empleado para la realización del ensayo.

Figura.24. Punto de inflamación



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024.

Cálculos:

Tabla.61. Ensayo de inflamación del Asfalto Convencional.

CONDICIONES DE ENSAYO			
TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO C.A. = 110°C			
ENSAYO N°	1	2	3
Lectura (°C)	260	265	264
RESULTADO			
PUNTO DE INFLAMACIÓN (°C) = 263			
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA (°C) = Mín. 232			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.62. Ensayo de inflamación del Asfalto Modificado Tipo I (PG 76-28).

CONDICIONES DE ENSAYO			
TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO C.A. = 110°C			
ENSAYO N°	1	2	3
Lectura (°C)	270	268	274
RESULTADO			
PUNTO DE INFLAMACIÓN (°C) = 271			
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA (°C) = Mín. 235			

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2.6 Ensayo de película delgada (ASTM D-1754; AASHTO T179-05).

El procedimiento utilizado para llevar a cabo el ensayo ya se describió previamente en el Capítulo II. En la figura 25, se presenta el equipo empleado para la realización del ensayo.

Figura.25. Ensayo de película delgada



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024.

Cálculos:

Tabla.63. Ensayo de película delgada del Asfalto Convencional.

CONDICIONES DE ENSAYO						
TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO C.A. = 163°C						
Pérdida por calentamiento						
Muestra	P recip vacío	P recip + M	P recip +M (163 °C)	Muestra (gr)	Diferencia	% Perdida
1	84.70	134.70	135.00	50	0.30	0.600
2	90.50	140.50	140.90	50	0.40	0.800
3	85.60	135.60	136.10	50	0.50	1.000
4	89.90	139.90	140.20	50	0.30	0.600
RESULTADO						
PELÍCULA DELGADA (%)=				0.750		
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA =				<1%		

Fuente: Elaboración Propia

Promedio Final Perdida = 0,75 % < 1,0 %; (AASHTO M20) (CUMPLE)

Tabla.64. Ensayo de película delgada del Asfalto Modificado Tipo I (PG 76-28).

CONDICIONES DE ENSAYO						
TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO C.A. = 163°C						
Pérdida por calentamiento						
Muestra	P recip vacío	P recip + M	P recip +M (163 °C)	Muestra (gr)	Diferencia	% Perdida
1	84.70	134.70	134.90	50	0.20	0.400
2	90.50	140.50	140.70	50	0.20	0.400
3	85.60	135.60	135.80	50	0.20	0.400
4	89.90	139.90	140.10	50	0.20	0.400
RESULTADO						
PELÍCULA DELGADA (%)=				0.400		
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA =				Máx. 1%		

Fuente: Elaboración Propia

Promedio Final Pérdida = 0,45 % < 1,0 %; (AASHTO M20) (CUMPLE)

3.2.2.7 Ensayo de ductilidad sobre el residuo de película delgada.

Tabla.65. Ductilidad del Residuo del Asfalto Convencional.

CONDICIONES DE ENSAYO		
TEMPERATURA = 25°C		
VELOCIDAD = 5 cm/min		
ENSAYO DE ENSAYO = 5seg.		
Muestra	Distancia a rotura (cm)	
1	>150	no se rompió
2	>150	no se rompió
3	>150	no se rompió

Fuente: Elaboración Propia

No se rompió = > 150 cm (AASHTO M20) (CUMPLE)

Tabla.66. Ductilidad del Residuo del Asfalto Modificado Tipo I (PG 76-28).

CONDICIONES DE ENSAYO		
TEMPERATURA = 25°C		
VELOCIDAD = 5 cm/min		
ENSAYO DE ENSAYO = 5seg.		
Muestra	Distancia a rotura (cm)	
1	>150	no se rompió
2	>150	no se rompió
3	>150	no se rompió

Fuente: Elaboración Propia

No se rompió = > 150 cm (AASHTO M20) (CUMPLE)

3.2.3 Resultados finales de la caracterización del asfalto convencional.

Para la caracterización del asfalto convencional se clasificó de acuerdo a las especificaciones de penetración que se mostró en la Tabla 7 y la Tabla 8, los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla.67. Resumen de la Caracterización del Asfalto Convencional.

CEMENTO ASFÁLTICO 85-100 CONVENCIONAL											
ENSAYOS	MÉTODO	VALORES				GRADO DE PENETRACIÓN AASHTO M20			GRADO DE VISCOCIDAD AASHTO M226-80		
		1°	2°	3°	PROM.	Mín.	Máx.	Verificación	Mín.	Máx.	Verificación
PROPIEDADES DE ORIGEN											
A. Sobre el asfalto virgen											
Peso Específico (gr/cm3)	ASTM D71-94	1.020	1.006	1.000	1.009	---	---		---	---	
PROPIEDADES DE CONSISTENCIA											
Penetración (25°C) 100g 5s(0,1mm)	ASTM D-5	90	89	91	90	85	100	CUMPLE	80	---	CUMPLE
Punto de Ablandamiento (°C)	ASTM D-36	43	44	42	43	---	---		---	---	
Ductilidad de 25°C 5cm/min (cm)	ASTM D-113	101	101	102	101	100	---	CUMPLE	75	---	CUMPLE
PROPIEDADES DE SEGURIDAD											
Punto de Inflamación (°C)	ASTM D-1310	260	265	264	263	232	---	CUMPLE	219	---	CUMPLE
PROPIEDADES DE SEGURIDAD											
B. Ensayo sobre la Película Delgada (ASTM D-1754)											
Pérdida por calentamiento %	ASTM D-1754	0.6	0.8	0.6	0.75	---	1	CUMPLE	---	---	CUMPLE
Ductilidad de 25°C 5cm/min (cm)	ASTM D-116	150+	150+	150+	150+	75	---	CUMPLE	75	---	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

3.2.4 Resultados finales de la caracterización del cemento asfáltico PG 76-28.

Para la caracterización del asfalto Tipo I (PG 76-28) se clasificó de acuerdo a las especificaciones de penetración que se mostró en la Tabla 10, los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla.68. Resumen de la Caracterización del Asfalto Modificado Tipo I (PG 76-28).

CEMENTO ASFÁLTICO 85-100 CONVENCIONAL								
ENSAYOS	MÉTODO	VALORES				ESPECIFICACIÓN PG 76-28		
		1°	2°	3°	PROM.	min.	max.	Verificación
PROPIEDADES DE ORIGEN								
A. Sobre el asfalto virgen								
Peso Específico (gr/cm3)	ASTM D71-94	0.994	1.027	0.981	1.001	---	---	
PROPIEDADES DE CONSISTENCIA								
Penetración (25°C) 100g 5s(0,1mm)	ASTM D-5	57	55	61	58	40	70	CUMPLE
Punto de Ablandamiento (°C)	ASTM D-36	73	75	71	73	---	---	
Ductilidad de 25°C 5cm/min (cm)	ASTM D-113	91	93	92	92	90	---	CUMPLE
PROPIEDADES DE SEGURIDAD								
Punto de Inflamación (°C)	ASTM D-1310	270	268	274	271	235	---	CUMPLE
PROPIEDADES DE SEGURIDAD								
B. Ensayo sobre la Película Delgada (ASTM D-1754)								
Perdida por calentamiento %	ASTM D-1754	0.20	0.20	0.20	0.40	---	1	CUMPLE
Ductilidad de 25°C 5cm/min (cm)	ASTM D-116	150+	150+	150+	150+	80	---	CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Diseño de la mezcla asfáltica en caliente con asfalto convencional y asfalto modificado Tipo I (PG 76-28).

Una vez analizado los agregados, asfalto convencional y asfalto modificado Tipo I (PG 76-28), verificando que cumpla las normativas, se procede a diseñar las mezclas asfálticas, seguidamente realizamos las briquetas que se someterán a ensayos de estabilidad, fluencia, densidad y vacíos, dichos ensayos nos servirán para analizar los beneficios o perjuicios que implica el uso del asfalto modificado.

3.3.1 Dosificación.

La dosificación de mezcla tiene por objetivo encontrar los porcentajes de agregado y asfalto. El agregado está compuesto por grava, gravilla y arena, para obtener el porcentaje de cada agregado, se utilizó las normas de la ASTM D 3515 utilizando una granulometría cerrada, el método que se utilizará para encontrar los porcentajes de cada agregado en la mezcla es el del tanteo.

3.3.2 Método del tanteo.

Este método consiste en hacer una lista de los materiales que se utilizarán y sus especificaciones (granulometría), se debe colocar porcentajes de cada material para la mezcla, hasta que cumpla con las franjas granulométricas escogidas en el diseño.

3.3.2.1 *Granulometría del proyecto.*

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. (Anguas et al., 2004)

La Tabla 65 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D3515.

Tabla.69. Graduaciones Propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3515)

Abertura de malla	Mezclas cerradas								
	Tamaño máximo nominal agregado								
	2" (50mm)	1 ½" (37.5mm)	1" (25mm)	¾" (19mm)	½" (12.5mm)	⅜" (9.5mm)	Nº4 (4.75mm)	Nº8 (2.36mm)	Nº16 (1.18mm)
Graduaciones para mezclas de agregados (grueso, fino y filler)									
2 ½" (63mm)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
2" (50mm)	90-100	100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½" (37.5mm)	-	90-100	100	-	-	-	-	-	-
1" (25mm)	60-80	-	90-100	100	-	-	-	-	-
¾" (19mm)	-	58-80	-	90-100	100	-	-	-	-
½" (12.5mm)	35-85	-	58-80	-	90-100	100	-	-	-
⅜" (9.5mm)	-	-	-	56-80	-	90-100	100	-	-
Nº4 (4.75mm)	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	90-100	-	100
Nº8 (2.36mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-68	65-100	-	90-100
Nº16 (1.18mm)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
Nº30 (0.600mm)	-	-	-	-	-	-	35-65	-	70-95
Nº50 (0.300mm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
Nº100 (0.150mm)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
Nº200 (0.075mm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	-	9-20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla									
	2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	6-12	6-12	7-12	8-12

Fuente: Tomada de (Anguas et al., 2004)

La Columna de ¾" (19mm) es la adoptada, esto debido a que el tamaño máximo nominal de los agregados es ¾" y el porcentaje que pasa el tamiz 1" para la grava y gravilla es 100%.

3.3.2.2 Combinación de agregados.

Se obtiene los porcentajes de cada uno de los agregados utilizando la siguiente fórmula:

$$P = Aa + Bb + Cc + Dd + etc$$

Donde:

P = Porcentaje de material que pasa un tamiz dado, para los agregados A, B, C, etc., combinados.

$A, B, C, etc.$ = Porcentajes de material que pasa un tamiz dado para los agregados A, B, C, etc.

$a, b, c, etc.$ = Proporciones de agregados A, B, C, etc., usados en la combinación y en donde el total es 1.0 dichos porcentajes serán obtenidos por el método de tanteo.

Tarija.

Los porcentajes de combinación obtenidos por medio de tanteo son:

- $a = 24\%$ para la grava
- $b = 17\%$ para la gravilla
- $c = 55\%$ para la arena
- $d = 4\%$ para el filler

Tupiza.

Los porcentajes de combinación obtenidos por medio de tanteo son:

- $a = 24\%$ para la grava
- $b = 17\%$ para la gravilla
- $c = 55\%$ para la arena
- $d = 4\%$ para el filler

Tabla.70. Combinación de agregados Tarija.

Tamices	tamaño (mm)	Grava * Peso Ret. (gr)	Gravilla * Peso Ret. (gr)	Arena * Peso Ret. (gr)	Filler * Peso Ret. (gr)	DOSIFICACIÓN				CURVA DE DOSIFICACIÓN				Especificaciones	
						Grava (%)	Gravilla (%)	Arena (%)	Filler (%)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
						24.00	17.00	55.00	4.00					Mínimo	Máximo
1"	25.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.0	505.9	0.0	0.0	0.0	121.42	0.00	0.00	0.00	121.42	121.42	2.43	97.57	90	100
1/2"	12.5	2352.5	7.1	0.0	0.0	564.60	1.21	0.00	0.00	565.81	687.22	13.74	86.26		
3/8"	9.50	1294.2	18.3	0.0	0.0	310.61	3.11	0.00	0.00	313.72	1000.94	20.02	79.98	56	80
1/4"	6.30	791.8	2027.7	0.0	0.0	190.03	344.71	0.00	0.00	534.74	1535.68	30.71	69.29		
Nº4	4.75	47.3	2038.1	10.0	0.0	11.35	346.48	5.50	0.00	363.33	1899.01	37.98	62.02	35	65
Nº8	2.36	8.2	829.1	959.0	0.0	1.97	140.95	527.45	0.00	670.37	2569.38	51.39	48.61	23	49
Nº16	1.18	0.0	22.9	796.0	0.0	0.00	3.89	437.80	0.00	441.69	3011.07	60.22	39.78		
Nº40	0.60	0.0	56.8	1133.0	0.0	0.00	9.66	623.15	0.00	632.81	3643.88	72.88	27.12		
Nº50	0.30	0.0	0.0	898.0	0.0	0.00	0.00	493.90	0.00	493.90	4137.78	82.76	17.24	5	19
Nº100	0.15	0.0	0.0	970.0	0.0	0.00	0.00	533.50	0.00	533.50	4671.28	93.43	6.57		
Nº200	0.075	0.0	0.0	202.0	0.0	0.00	0.00	111.10	0.00	111.10	4782.38	95.65	4.35	2	8
BASE	-	0.0	0.0	32.0	5000.0	0.00	0.00	17.60	200.00	217.60	4999.98	100.00	0.00		
PESO TOTAL		5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	1200.0	850.00	2750.00	200.00	5000.0					

(*) = Pesos retenidos que se obtienen de las curvas granulométricas de cada tipo de agregado, referidas a un peso total de 5.000 gramos.

Fuente: Elaboración Propia

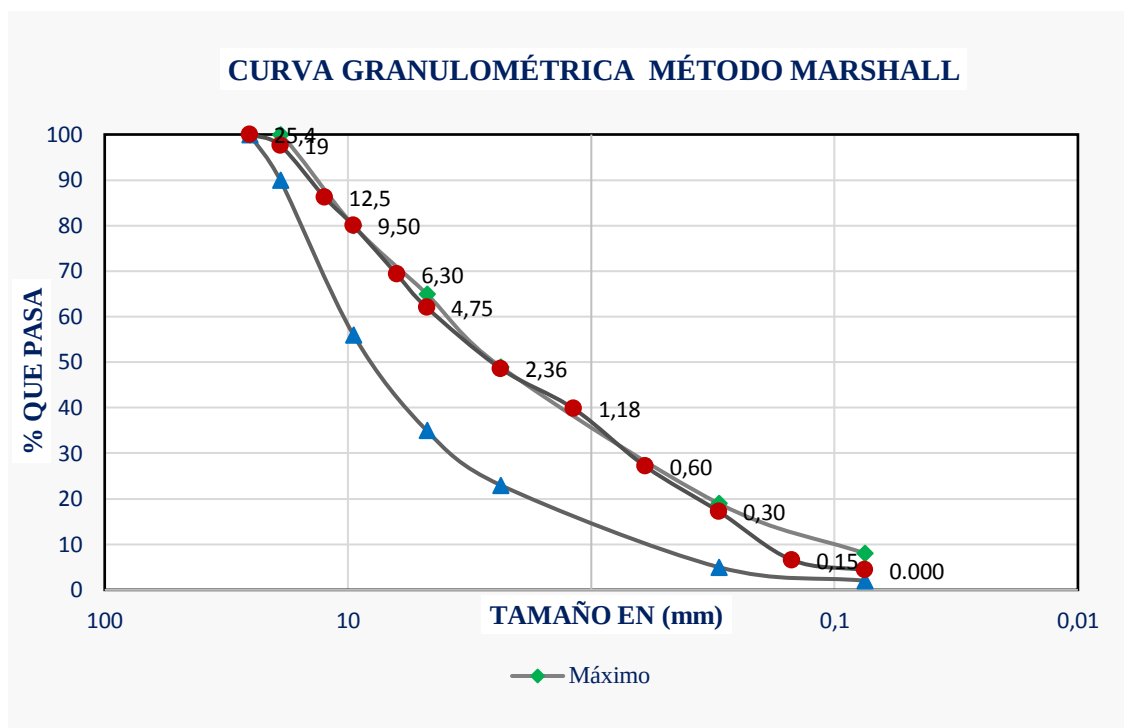
Tabla.71. Combinación de agregados Tupiza.

Tamices	tamaño (mm)	Grava *	Gravilla *	Arena *	Filler *	DOSIFICACIÓN				CURVA DE DOSIFICACIÓN				Especificaciones	
						Grava	Gravilla	Arena	Filler	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
						(%) 18.00	(%) 10.00	(%) 68.00	(%) 4.00	100.00				Mínimo	Máximo
1"	25.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.0	477.6	0.0	0.0	0.0	85.97	0.00	0.00	0.00	85.97	85.97	4.43	95.57	90	100
1/2"	12.5	3082.6	3.3	0.0	0.0	554.87	0.33	0.00	0.00	555.20	641.17	33.05	66.95	-	-
3/8"	9.50	1147.1	12.1	0.0	0.0	206.48	1.21	0.00	0.00	207.69	848.85	43.76	56.24	56	80
1/4"	6.30	265.4	1446.7	0.0	0.0	47.77	144.67	0.00	0.00	192.44	1041.30	53.68	46.32	-	-
Nº4	4.75	11.8	1686.3	2.1	0.0	2.12	168.63	1.43	0.00	172.18	1213.48	62.55	37.45	35	65
Nº8	2.36	15.5	1715.5	167.2	0.0	2.79	171.55	113.70	0.00	288.04	1501.51	77.40	22.60	23	49
Nº16	1.18	0.0	127.7	161.5	0.0	0.00	12.77	109.82	0.00	122.59	1624.10	83.72	16.28	-	-
Nº40	0.60	0.0	8.4	51.9	0.0	0.00	0.84	35.29	0.00	36.13	1660.24	85.58	14.42	-	-
Nº50	0.30	0.0	0.0	30.5	0.0	0.00	0.00	20.74	0.00	20.74	1680.98	86.65	13.35	5	19
Nº100	0.15	0.0	0.0	4.8	0.0	0.00	0.00	3.26	0.00	3.26	1684.24	86.82	13.18	-	-
Nº200	0.075	0.0	0.0	81.6	0.0	0.00	0.00	55.49	0.00	55.49	1739.73	89.68	8.32	2	8
BASE	-	0.0	0.0	0.4	5000.0	0.00	0.00	0.27	200.00	200.27	1940.00	100.00	0.00	-	-
PESO TOTAL		5000.0	5000.0	500.0	5000.0	900.0	500.00	340.00	200.00	1940.0					

(*) = Pesos retenidos que se obtienen de las curvas granulométricas de cada tipo de agregado, referidas a un peso total de 5.000 gramos.

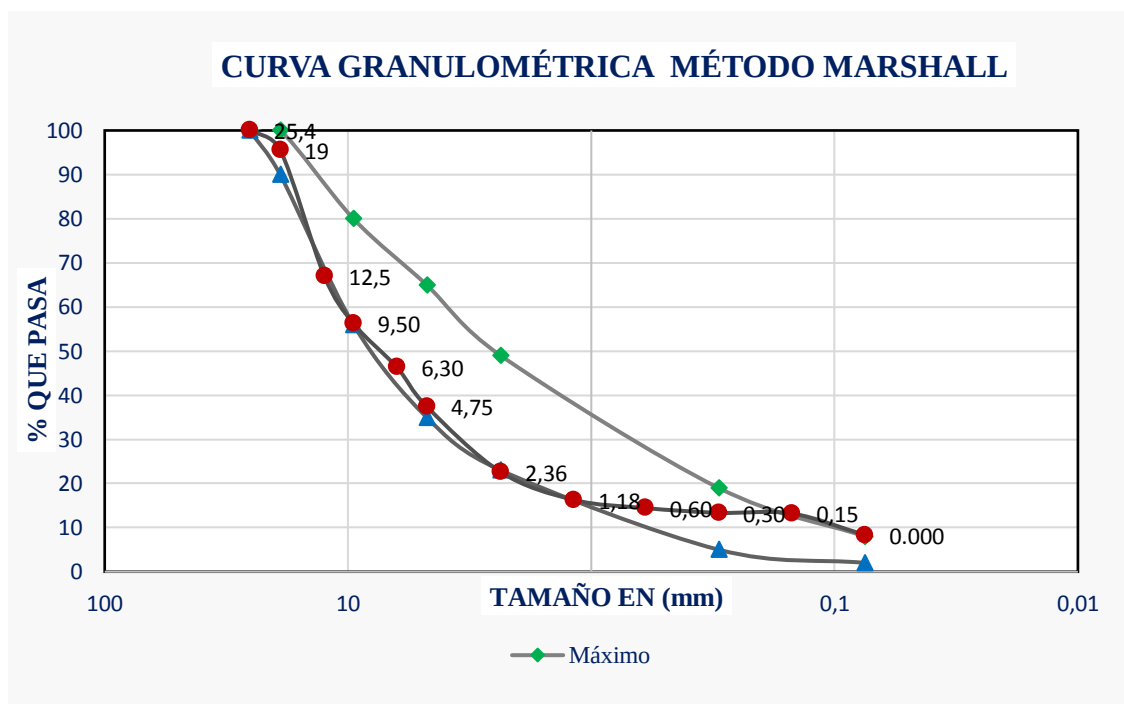
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 14. Curva Granulométrica de la dosificación Tarija.



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 15. Curva Granulométrica de la dosificación Tupiza.



Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.3 Contenido mínimo de asfalto.

El procedimiento para calcular el contenido mínimo de asfalto en el proyecto de mezclas asfálticas, por medio de fórmulas empíricas y su aplicación en el control de la elaboración de las mismas. Se calculará por el método 1 como indica (José Rodríguez, 1982)

Cálculo del contenido mínimo de asfalto en materiales graduados que contienen finos.

- 1) Se estima la superficie total del agregado pétreo en función de su granulometría.
- 2) Conocida el área total para 1 kg., se obtendrá el contenido mínimo de asfalto multiplicando dicho valor por el índice asfáltico.
- 3) Para calcular la superficie total del agregado se emplearán las constantes de área que se dan en la tabla 72.

Tabla.72. Tabla de constantes de área.

MATERIAL		Constante de área m ² /kg
Pasa Malla	Se retiene en malla	
38,1 (1 ½")	19,05 (¾")	0.27
19,05 (¾")	Número 4	0.41
Número 4	Número 40	2.05
Número 40	Número 200	15.38
Número 200		53.3

Fuente: Manual de Pavimentos Asfálticos (Rodríguez, 1982)

- 4) La determinación del porcentaje de asfalto se hará calculando los contenidos parciales para los tamaños señalados en la tabla 69, multiplicando el porcentaje de material de cada tamaño por la constante de área correspondiente, y este producto se multiplicará por el índice asfáltico que debe aplicarse a cada una de las fracciones. La suma de los contenidos parciales dará el contenido total de la muestra. El valor del índice asfáltico varía con la rugosidad y porosidad del agregado pétreo, aplicándose los valores medios que se dan en la tabla 73 de este inciso.

Tabla.73. Tabla de valores de índice asfáltico

MATERIAL	ÍNDICE ASFÁLTICO
Gravas o arenas de río o material redondeado, de baja absorción	0.0055

Gravas angulosas o redondeadas, trituradas, de baja absorción	0.0060
Gravas angulosas o redondeadas, de alta absorción y rocas trituradas de absorción media	0.0070
Rocas trituradas de alta absorción	0.0080

Fuente: Manual de Pavimentos Asfálticos (Rodríguez, 1982)

Tabla.74. Contenido Mínimo de Asfalto (Tarija – La Pintada)

Tamiz		Cantidad de material	Cortante de área	Superficie parcial del agregado	Índice asfáltico	Contenido parcial de asfalto
Pasa	Retenido	(%)	(m ² /kg)	(m ²)	(adm)	(kg/kg)
1 1/2"	3/4"	2.43	0.27	0.007	0.0070	0.0000
3/4"	Nº 4	35.55	0.41	0.146	0.0070	0.0010
Nº 4	Nº 40	34.90	2.05	0.715	0.0070	0.0050
Nº 40	Nº 200	22.77	15.38	3.502	0.0070	0.0245
Nº 200	-	4.35	53.30	2.320	0.0070	0.0162
Sumatoria		100.00				0.0468

Contenido mínimo de asfalto = 4.68%

Fuente: Elaboración Propia

Este valor se encuentra dentro el rango de ASTM D3515 ya que debe estar entre 4 y 10%.

Tabla.75. Contenido Mínimo de Asfalto (Tupiza – Río Blanco)

Tamiz		Cantidad de material	Contante de área	Superficie parcial del agregado	Índice asfáltico	Contenido parcial de asfalto
Pasa	Retenido	(%)	(m ² /kg)	(m ²)	(adm)	(kg/kg)
1 1/2"	3/4"	4.43	0.27	0.012	0.0070	0.0001
3/4"	Nº 4	58.12	0.41	0.238	0.0070	0.0017
Nº 4	Nº 40	23.03	2.05	0.472	0.0070	0.0033
Nº 40	Nº 200	4.10	15.38	0.630	0.0070	0.0044
Nº 200	-	10.32	53.30	5.502	0.0070	0.0385
Sumatoria		100.00				0.0480

Contenido mínimo de asfalto = 4.80%

Fuente: Elaboración Propia

Este valor se encuentra dentro el rango de ASTM D3515 ya que debe estar entre 4 y 10%. Debido a que los valores son casi aproximados se iniciará ambos con 4.5% y ascendiendo en un incremento de 0.5% hasta obtener cinco porcentajes de asfalto para encontrar el asfalto óptimo. Además, este valor aproximado servirá como un parámetro de inicio para la comparación entre el asfalto convencional y el asfalto modificado Tipo I (PG 76-28).

3.3.2.4 Combinación de la mezcla asfáltica.

Para la dosificación de la mezcla se cuenta con los porcentajes de los agregados, dichos porcentajes suman 100% sin contar con el porcentaje de asfalto esto quiere decir que se debe modificar los porcentajes de los agregados. Para realizar esta modificación utilizaremos la siguiente fórmula:

$$\%Agregado\ corregido = 100\% - \%Cemento\ asfáltico \times \frac{\%Agregado}{100}$$

Tarija.

Contamos con los siguientes porcentajes de agregado:

- Grava 24%
- Gravilla 17%
- Arena 55%
- Filler 4%
- Asfalto Convencional y Modificado 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5% y 7%

$$\%Grava\ corregido = 100\% - 4.5\% \times \frac{24\%}{100} \qquad \%Grava\ corregido = 22.9\%$$

$$\%Gravilla\ corregido = 100\% - 4.5\% \times \frac{17\%}{100} \qquad \%Gravilla\ corregido = 16.2\%$$

$$\%Arena\ corregido = 100\% - 4.5\% \times \frac{55\%}{100} \qquad \%Arena\ corregido = 52.5\%$$

$$\%Filler\ corregido = 100\% - 4.5\% \times \frac{4\%}{100} \qquad \%Filler\ corregido = 3.8\%$$

$$\%Cemento\ asfáltico = 4.5\%$$

Los nuevos porcentajes obtenidos serán los empleados en la dosificación de la mezcla, para la elaboración de las probetas se utilizará 1200g en peso total.

$$Peso\ de\ los\ agregados\ para\ la\ mezcla = 1200 \times \frac{\% Agregados}{100}$$

$$Peso\ grava = 1200g \times \frac{22,9\%}{100\%}$$

$$Peso\ grava = 275.04\ g$$

$$\text{Peso gravilla} = 1200g \times \frac{16.2\%}{100\%}$$

$$\text{Peso gravilla} = 194.88 \text{ g}$$

$$\text{Peso arena} = 1200g \times \frac{52.5\%}{100\%}$$

$$\text{Peso arena} = 630.36 \text{ g}$$

$$\text{Peso filler} = 1200g \times \frac{3.8\%}{100\%}$$

$$\text{Peso filler} = 45.84 \text{ g}$$

En el caso del cemento asfáltico se realizó la corrección por pérdida de asfalto en recipiente de mezclado:

$$\text{Peso asfalto} = 1200g \times \frac{4.5\%}{100\% - 4.5\%}$$

$$\text{Peso asfalto} = 54.00 \text{ g}$$

Tabla.76. Dosificación de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con agregados de Tarija con 4.5%, 5% 5,5%, 6% 6,5% y 7%

Mezcla asfáltica	Dosificación			Mezcla asfáltica	Dosificación		
	Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200		Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200
CA		4.5	54.00	CA		5	60.00
GRAVA	24.00	22.9	275.04	GRAVA	24.00	22.80	273.60
GRAVILLA	17.00	16.2	194.88	GRAVILLA	17.00	16.15	193.80
ARENA	55.00	52.5	630.36	ARENA	55.00	52.25	627.00
FILLER	4.00	3.8	45.84	FILLER	4.00	3.80	45.60
TOTAL			1200	TOTAL			1200
Mezcla asfáltica	Dosificación			Mezcla asfáltica	Dosificación		
	Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200		Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200
CA		5.5	66.00	CA		6	72.00
GRAVA	24.00	22.7	272.16	GRAVA	24.00	22.56	270.72
GRAVILLA	17.00	16.1	192.84	GRAVILLA	17.00	15.98	191.76
ARENA	55.00	52.0	623.76	ARENA	55.00	51.70	620.40
FILLER	4.00	3.8	45.36	FILLER	4.00	3.76	45.12
TOTAL			1200	TOTAL			1200
Mezcla asfáltica	Dosificación			Mezcla asfáltica	Dosificación		
	Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200		Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200
CA		6.5	78.00	CA		7	84.00
GRAVA	24.00	22.4	269.28	GRAVA	24.00	22.32	267.84
GRAVILLA	17.00	15.9	190.80	GRAVILLA	17.00	15.81	189.72
ARENA	55.00	51.4	617.16	ARENA	55.00	51.15	613.80
FILLER	4.00	3.7	44.88	FILLER	4.00	3.72	44.64
TOTAL			1200	TOTAL			1200

Fuente: Elaboración Propia.

Tupiza.

Contamos con los siguientes porcentajes de agregado:

- Grava 18%
- Gravilla 10%
- Arena 68%
- Filler 4%
- Asfalto Convencional y Modificado 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5% y 7%

Tabla.77. Dosificación de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con agregados de Tupiza con 4.5%, 5% 5,5%, 6% 6,5% y 7%

Mezcla asfáltica	Dosificación			Mezcla asfáltica	Dosificación		
	Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200		Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200
CA		4.5	54.00	CA		5	60.00
GRAVA	18.00	17.2	206.28	GRAVA	18.00	17.10	205.20
GRAVILLA	10.00	9.6	114.60	GRAVILLA	10.00	9.50	114.00
ARENA	68.00	64.9	779.28	ARENA	68.00	64.60	775.20
FILLER	4.00	3.8	45.84	FILLER	4.00	3.80	45.60
TOTAL			1200	TOTAL			1200
Mezcla asfáltica	Dosificación			Mezcla asfáltica	Dosificación		
	Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200		Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200
CA		5.5	66.00	CA		6	72.00
GRAVA	18.00	17.0	204.12	GRAVA	18.00	16.92	203.04
GRAVILLA	10.00	9.5	113.40	GRAVILLA	10.00	9.40	112.80
ARENA	68.00	64.3	771.12	ARENA	68.00	63.92	767.04
FILLER	4.00	3.8	45.36	FILLER	4.00	3.76	45.12
TOTAL			1200	TOTAL			1200
Mezcla asfáltica	Dosificación			Mezcla asfáltica	Dosificación		
	Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200		Agregado %	Mezcla	peso (gr)1200
CA		6.5	78.00	CA		7	84.00
GRAVA	18.00	16.8	201.96	GRAVA	18.00	16.74	200.88
GRAVILLA	10.00	9.4	112.20	GRAVILLA	10.00	9.30	111.60
ARENA	68.00	63.6	762.96	ARENA	68.00	63.24	758.88
FILLER	4.00	3.7	44.88	FILLER	4.00	3.72	44.64
TOTAL			1200	TOTAL			1200

Fuente: Elaboración Propia

3.3.3 Número de probetas.

El número de probetas mínimo para preparar son tres para cada contenido de asfalto.

3.3.4 Procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente utilizando el método Marshall (ASTM D-1559; AASTHO T-245-97; ABC A0608).

3.3.4.1 Elaboración de probetas.

Figura.26. Briquetas con Asfalto Convencional y Briqueta con Asfalto modificado



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024

Para la preparación de las probetas, se siguieron estos pasos:

- El agregado se calienta a una temperatura de 110°C.
- Se pesan las diferentes fracciones del agregado de acuerdo con la dosificación establecida para los distintos porcentajes de cemento asfáltico. Luego, estas fracciones se llevan al horno hasta que alcanzan una temperatura aproximada de 30°C por encima de la temperatura de mezclado.
- El cemento asfáltico se calienta hasta que llega a la temperatura adecuada para la mezcla.

- El agregado caliente se coloca en un recipiente para mezclado y se revuelve de manera uniforme. Posteriormente, se forma un cráter en el centro del agregado y se pesa la cantidad exacta de cemento asfáltico de acuerdo con la dosificación. A continuación, el agregado se mezcla con el cemento asfáltico hasta que quede completamente recubierto.
- Los moldes y varillas se calientan antes de su uso, y se coloca papel dentro del molde para evitar que la mezcla se adhiera.

Figura.27. Mezclado de agregado y asfalto, compactación de briquetas.



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024

- La compactación se lleva a cabo siguiendo las especificaciones del Instituto de Asfalto. El número de golpes varía según el tipo de tránsito. Para este estudio, se utilizarán las especificaciones para tránsito pesado del Instituto de Asfaltos, que indican que se deben realizar 75 golpes por cada cara, compactando con un martillo de compactación que tiene una caída libre de 18 pulgadas.
- La mezcla asfáltica se introduce en los moldes y se utiliza una varilla para acomodarla, aplicando 15 golpes en el perímetro y 10 golpes en el centro. Antes de compactar, se verifica que la temperatura esté dentro de los límites establecidos.

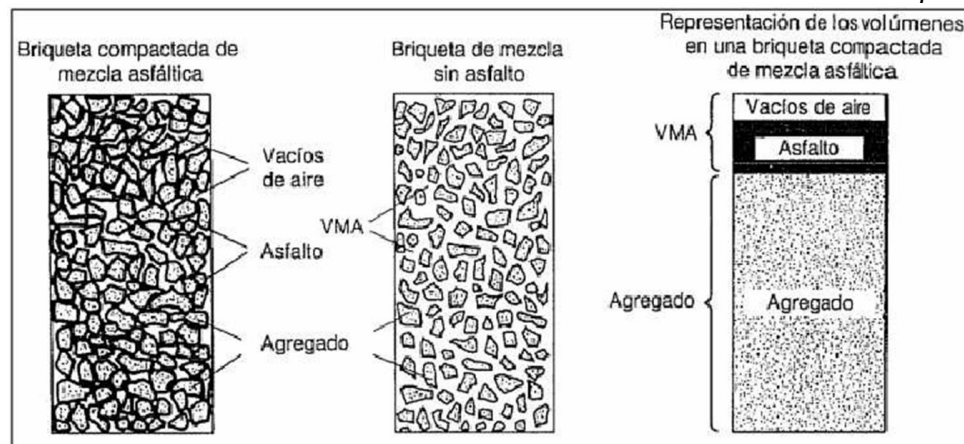
Figura.28. Compactación y Desmolde de la briqueta.



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024

3.3.4.2 Determinación de la densidad y vacíos.

Ilustración.1. Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada



Fuente: Tomada de INSTITUTO CHILENO DEL ASFALTO,
Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en
Caliente. Santiago de Chile: (Asphalt Institute, 1992)

Las propiedades volumétricas de mezclas compactadas nos dan un indicativo del probable comportamiento del pavimento en servicio, dichas propiedades volumétricas son:

- Vacíos de aire (Va).
- Vacíos en el agregado mineral (VAM).
- Vacíos llenos con asfalto (VAF).
- Contenido de asfalto efectivo (Pbe).

3.3.4.3 *Peso específico Neto del agregado Total.*

Como la mezcla de cemento asfáltico se encuentra compuesta por fracciones de distintos agregados el peso específico neto se calcula con la siguiente fórmula:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \dots \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4} \dots \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

G_{sb} = Peso específico neto para el agregado total.

$G_1, G_2, \dots G_n$ = Peso específico de los agregados.

$P_1, P_2, \dots P_n$ = Porcentajes de pesos de los agregados.

Para los agregados de Tarija (La Pintada):

$$G_{sb} = \frac{24\% + 17\% + 55\% + 4\%}{\frac{24\%}{2.67} + \frac{17\%}{2.71} + \frac{55\%}{2.63} + \frac{4\%}{2.78}}$$

$$G_{sb} = 2.66$$

Para los agregados de Tupiza (Río Blanco):

$$G_{sb} = \frac{18\% + 10\% + 68\% + 4\%}{\frac{18\%}{2.58} + \frac{10\%}{2.70} + \frac{68\%}{2.61} + \frac{4\%}{2.78}}$$

$$G_{sb} = 2.62$$

3.3.4.4 *Peso específico Bulk (ASTM D-1188 / AASHTO T166).*

El peso específico Bulk se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$G_{rm} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A= Peso seco al aire de una briqueta.

B= Peso Saturado superficialmente seco de la briqueta.

C= Peso sumergido de la briqueta.

En la siguiente figura se muestra el ensayo realizado:

Figura.29. Equipo, peso de la briqueta sumergida.



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024

3.3.4.5 *Peso específico máximo teórico de la mezcla asfáltica.*

El peso específico máximo teórico se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$G_{mt} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{100 - P_b}{G_{sb}}}$$

Donde:

G_{mt} =Peso específico máximo teórico de la mezcla asfáltica.

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

P_b =Contenido de asfalto, porcentaje total del peso de la mezcla.

G_{sb} =Peso específico neto para el agregado total.

G_b =Peso específico del asfalto.

3.3.4.6 *Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla:*

El porcentaje de vacíos consiste en los pequeños espacios de aire entre partículas de agregado en una mezcla asfáltica compactada, el porcentaje de vacíos podemos determinar con la siguiente fórmula:

$$V_a = \frac{G_{mm} - G_{rm}}{G_{mm}} \times 100$$

Donde:

V_a = Vacíos de aire en la mezcla compactada.

G_{mm} = Peso específico máximo de la mezcla asfáltica.

G_{rm} = Peso específico real promedio.

3.3.4.7 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

EL porcentaje de vacíos de agregado mineral se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$VAM = V_a + \frac{P_b \times G_{rm}}{G_b}$$

Donde:

VAM = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

V_a = Vacíos de aire en la mezcla compactada.

G_{rm} = Peso específico real promedio.

G_b = Peso específico del asfalto.

3.3.4.8 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto se puede calcular utilizando a siguiente fórmula:

$$VFA = \frac{VAM - V_a}{VAM}$$

Donde:

VFA = Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

VAM = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

V_a = Vacíos de aire en la mezcla compactada.

3.3.4.9 Factores de corrección de la estabilidad.

Los factores de corrección de la estabilidad están en función a las alturas de las probetas, cuando se tiene alturas mayores a 6,35cm el factor de corrección disminuye la estabilidad ya que el factor es menor a 1, para alturas menores a 6,35 el factor de corrección aumenta la estabilidad.

Tabla.78. Factores de corrección de la estabilidad

Altura aproximada de la Probeta	Factor de corrección	Altura aproximada de la Probeta	Factor de corrección	Altura aproximada de la Probeta	Factor de corrección	Altura aproximada de la Probeta	Factor de corrección	Altura aproximada de la Probeta	Factor de corrección	Altura aproximada de la Probeta	Factor de corrección	Altura aproximada de la Probeta	Factor de corrección
5,61	1,231	5,91	1,131	6,21	1,037	6,51	0,96	6,81	0,895	7,11	0,8376	7,41	0,79
5,62	1,228	5,92	1,128	6,22	1,035	6,52	0,9581	6,82	0,8925	7,12	0,8357	7,42	0,788
5,63	1,224	5,93	1,124	6,23	1,032	6,53	0,9563	6,83	0,89	7,13	0,8338	7,43	0,786
5,64	1,22	5,94	1,121	6,24	1,029	6,54	0,9544	6,84	0,8863	7,14	0,832	7,44	0,784
5,65	1,216	5,95	1,118	6,25	1,027	6,55	0,9525	6,85	0,8844	7,15	0,83	7,45	0,782
5,66	1,213	5,96	1,115	6,26	1,024	6,56	0,9507	6,86	0,8825	7,16	0,8288	7,46	0,78
5,67	1,209	5,97	1,112	6,27	1,021	6,57	0,9488	6,87	0,8807	7,17	0,8275	7,47	0,7788
5,68	1,205	5,98	1,109	6,28	1,019	6,58	0,9469	6,88	0,8788	7,18	0,8263	7,48	0,7775
5,69	1,201	5,99	1,106	6,29	1,016	6,59	0,945	6,89	0,8788	7,19	0,825	7,49	0,7763
5,7	1,198	6	1,103	6,3	1,013	6,6	0,9432	6,9	0,8769	7,2	0,8238	7,5	0,775
5,71	1,194	6,01	1,099	6,31	1,011	6,61	0,9413	6,91	0,875	7,21	0,8225	7,51	0,7738
5,72	1,19	6,02	1,096	6,32	1,008	6,62	0,9394	6,92	0,8732	7,22	0,8213	7,52	0,7725
5,73	1,187	6,03	1,093	6,33	1,005	6,63	0,9376	6,93	0,8713	7,23	0,82	7,53	0,7713
5,74	1,184	6,04	1,09	6,34	1,003	6,64	0,9357	6,94	0,8694	7,24	0,8188	7,54	0,77
5,75	1,181	6,05	1,087	6,35	1	6,65	0,9338	6,95	0,8676	7,25	0,8175	7,55	0,7688
5,76	1,178	6,06	1,084	6,36	0,9975	6,66	0,9319	6,96	0,8657	7,26	0,8163	7,56	0,7675
5,77	1,174	6,07	1,081	6,37	0,885	6,67	0,93	6,97	0,8638	7,27	0,815	7,57	0,7663
5,78	1,171	6,08	1,078	6,38	0,9925	6,68	0,9275	6,98	0,862	7,28	0,8138	7,58	0,766
5,79	1,168	6,09	1,074	6,39	0,99	6,69	0,925	6,99	0,86	7,29	0,8125	7,59	0,7638
5,8	1,165	6,1	1,071	6,4	0,9875	6,7	0,9225	7	0,8581	7,3	0,813	7,6	0,7625
5,81	1,162	6,11	1,068	6,41	0,985	6,71	0,92	7,01	0,8563	7,31	0,81	7,61	0,7613
5,82	1,159	6,12	1,065	6,42	0,9825	6,72	0,9175	7,02	0,8544	7,32	0,808	7,62	0,76
5,83	1,156	6,13	1,062	6,43	0,98	6,73	0,915	7,03	0,8525	7,33	0,806	7,63	0,7588
5,84	1,153	6,14	1,059	6,44	0,9775	6,74	0,9125	7,04	0,8507	7,34	0,804	7,64	0,7575
5,85	1,149	6,15	1,056	6,45	0,975	6,75	0,91	7,05	0,8488	7,35	0,802		
5,86	1,146	6,16	1,053	6,46	0,9725	6,76	0,9075	7,06	0,8469	7,36	0,8		
5,87	1,143	6,17	1,049	6,47	0,97	6,77	0,905	7,07	0,845	7,37	0,798		
5,88	1,14	6,18	1,046	6,48	0,9675	6,78	0,9025	7,08	0,8431	7,38	0,796		
5,89	1,137	6,19	1,043	6,49	0,965	6,79	0,9	7,09	0,8413	7,39	0,794		
5,9	1,134	6,2	1,04	6,5	0,9625	6,8	0,8975	7,1	0,8394	7,4	0,792		

Fuente: Estudio de Materiales Calizos como Agregado Grueso en Mezclas, (Josephia, n.d.)

3.3.4.10 Ensayo de Estabilidad y Flujo.

- Se debe colocar las probetas en agua a una temperatura de 60°C durante un tiempo de 30 o 40 min.
- Se saca la probeta del agua secando cuidadosamente la superficie, se coloca la probeta en la mordaza y centramos el conjunto en el aparato de carga.

- Se aplica la carga a la probeta a una velocidad de deformación de 51 mm por minuto, hasta que produzca la falla, el punto de falla es la carga máxima se toma la lectura del flujo cuando la carga llegue a la falla, este ensayo no debe durar más de 30 segundos.

Figura.30. Briquetas en agua a 60°C.



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024

Figura.31. Mordaza y aparato de carga.



Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de asfaltos 2024

3.3.4.11 Especificaciones para el diseño de la mezcla.

Se prepararán probetas con determinados contenidos de asfalto de los cuales se elaborarán gráficas donde se diagramarán los siguientes valores:

- Estabilidad.
- Fluencia
- Densidad.
- Porcentaje de vacíos mezcla
- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (V.A.M.)
- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (V.F.A.)

Tabla.79. Especificaciones en zonas convencionales

Criterios de diseño para zonas convencionales		
Características	Tráfico	
	Pesado	
	Mín.	Máx.
Nº de golpes de compactación en cada cara de la briqueta	75	-
Estabilidad (lb)	1800	-
Flujo (8-14) (0,01")	8	14
Porcentaje de vacíos en la mezcla %	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales %	12	-
Porcentaje de vacíos en relleno de asfalto %	65	75

*Fuente: Tomada de INSTITUTO CHILENO DEL ASFALTO,
Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en
Caliente. Santiago de Chile (Asphalt Institute, 1992)*

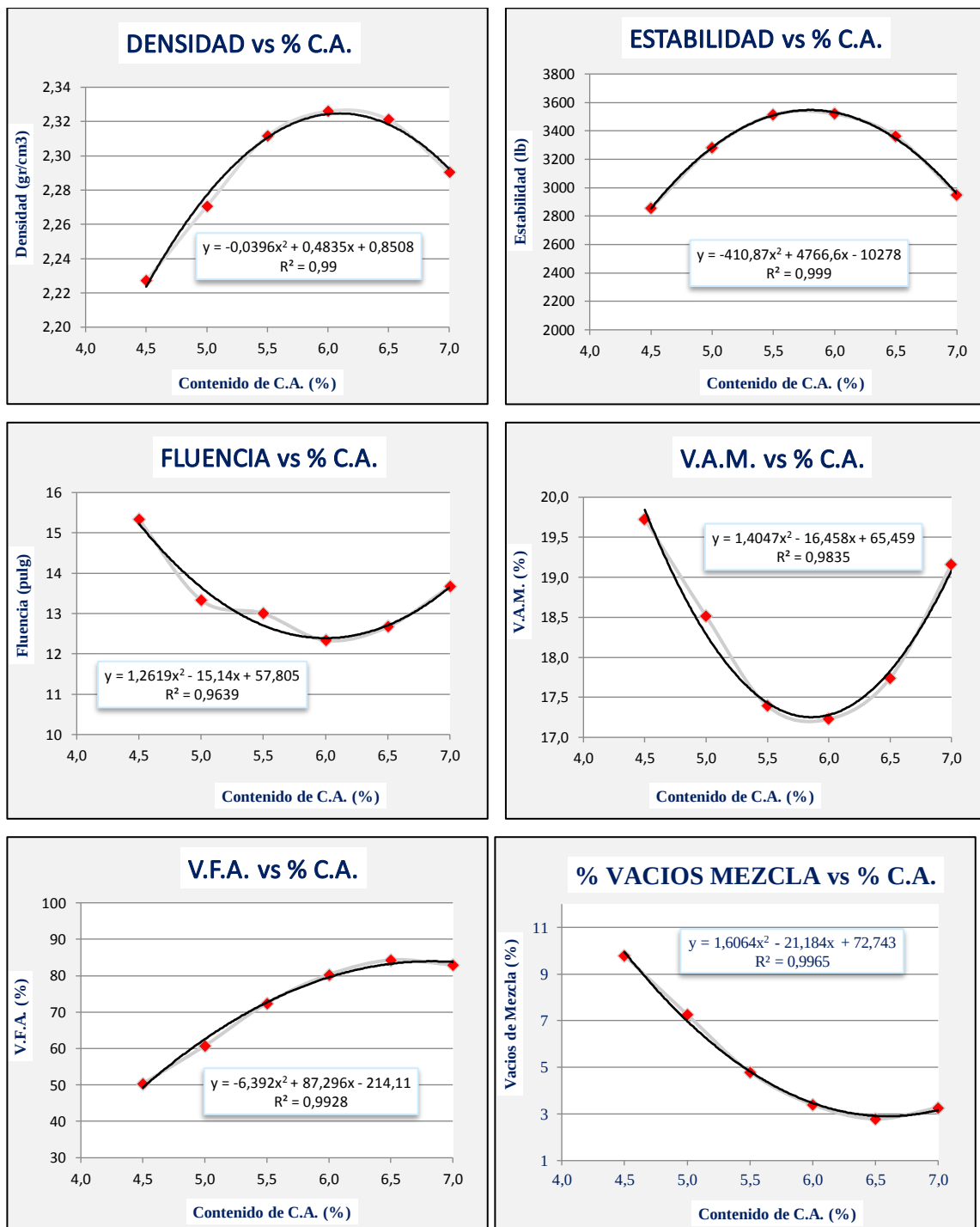
3.3.4.12 Diseño de mezclas asfálticas en caliente método MARSHALL Tarija - Convencional.

Tabla.80. Diseño de mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico convencional con agregados de Tarija.

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base Mezcla	Base Agregados		seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	V.F.A. (vacíos llenos de asfalto)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.	cm3	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4.50	4.71	6.62	1187.2	1187.9	655	532.9	2.23	2.23	2.47	9.79	19.72	50.36	1129	3021.95	0.94	2838.82	2853.71	16	15.33
2			6.63	1185.4	1185.9	654	531.9	2.23						1133	3032.72	0.94	2843.48		15	
3			6.63	1184.9	1185.6	653	532.6	2.22						1147	3070.42	0.94	2878.83		15	
4	5.00	5.26	6.54	1177.4	1178.5	658	520.5	2.26	2.27	2.45	7.26	18.51	60.77	1281	3431.26	0.95	3274.79	3279.37	15	13.33
5			6.55	1178.9	1179.3	661	518.3	2.27						1287	3447.41	0.95	3283.66		13	
6			6.58	1180.2	1180.8	662	518.8	2.27						1293	3463.57	0.95	3279.65		12	
7	5.50	5.82	6.45	1196.3	1196.6	680	516.6	2.32	2.31	2.43	4.79	17.39	72.44	1345	3603.59	0.98	3513.50	3512.57	13	13.00
8			6.44	1194.2	1194.6	678	516.6	2.31						1332	3568.59	0.98	3488.30		13	
9			6.46	1198.4	1199.4	680	519.4	2.31						1357	3635.91	0.97	3535.92		13	
10	6.00	6.38	6.34	1185.6	1186.0	673	513.0	2.31	2.33	2.41	3.40	17.23	80.28	1312	3514.73	1.00	3525.28	3519.19	12	12.33
11			6.32	1175.0	1175.5	671	504.5	2.33						1298	3477.03	1.01	3504.85		13	
12			6.36	1178.6	1179.2	675	504.2	2.34						1320	3536.27	1.00	3527.43		12	
13	6.50	6.95	6.28	1181.7	1182.0	675	507.0	2.33	2.32	2.39	2.79	17.74	84.29	1231	3296.62	1.02	3359.25	3360.79	12	12.67
14			6.31	1188.2	1188.5	676	512.5	2.32						1243	3328.93	1.01	3365.55		13	
15			6.29	1184.5	1184.9	673	511.9	2.31						1234	3304.69	1.02	3357.57		13	
16	7.00	7.53	6.34	1190.0	1190.9	671	519.9	2.29	2.29	2.37	3.27	19.16	82.94	1081	2892.7	1.00	2901.37	2949.30	14	13.67
17			6.34	1187.9	1188.4	665	523.4	2.27						1154	3089.27	1.00	3098.54		13	
18			6.32	1186.8	1187.3	674	513.3	2.31						1056	2825.38	1.01	2847.98		14	

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 16. Mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico convencional con agregados de Tarija.



Fuente: Elaboración Propia

Tabla.81. Datos para las gráficas Marshall del asfalto convencional con agregados de Tarija.

PORCENTAJES DE CEMENTO ASFÁLTICO	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)	% DE VACÍOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.F.A. (vacíos llenos de asfalto)	V.A.M. (VACÍOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4.5	2.2	2853.7	15.3	9.8	50.4	19.7
5.0	2.3	3279.4	13.3	7.3	60.8	18.5
5.5	2.3	3512.6	13.0	4.8	72.4	17.4
6.0	2.3	3519.2	12.3	3.4	80.3	17.2
6.5	2.3	3360.8	12.7	2.8	84.3	17.7
7.0	2.3	2949.3	13.7	3.3	82.9	19.2

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.82. Resultados de Marshall y porcentaje optimo del asfalto convencional con agregados de Tarija.

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO 85-100	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	3546.61	5.80
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.33	6.10
	Vacíos de la mezcla (%)	5.46	5.46
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.79

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.83. Resultados del porcentaje optimo del asfalto convencional con agregados de Tarija.

VERIFICACIÓN DE DISEÑO MARSHAL PARA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL				
CARACTERÍSTICA	Resultado	Instituto de Asfalto (tráfico pesado)		
		Mín.	Máx.	Verificación
Estabilidad, (N)	3473.4	1800		CUMPLE
Flujo, (0,01"), (0,25 mm)	13.87	8	14	CUMPLE
% Vm	4.55	3%	5%	CUMPLE
% VAM	17.78	12%	-	CUMPLE
% V c./Asfalto.	74.46	65%	75%	CUMPLE
% Óptimo de CA 60/70	5.79			

Fuente: Elaboración Propia

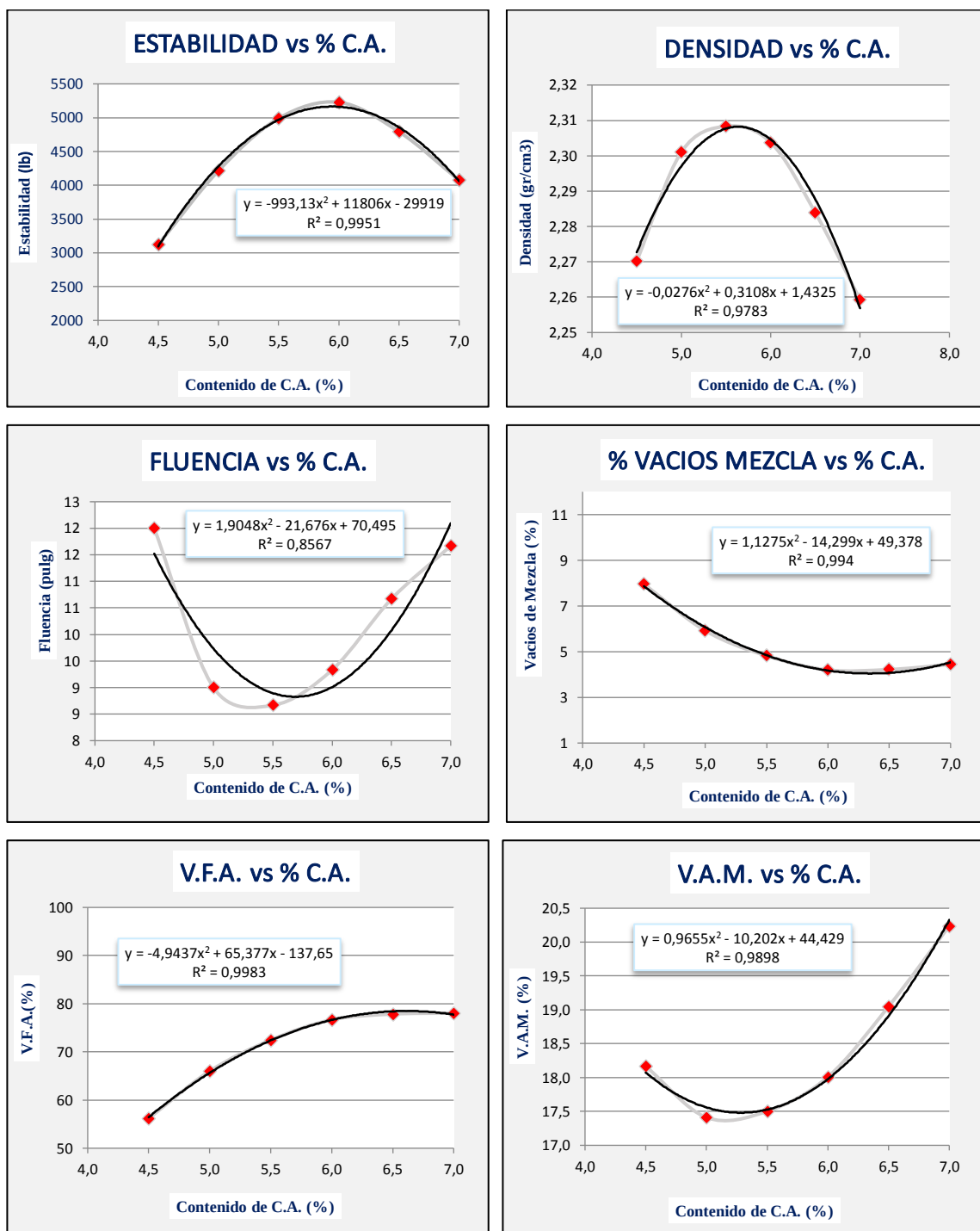
3.3.4.13 Diseño de mezclas asfálticas en caliente método MARSHALL Tarija - Modificado.

Tabla.84. Diseño de mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico modificado con agregados de Tarija.

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	V.F.A. (vacíos llenos de asfalto)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.	cm3	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	14	0,01 pulg
1	4.50	4.71	6.68	1193.6	1194.2	669	525.2	2.27	2.27	2.47	7.96	18.17	56.18	1257	3366.63	0.93	3122.55	3121.58	13	12.00
2			6.64	1188.6	1190.2	666	524.2	2.27						1243	3328.93	0.94	3114.88		12	
3			6.66	1190.1	1192.2	668	524.2	2.27						1253	3355.86	0.93	3127.32		11	
4	5.00	5.26	6.55	1185.4	1186.2	670	516.2	2.30	2.30	2.45	5.92	17.41	66.01	1644	4408.74	0.95	4199.33	4214.58	10	9.00
5			6.57	1187.6	1188.2	673	515.2	2.31						1657	4443.75	0.95	4216.23		8	
6			6.58	1188.8	1189.5	673	516.5	2.30						1665	4465.29	0.95	4228.18		9	
7	5.50	5.82	6.38	1188.5	1189.5	676	513.5	2.31	2.31	2.43	4.82	17.50	72.46	1893	5079.25	0.99	5041.15	4989.68	9	8.67
8			6.35	1186.8	1187.8	673	514.8	2.31						1844	4947.3	1.00	4947.30		9	
9			6.36	1187.6	1189.2	674	515.2	2.31						1861	4993.08	1.00	4980.60		8	
10	6.00	6.38	6.34	1187.2	1188.9	674	514.9	2.31	2.30	2.40	4.20	18.01	76.68	1918	5146.57	1.00	5162.01	5227.94	9	9.33
11			6.36	1194.1	1194.6	676	518.6	2.30						1935	5192.35	1.00	5179.37		9	
12			6.32	1186.3	1187.1	672	515.1	2.30						1975	5300.06	1.01	5342.46		10	
13	6.50	6.95	6.31	1183.3	1183.8	667	516.8	2.29	2.28	2.38	4.22	19.05	77.85	1792	4807.28	1.01	4860.16	4792.28	10	10.67
14			6.29	1177.4	1178.7	663	515.7	2.28						1737	4659.17	1.02	4733.72		11	
15			6.29	1179.7	1180.7	663	517.7	2.28						1755	4707.64	1.02	4782.97		11	
16	7.00	7.53	6.29	1190.3	1190.9	663	527.9	2.25	2.26	2.36	4.44	20.24	78.07	1499	4018.29	1.02	4082.58	4073.13	12	11.67
17			6.28	1188.8	1189.4	663	526.4	2.26						1495	4007.51	1.02	4083.66		12	
18			6.32	1192.4	1193.5	667	526.5	2.26						1500	4020.98	1.01	4053.15		11	

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 17. Mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico modificado con agregados de Tarija



Fuente: Elaboración Propia

Tabla.85. Datos para las gráficas Marshall del asfalto Modificado con agregados de Tarija.

PORCENTAJES DE CEMENTO ASFÁLTICO	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.F.A. (vacíos llenos de asfalto)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4.5	2.3	3121.6	12.0	8.0	56.2	18.2
5.0	2.3	4214.6	9.0	5.9	66.0	17.4
5.5	2.3	4989.7	8.7	4.8	72.5	17.5
6.0	2.3	5227.9	9.3	4.2	76.7	18.0
6.5	2.3	4792.3	10.7	4.2	77.9	19.0
7.0	2.3	4073.1	11.7	4.4	78.1	20.2

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.86. Resultados de Marshall y porcentaje optimo del asfalto modificado con agregados de Tarija.

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO TIPOI (PG76-28)	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	5167.45	5.94
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.31	5.63
	vacíos de la mezcla (%)	6.14	5.46
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.68

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.87. Resultados del porcentaje optimo del asfalto modificado con agregados de Tarija.

VERIFICACIÓN DE DISEÑO MARSHAL PARA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA				
CARACTERÍSTICA	Resultado	Instituto de Asfalto (tráfico pesado)		
		Mín.	Máx.	Verificación
Estabilidad, (N)	5210.6	1800	-	CUMPLE
Flujo, (0,01"), (0,25 mm)	8.90	8	14	CUMPLE
% V _m	4.35	3%	5%	CUMPLE
% V _{AM}	17.47	12%	-	CUMPLE
% V _c /Asfalto.	75.12	65%	75%	CUMPLE
% Óptimo de CA 60/70	5.68			

Fuente: Elaboración Propia

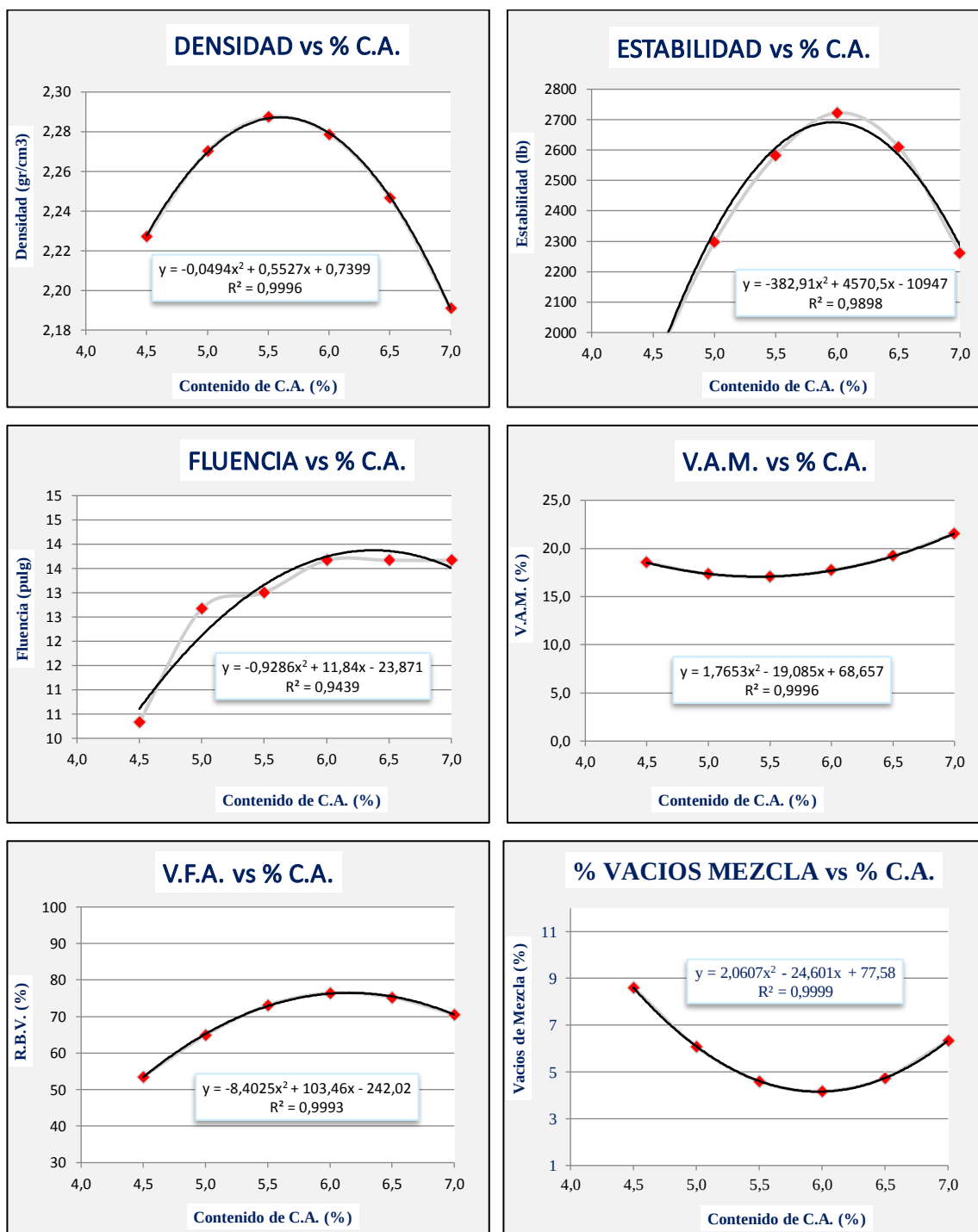
3.3.4.14 Diseño de mezclas asfálticas en caliente método MARSHALL Tupiza - Convencional.

Tabla.88. Diseño de mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico convencional con agregados de Tupiza.

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	V.F.A. (vacíos llenos de asfalto)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.	cm3	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4.50	4.71	6.74	1198.3	1209.5	669	540.5	2.22	2.23	2.44	8.62	18.55	53.55	784	2092.93	0.91	1909.80	1892.18	11	10.33
2			6.72	1193.8	1203.1	665	538.1	2.22						770	2055.23	0.92	1885.68		10	
3			6.70	1189.5	1200.7	671	529.7	2.25						764	2039.08	0.92	1881.05		10	
4	5.00	5.26	6.95	1188.9	1208.9	686	522.9	2.27	2.27	2.42	6.08	17.33	64.90	995	2661.11	0.87	2308.78	2297.34	13	12.67
5			6.92	1183.6	1203.8	681	522.8	2.26						977	2612.64	0.87	2281.36		12	
6			6.94	1186.0	1205.8	684	521.8	2.27						990	2647.65	0.87	2301.87		13	
7	5.50	5.82	6.78	1189.7	1199.6	678	521.6	2.28	2.29	2.40	4.59	17.06	73.08	1063	2844.23	0.90	2566.91	2582.38	13	13.00
8			6.80	1191.2	1202.6	683	519.6	2.29						1080	2890	0.90	2593.78		13	
9			6.79	1190.0	1201.9	682	519.9	2.29						1074	2873.85	0.90	2586.46		13	
10	6.00	6.38	6.58	1204.8	1206.1	679	527.1	2.29	2.28	2.38	4.18	17.73	76.44	1080	2890	0.95	2736.54	2722.42	14	13.67
11			6.56	1201.3	1202.6	674	528.6	2.27						1066	2852.3	0.95	2711.68		13	
12			6.57	1203.1	1204.2	676	528.2	2.28						1071	2865.77	0.95	2719.04		14	
13	6.50	6.95	6.56	1181.0	1183.3	658	525.3	2.25	2.25	2.36	4.75	19.22	75.29	1040	2782.29	0.95	2645.12	2610.08	14	13.67
14			6.55	1178.3	1181.7	655	526.7	2.24						1029	2752.67	0.95	2621.92		13	
15			6.56	1180.7	1182.8	659	523.8	2.25						1008	2696.12	0.95	2563.20		14	
16	7.00	7.53	6.71	1191.2	1204.2	658	546.2	2.18	2.19	2.34	6.34	21.54	70.58	925	2472.62	0.92	2274.81	2261	14	13.67
17			6.69	1186.4	1188.8	651	537.8	2.21						912	2437.61	0.93	2254.79		14	
18			6.68	1189.2	1192.0	648	544.0	2.19						909	2429.53	0.93	2253.39		13	

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 18. Mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico convencional con agregados de Tupiza.



Fuente: Elaboración Propia

Tabla.89. Datos para las gráficas Marshall del asfalto convencional con agregados de Tupiza.

PORCENTAJES DE CEMENTO ASFÁLTICO	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (plg)	% DE VACÍOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.F.A. (vacíos llenos de asfalto)	V.A.M. (VACÍOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4.5	2.2	1892.2	10.3	8.6	53.6	18.5
5.0	2.3	2297.3	12.7	6.1	64.9	17.3
5.5	2.3	2582.4	13.0	4.6	73.1	17.1
6.0	2.3	2722.4	13.7	4.2	76.4	17.7
6.5	2.2	2610.1	13.7	4.8	75.3	19.2
7.0	2.2	2261.0	13.7	6.3	70.6	21.5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.90. Resultados de Marshall y porcentaje optimo del asfalto convencional con agregados de Tupiza.

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO 85-100	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	2741.92	5.97
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.29	5.59
	vacíos de la mezcla (%)	4.62	5.46
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.67

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.91. Resultados del porcentaje optimo del asfalto convencional con agregados de Tupiza.

VERIFICACIÓN DE DISEÑO MARSHAL PARA MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL				
CARACTERISTICA	Resultado	instituto de Asfalto (tráfico pesado)		
		Mín.	Máx.	Verificación
Estabilidad, (N)	2751.5	1800	-	CUMPLE
Flujo, (0,01"), (0,25 mm)	14.60	8	14	CUMPLE
% Vm	3.55	3%	5%	CUMPLE
% VAM	16.51	12%	-	CUMPLE
% V c./Asfalto.	78.72	65%	75%	CUMPLE
% Óptimo de CA 60/70	5.67			

Fuente: Elaboración Propia

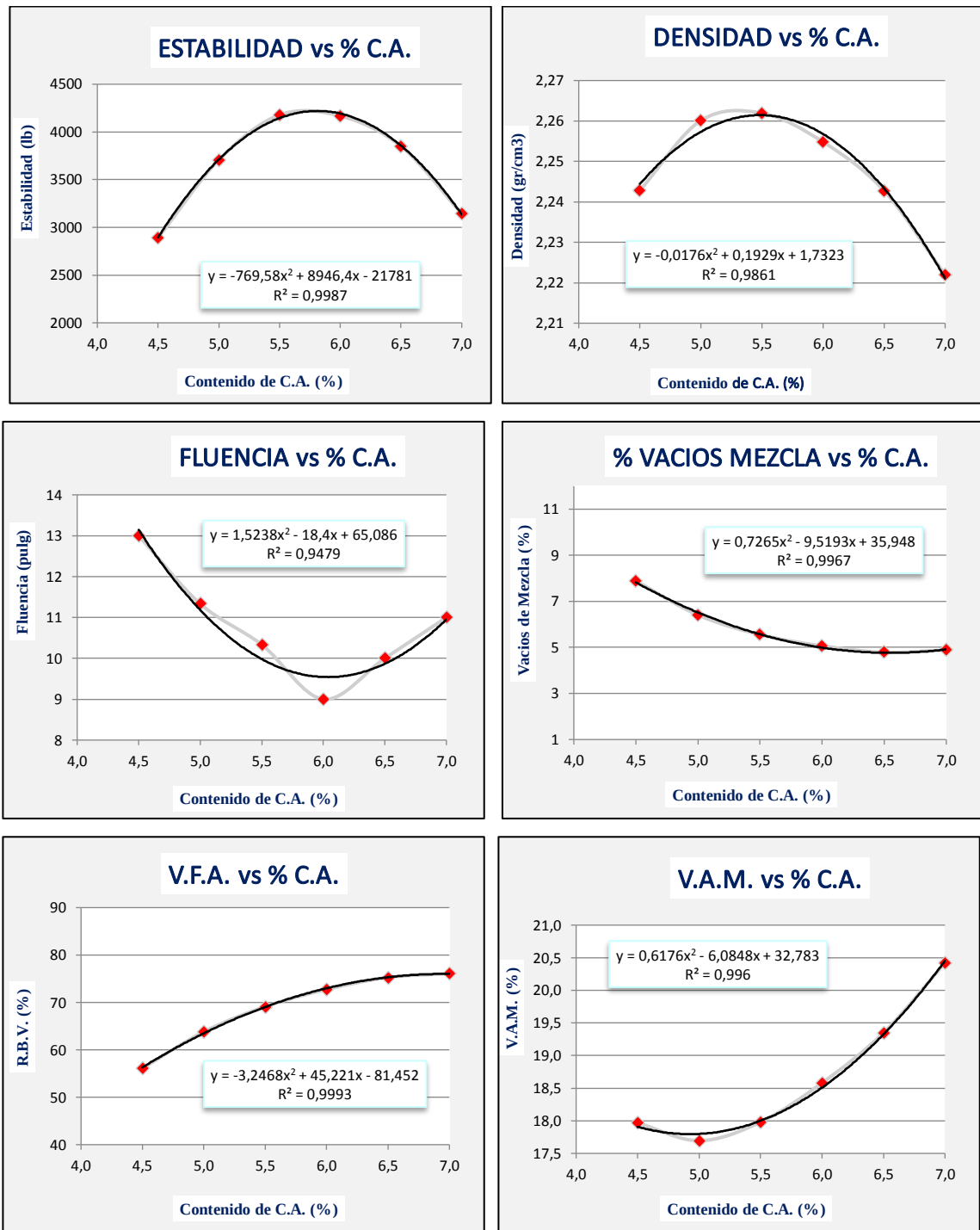
3.3.4.15 Diseño de mezclas asfálticas en caliente método MARSHALL Tupiza - Modificado.

Tabla.92. Diseño de mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico modificado con agregados de Tarija.

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	V.F.A. (vacíos llenos de asfalto)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.	cm3	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4.50	4.71	6.94	1200.3	1206.0	672	534.0	2.25	2.24	2.43	7.89	17.97	56.11	1250	3347.78	0.87	2910.56	2889.90	12	13.00
2			6.93	1200.0	1205.7	670	535.7	2.24						1241	3323.54	0.87	2895.80		13	
3			6.91	1198.9	1204.1	669	535.1	2.24						1222	3272.38	0.88	2863.33		14	
4	5.00	5.26	6.72	1193.8	1199.5	669	530.5	2.25	2.26	2.41	6.41	17.70	63.80	1498	4015.59	0.92	3684.31	3706.68	11	11.33
5			6.70	1189.0	1192.4	666	526.4	2.26						1505	4034.44	0.92	3721.77		12	
6			6.72	1192.4	1195.0	670	525.0	2.27						1510	4047.91	0.92	3713.95		11	
7	5.50	5.82	6.72	1184.6	1202.4	679	523.4	2.26	2.26	2.39	5.55	17.98	69.12	1711	4589.16	0.92	4210.55	4177.91	10	10.33
8			6.71	1176.9	1200.7	678	522.7	2.25						1688	4527.23	0.92	4165.05		10	
9			6.74	1188.6	1204.4	681	523.4	2.27						1699	4556.85	0.91	4158.12		11	
10	6.00	6.38	6.68	1188.9	1190.1	664	526.1	2.26	2.25	2.38	5.07	18.58	72.74	1672	4484.14	0.93	4159.04	4167.65	9	9.00
11			6.69	1190.3	1193.4	665	528.4	2.25						1685	4519.15	0.93	4180.21		9	
12			6.66	1185.9	1188.6	662	526.6	2.25						1666	4467.98	0.93	4163.71		9	
13	6.50	6.95	6.69	1188.0	1190.6	660	530.6	2.24	2.24	2.36	4.79	19.35	75.26	1556	4171.78	0.93	3858.89	3849.69	10	10.00
14			6.68	1186.6	1189.2	660	529.2	2.24						1534	4112.53	0.93	3814.38		9	
15			6.70	1187.1	1190.3	662	528.3	2.25						1567	4201.4	0.92	3875.79		11	
16	7.00	7.53	6.83	1176.7	1179.0	649	530.0	2.22	2.22	2.34	4.88	20.42	76.10	1333	3571.28	0.89	3178.44	3143.00	11	11.00
17			6.82	1172.9	1174.1	649	525.1	2.23						1300	3482.42	0.89	3108.06		11	
18			6.83	1178.1	1180.6	648	532.6	2.21						1318	3530.89	0.89	3142.49		11	

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 19. Mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico modificado con agregados de Tarija.



Fuente: Elaboración Propia

Tabla.93. Datos para las gráficas Marshall del asfalto Modificado con agregados de Tupiza.

PORCENTAJES DE CEMENTO ASFÁLTICO	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libra)	FLUENCIA (pulg)	% DE VACÍOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.F.A. (vacíos llenos de asfalto)	V.A.M. (VACÍOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
4.5	2.2	2889.9	13.0	7.9	56.1	18.0
5.0	2.3	3706.7	11.3	6.4	63.8	17.7
5.5	2.3	4177.9	10.3	5.6	69.1	18.0
6.0	2.3	4167.7	9.0	5.1	72.7	18.6
6.5	2.2	3849.7	10.0	4.8	75.3	19.3
7.0	2.2	3143.0	11.0	4.9	76.1	20.4

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.94. Resultados de Marshall y porcentaje optimo del asfalto modificado con agregados de Tupiza.

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO TIPO I (PG76-28)	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	4219.57	5.81
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2.26	5.48
	vacíos de la mezcla (%)	5.56	5.46
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.58

Fuente: Elaboración Propia

Tabla.95. Resultados del porcentaje optimo del asfalto modificado con agregados de Tupiza.

VERIFICACIÓN DE DISEÑO MARSHAL PARA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA				
CARACTERISTICA	Resultado	instituto de Asfalto (tráfico pesado)		
		Mín.	Máx.	Verificación
Estabilidad, (N)	4262.6	1800	-	CUMPLE
Flujo, (0,01"), (0,25 mm)	9.63	8	14	CUMPLE
%Vm	4.26	3%	5%	CUMPLE
%VAM	17.03	12%	-	CUMPLE
%V c./Asfalto.	76.40	65%	75%	CUMPLE
%Óptimo de CA 60/70	5.58			

Fuente: Elaboración Propia

3.3.4.16 Selección del diseño final.

La selección del porcentaje de cemento asfáltico se realizó en función a las especificaciones del Instituto del Asfalto y normas AASTHO, se puede observar que para mezclas asfálticas con asfalto convencional se obtuvo como porcentaje óptimo 5,79% (Tarija) y 5,68% (Tupiza). Para mezclas asfálticas con cemento asfáltico modificado se obtuvo como porcentaje óptimo 5,67% (Tarija) y 5,58% (Tupiza), cumpliendo con las especificaciones impuestas ya antes mencionadas.

CAPÍTULO IV

**COMPARACIÓN E INTERPRETACIÓN
DE LOS RESULTADOS**

CAPITULO IV

COMPARACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Análisis y comparación de las propiedades geológicas de los asfaltos.

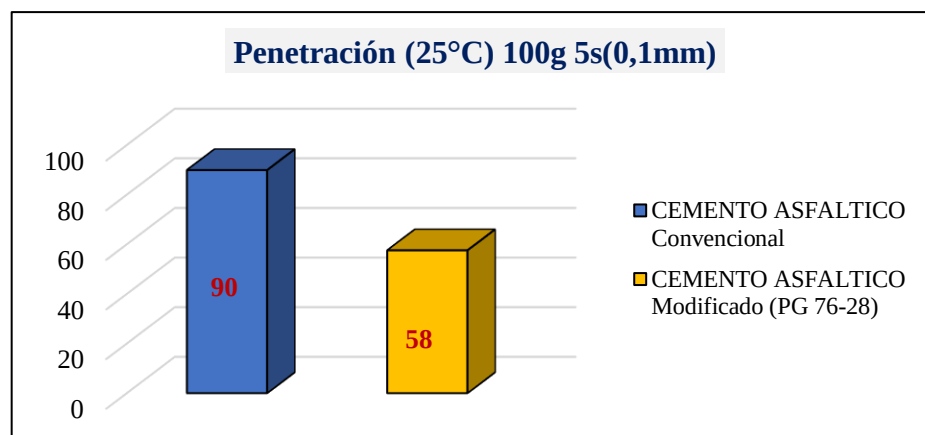
Tabla.96. Comparación de propiedades geológicas entre los asfaltos.

DESCRIPCIÓN	CEMENTO ASFÁLTICO	
	Convencional	Modificado (PG 76-28)
PROPIEDADES DE ORIGEN		
A. Sobre el asfalto virgen		
Peso Específico (gr/cm ³)	1.009	1.001
PROPIEDADES DE CONSISTENCIA		
Penetración (25°C) 100g 5s(0,1mm)	90	58
Punto de Ablandamiento (A y B) (°C)	43	73
Ductilidad de 25°C 5cm/min (cm)	101	92
PROPIEDADES DE SEGURIDAD		
Punto de Inflamación (°C)	263	271
PROPIEDADES DE DURABILIDAD		
B. Ensayo sobre la Película Delgada (ASTM D-1754)		
Perdida por calentamiento %	0.75	0.40
Ductilidad de 25°C 5cm/min (cm)	150	85

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 32 se observa la penetración a 25°C el asfalto convencional tiende a ser más blanda, en cambio el asfalto modificado estaría teniendo la mayor dureza.

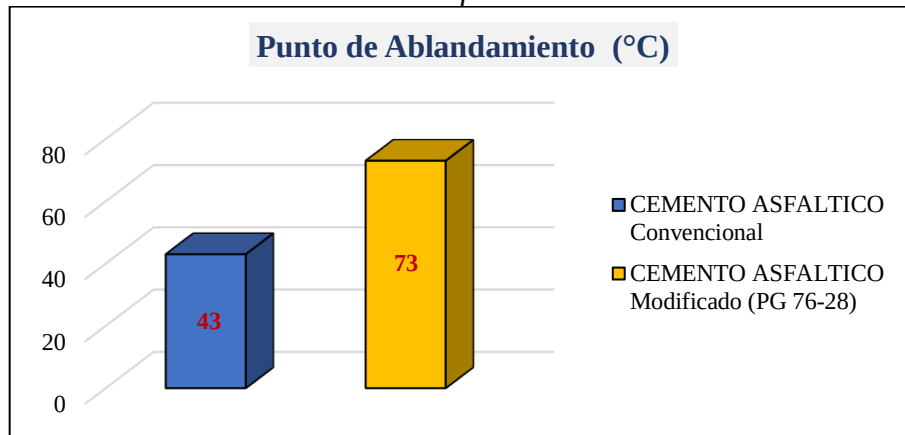
Figura.32. Comparación de la penetración a 25°C del asfalto convencional y asfalto modificado PG 76-28.



Fuente: Elaboración Propia

En la figura 33 observamos que el asfalto convencional la susceptibilidad térmica es menor que la del asfalto modificado lo que proporciona resultados buenos, debido a que mejora su desempeño en comparación al asfalto convencional.

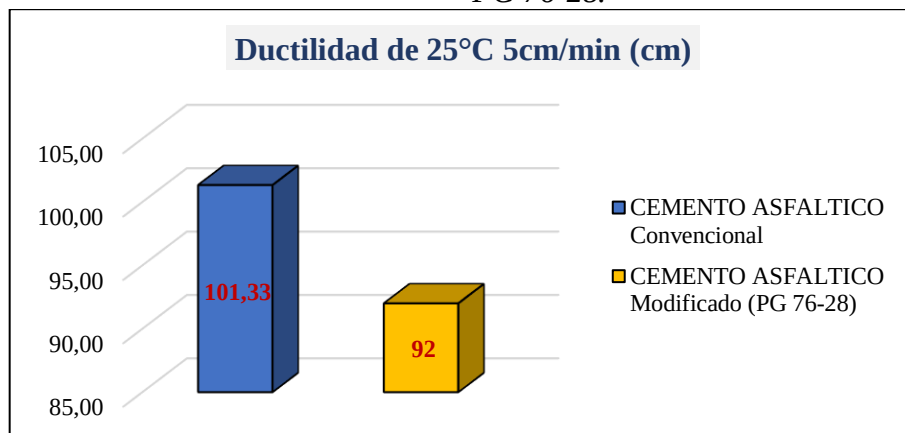
Figura.33. Comparación del Punto de ablandamiento del asfalto convencional y asfalto modificado PG 76-28.



Fuente: Elaboración Propia

En la figura 34 se observa que el asfalto convencional tiene mayor condición de deformación que con el asfalto modificado ante temperaturas medias, temperaturas que podrían afectar en el desempeño ya sea en zonas normalmente cálidas como el departamento de Tarija.

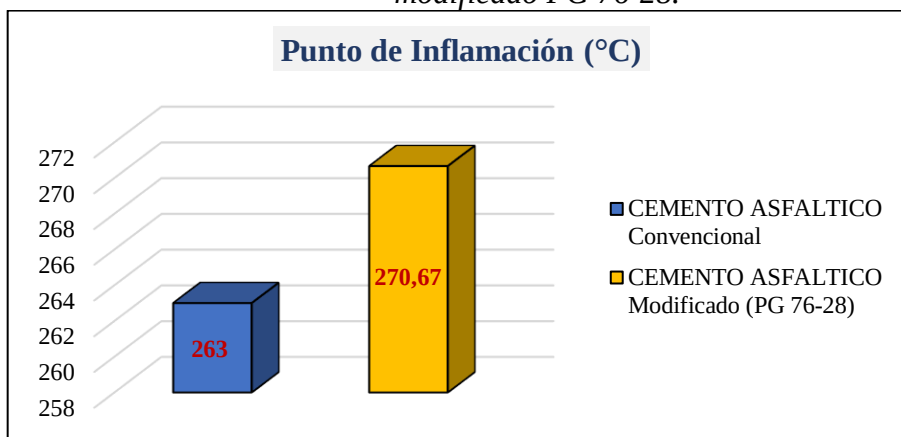
Figura.34. Comparación de ductilidad del asfalto convencional y asfalto modificado PG 76-28.



Fuente: Elaboración Propia

En la figura 35 se puede observar que el asfalto modificado tiene mayor temperatura de inflamación que el asfalto convencional, es decir, al implementar el asfalto modificado aumenta en la propiedad de seguridad.

Figura.35. Comparación del Punto de ablandamiento del asfalto convencional y asfalto modificado PG 76-28.



Fuente: Elaboración Propia

4.2 Comparación de mezclas asfálticas con asfalto convencional y asfalto modificado PG76-28.

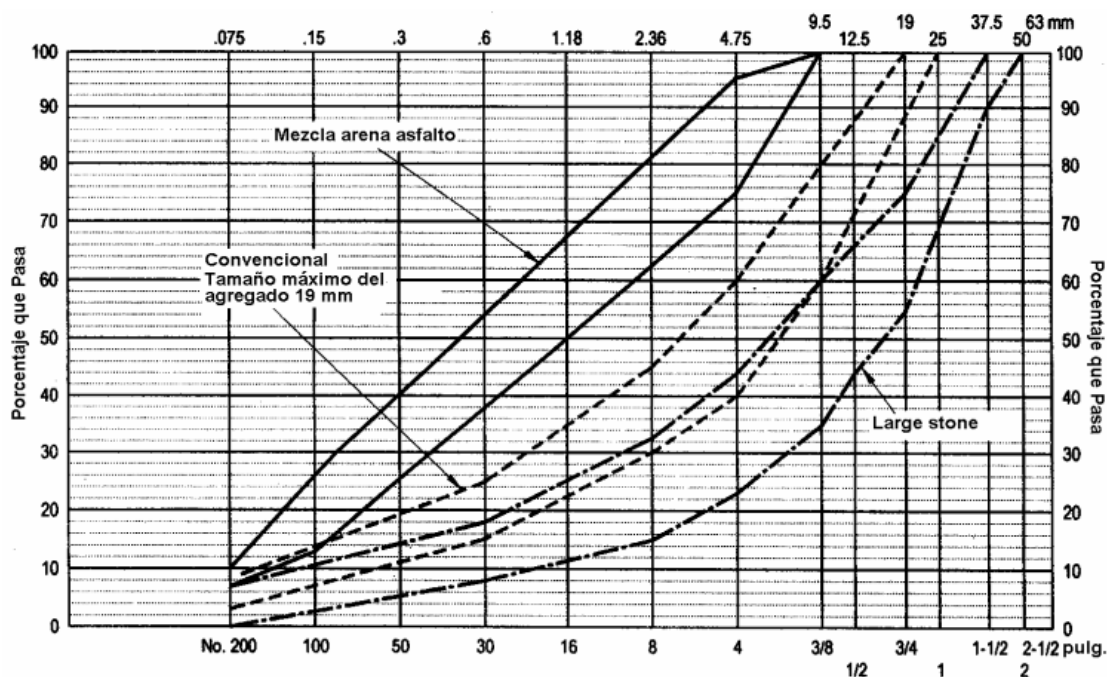
El análisis de los resultados de granulometría y la teoría establecida en el manual de pavimentos indican que el índice adoptado de 0.007 se debe a que los agregados presentan una absorción media. Como resultado, se obtuvo un contenido mínimo de asfalto del 4,68% como se muestra en la Tabla 69 con los agregados de Tarija y del 4,8% con los agregados de Río Blanco como se muestra en la Tabla 70.

La razón por la que los agregados de Tarija requieren una cantidad menor de asfalto mínimo se relaciona con la presencia de finos en estos agregados, lo cual podría requerir menos asfalto para lograr la cohesión y resistencia necesarias en la mezcla. Aunque esta diferencia no es crítica debido a que ambos valores están dentro del rango especificado (4-10%), se inició con un valor medio entre los dos para realizar una comparación adecuada, esto es, 4,5%. Este valor se acerca al contenido mínimo calculado para ambos tipos de agregados y permite ajustar gradualmente los valores en incrementos de 0.5% para lograr la mezcla deseada.

El diseño de las mezclas asfálticas se llevó a cabo utilizando la metodología Marshall, considerando tanto el asfalto convencional 85/100 como el asfalto modificado Tipo I (PG 76-28). Para determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico (CA 85/100 y CA Tipo I PG 76-28) en cada mezcla, se probó una serie de variaciones del 4.5% al 7.5%, en incrementos de 0.5%. Como resultado, el porcentaje óptimo para cada mezcla debe cumplir con todas las especificaciones establecidas, lo que dio lugar a los siguientes valores: 5.79% y 5.67% para el asfalto convencional 85/100, y 5.68% y 5.58% para el asfalto modificado Tipo I (PG 76-28).

La mezcla realizada con agregados de Tarija mostró una granulometría densa, caracterizada por la distribución equitativa de partículas de diferentes tamaños y una curva granulométrica continua. Los resultados de la dosificación mostraron un 41% de agregado grueso y un 59% de agregado fino, con un tamaño máximo nominal de 19 mm.

Figura.36. Granulometría de mezclas densas.



Fuente: Diseño moderno de Pavimentos asfálticos, (Minaya & Ordoñez, 2014).

Por otro lado, la mezcla realizada con agregados de Tupiza presentó una granulometría comúnmente denominada de arena asfalto como se muestra en la figura, lo que resultó en una dosificación de 28% de agregado grueso y 72% de agregado fino. Estos porcentajes fueron seleccionados para alcanzar una cantidad similar de uso de cemento asfáltico, con el objetivo de realizar una comparación adecuada entre las dos mezclas. Sin embargo, estos valores están ligeramente por debajo de los límites establecidos en las normas mencionadas anteriormente.

Para la comparación y análisis del comportamiento físico-mecánico de las mezclas asfálticas con el asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) con respecto al asfalto convencional 85/100. Se tiene la siguiente tabla:

Tabla.97. Comparación de mezclas asfálticas entre asfalto convencional y asfalto modificado PG 76-28.

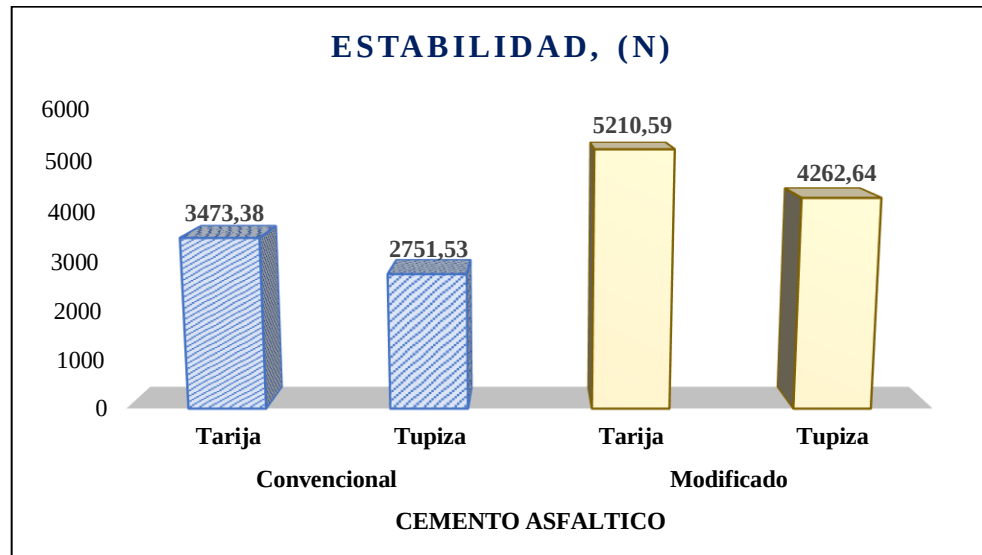
CARACTERÍSTICA	CEMENTO ASFÁLTICO			
	Convencional		Modificado (PG 76-28)	
	Tarija	Tupiza	Tarija	Tupiza
Estabilidad, (N)	3473.38	2751.53	5210.59	4262.64
Flujo, (0,01"), (0,25 mm)	13.87	14.60	8.90	9.63
%Vm	4.55	3.55	4.35	4.26
%VAM	17.78	16.51	17.47	17.03
%V c./Asfalto.	74.46	78.72	75.12	76.40
% Óptimo de asfalto	5.79	5.67	5.68	5.58

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 37 se puede observar que al utilizar el asfalto modificado PG 76-28 hay un aumento en la estabilidad de ambos agregados de diferentes procedencias, es decir hay una mejora de un 50% para el agregado de Tarija y un 54.9% para el agregado de Tupiza con respecto al agregado convencional, lo que significa que habrá mayor desempeño en la resistencia a la deformación permanente bajo cargas pesadas, lo cual es beneficioso para áreas con tráfico intenso y durabilidad bajo condiciones exigentes como ser los climas. En términos de estabilidad, la mezcla asfáltica con cemento asfáltico modificado mostró una ventaja significativa en comparación con el cemento asfalto convencional al utilizar

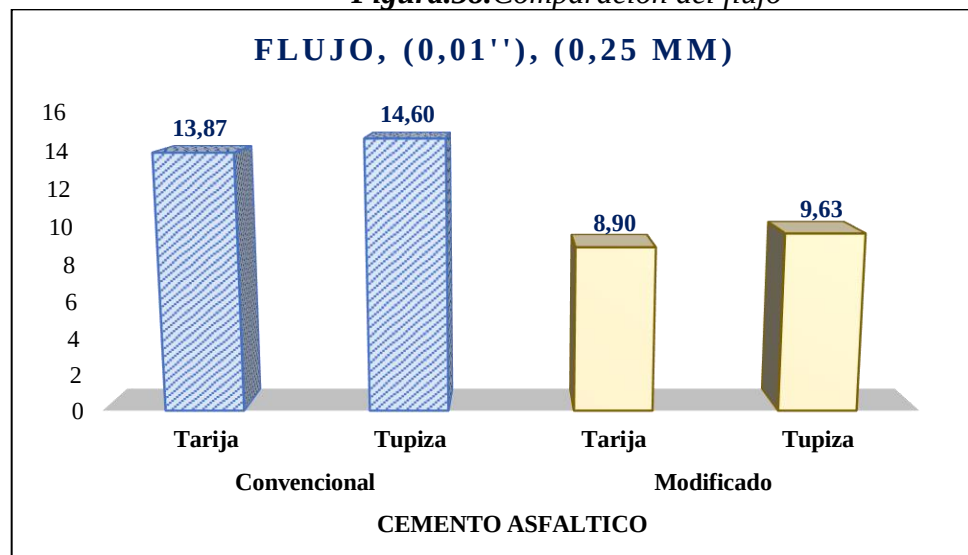
diferentes agregados provenientes de Tarija y Tupiza. Esto sugiere que el uso del cemento asfáltico modificado mejora la capacidad de soporte ante cargas de servicio, en comparación con el asfalto convencional.

Figura.37. Comparación de la estabilidad de la mezcla



Fuente: Elaboración Propia

Figura.38. Comparación del flujo

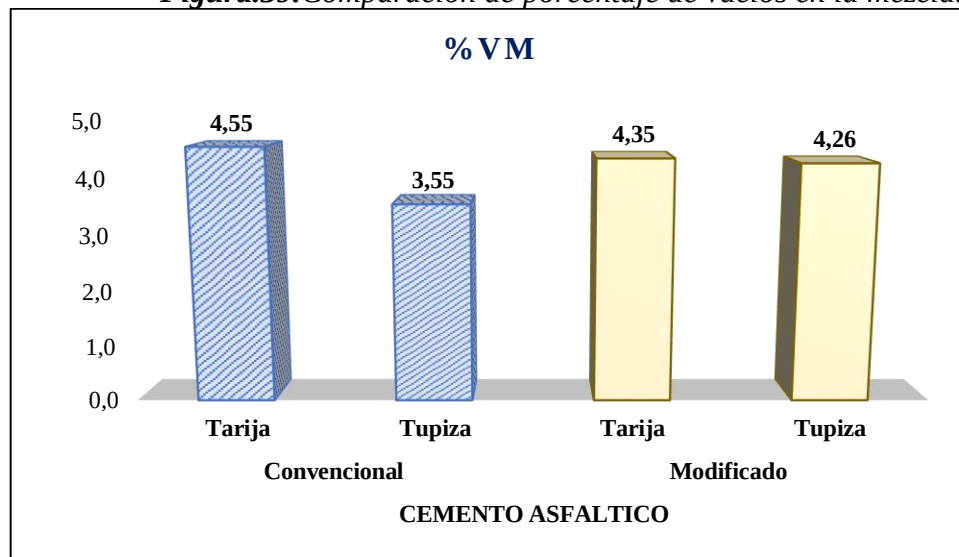


Fuente: Elaboración Propia

En la figura 38 observamos que con el asfalto modificado hay menor flujo en ambos agregados, lo que nos indica que la mezcla es más rígida y menos susceptible a la deformación plástica bajo carga, lo que puede ayudar en términos de durabilidad y resistencia en términos de altas temperaturas y tráfico.

El flujo en una mezcla es un indicador clave de su capacidad de deformación bajo carga, y en este caso, se observó un valor más alto para el asfalto convencional 85/100 (13,87 y 14,6) que para el asfalto modificado Tipo I (PG 76-28). Esto implica una mejor capacidad de soporte ante mayores cargas de servicio en la mezcla modificada.

Figura.39. Comparación de porcentaje de vacíos en la mezcla.

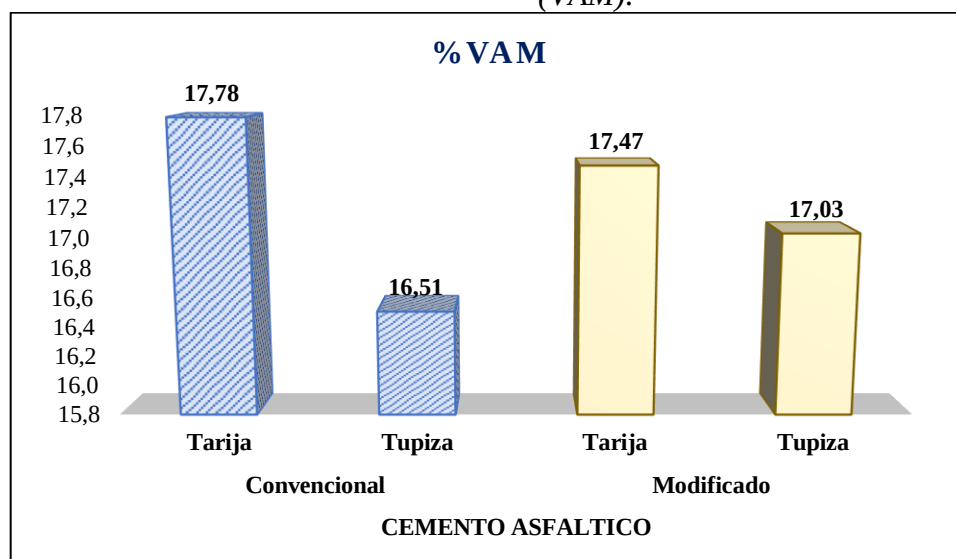


Fuente: Elaboración Propia

En la figura 39, se puede observar que en ambos tipos de mezcla se tienen resultados similares en Tarija y Tupiza indicando una similar capacidad para absorber el aire en ambas ubicaciones. Sin embargo, el cemento asfáltico modificado presenta un valor ligeramente más bajo en este parámetro con los agregados de Tarja.

El porcentaje de vacíos (%Vm) en la mezcla es un parámetro importante relacionado con la permeabilidad y durabilidad del pavimento asfáltico. Los resultados obtenidos para este indicador se encuentran dentro del rango aceptable (3-5%), lo que significa que las mezclas cumplen con los requisitos de estabilidad y no tienen riesgo de exudación de asfalto (exprimido o expulsado hacia la superficie) ni de deterioro irreversible en la carpeta asfáltica.

Figura.40. Comparación de porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM).

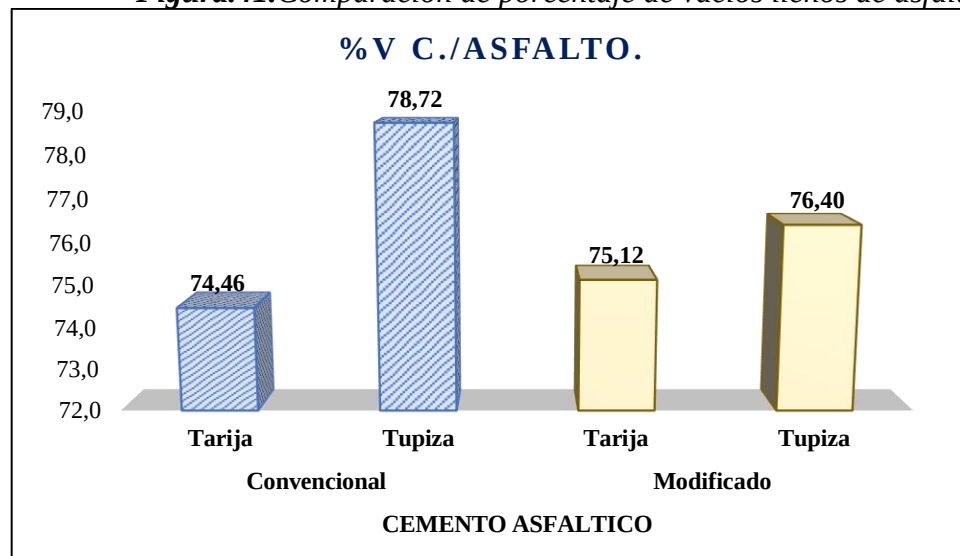


Fuente: Elaboración Propia

En la figura 40, se puede observar que en cuanto a los valores de %VAM, Los resultados obtenidos para los porcentajes de VAM en las distintas mezclas utilizando asfalto convencional y asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) cumplen con los límites especificados. También se puede observar que el asfalto modificado presenta una disminución del 0,31% en comparación con el asfalto convencional, un cambio apenas perceptible. Sin embargo, al utilizar agregados de Tarija, el resultado es inverso y aumenta en un 0,52%. Cuando los agregados modificados interactúan con los materiales del pavimento, como la gravilla y la arena, pueden desarrollar mejor un enlace entre las partículas, lo que mejora la estabilidad de la mezcla y su capacidad de soporte ante cargas. Esta interacción podría explicar por qué el asfalto modificado PG 76-28 presenta valores de VAM mayores cuando se utiliza agregados de Tarija.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VAM) representa los espacios de aire entre las partículas de agregado y los huecos llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada. Los valores mínimos de VAM recomendados dependen del tamaño máximo de agregado, siendo en nuestro caso $\frac{3}{4}$ " con un mínimo de 12% y un máximo de 15%. Estos valores indican que hay espacios disponibles para el asfalto que afectan directamente la durabilidad del pavimento.

Figura.41. Comparación de porcentaje de vacíos llenos de asfalto.



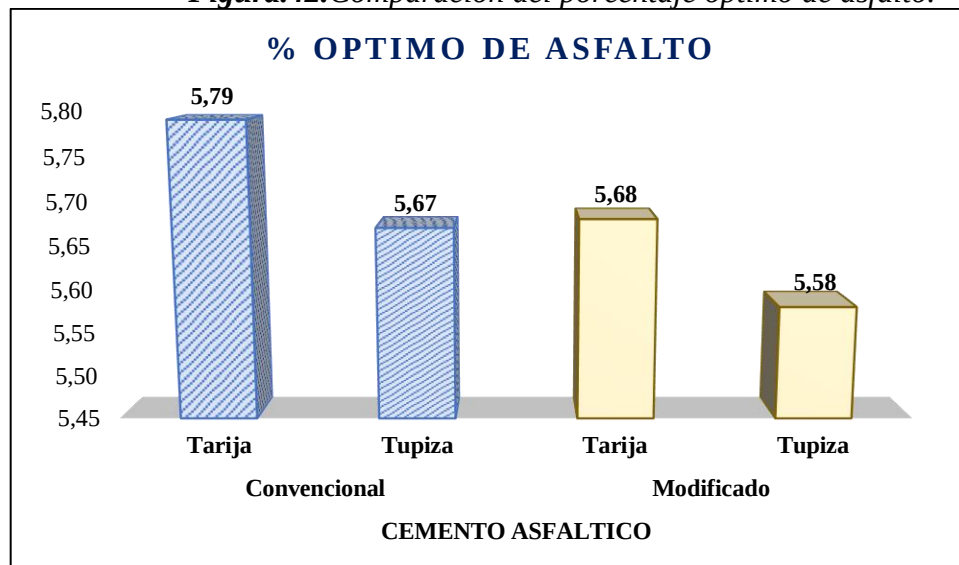
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 41, se observa una ligera diferencia, el cemento asfáltico convencional presenta valores ligeramente más altos que el modificado con respecto a sus agregados indicados, lo que podría indicar una mayor cantidad de materia orgánica presente en la mezcla. Cuando los asfaltos modificados tienden a tener un porcentaje de vacíos llenos de asfalto menor indica una mayor cohesión entre los agregados y asfalto.

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (%V c/asfalto) representa la proporción de espacios intergranulares entre las partículas de agregado VAM que están ocupados por asfalto. Un rango aceptable para este parámetro es de 65 a 75%, lo cual garantiza que el pavimento una vez en servicio no esté susceptible a deformaciones permanentes, como la aparición de roderas.

En la figura 42, se observa que los porcentajes óptimos disminuyen cuando se utiliza el asfalto modificado, para los agregados de Tarija disminuye un 0.10% y para los agregados de Tupiza disminuye hasta un 0.19%, lo que significa un ahorro en cantidad de asfalto que incide en los costos.

Figura.42. Comparación del porcentaje óptimo de asfalto.



Fuente: Elaboración Propia

4.3 Comparación de Costos entre las mezclas asfálticas con asfalto convencional y asfalto modificado TIPO I (PG 76-28).

Para la sección de análisis económico, se busca comparar cuánto aumenta el costo de un asfalto convencional en relación con un asfalto modificado de tipo PG 76-28. Este análisis involucra sólo los materiales que componen la mezcla asfáltica que influyen en el costo de producción de la mezcla.

Se considerarán los siguientes materiales, herramientas y equipos.

4.3.1 Materiales.

- Arena fina
- Grava 3/4"
- Gravilla 3/8"
- Cemento Asfáltico.
- Diésel

4.3.2 Dosificación de la mezcla asfáltica.

4.3.2.1 Dosificación de la mezcla asfáltica con cemento asfáltico convencional para carpeta de 7 cm de espesor por metro cuadrado de área.

Para el cálculo del volumen de la mezcla asfáltica se utilizará una superficie de un metro cuadrado y una altura de carpeta de siete centímetros.

Para la dosificación se usó la selección del porcentaje de cemento asfáltico que se realizó en función a las especificaciones del Instituto del Asfalto y normas AASTHO, donde el porcentaje óptimo 5,82% cumplió con todas las especificaciones requeridas.

$$V_{\text{volumen mezcla}} = 100 \times 100 \times 7$$

$$V_{\text{volumen mezcla}} = 70000 \text{ cc}$$

$$\text{Densidad}_{\text{mezcla}} = 2,32 \text{ g/cc}$$

$$\text{Densidad}_{\text{mezcla } 97\%} = 2,25 \text{ g/cc}$$

$$\text{PESO}_{\text{mezcla}} = V_{\text{volumen mezcla}} \times \text{Densidad}_{\text{mezcla } 97\%}$$

$$\text{PESO}_{\text{mezcla}} = 70000 \text{ cc} \times \frac{2,25 \text{ g}}{\text{cc}}$$

$$\text{PESO}_{\text{mezcla}} = 157528 \text{ g}$$

Tabla.98. Dosificación del asfalto convencional y modificado.

TARIJA									
Mezcla asfáltica convencional	Dosificación			Mezcla asfáltica modificada	Dosificación				
	Agregado %	Mezcla	Peso (gr)		Agregado %	Mezcla	Peso (gr)		
	CA		5.79		9120.87	CA		5.68	8947.59
	GRAVA	24.00	22.6		35617.08	GRAVA	24.00	22.64	35664.34
	GRAVILLA	17.00	16.0		25235.99	GRAVILLA	17.00	16.03	25251.74
	ARENA	55.00	51.8		81631.01	ARENA	55.00	51.88	81725.53
	FILLER	4.00	3.8		5938.81	FILLER	4.00	3.77	5938.81
	TOTAL				157544	TOTAL			157528
TUPIZA									
Mezcla asfáltica convencional	Dosificación			Mezcla asfáltica modificada	Dosificación				
	Agregado %	Mezcla	Peso (gr)		Agregado %	Mezcla	Peso (gr)		
	CA		5.67		8931.84	CA		5.58	8790.06
	GRAVA	18.00	16.98		26748.25	GRAVA	18.00	17.00	26779.76
	GRAVILLA	10.00	9.43		14854.89	GRAVILLA	10.00	9.44	14870.64
	ARENA	68.00	64.14		101038.46	ARENA	68.00	64.21	101148.73
	FILLER	4.00	3.77		5938.81	FILLER	4.00	3.78	5954.56
	TOTAL				157512	TOTAL			157544

Fuente: Elaboración Propia

Para convertir de gramos a la unidad de volumen en metro cúbico se multiplica por la densidad del material granular:

Tabla.99. Cantidad de materiales para la planilla de precios unitarios.

TARIJA							
Mezcla asfáltica convencional				Mezcla asfáltica modificada			
Material Granular	peso (Kg)	Peso específico (Kg/m3)	Cantidad (m3)	Material Granular	peso (Kg)	Peso específico (Kg/m3)	Cantidad (m3)
GRAVA	35.62	2670.0	0.01334	GRAVA	35.66	2670.0	0.01336
GRAVILLA	25.24	2710.0	0.00931	GRAVILLA	25.25	2710.0	0.00932
ARENA	81.63	2630.0	0.03104	ARENA	81.73	2630.0	0.03107
FILLER	5.94	2780.0	0.00214	FILLER	5.94	2780.0	0.00214
TUPIZA							
Mezcla asfáltica convencional				Mezcla asfáltica modificada			
Material Granular	peso (Kg)	Peso específico (Kg/m3)	Cantidad (m3)	Material Granular	peso (Kg)	Peso específico (Kg/m3)	Cantidad (m3)
GRAVA	26.75	2580.00	0.0104	GRAVA	26.78	2580.00	0.01038
GRAVILLA	14.85	2700.00	0.0055	GRAVILLA	14.87	2700.00	0.00551
ARENA	101.04	2610.00	0.0387	ARENA	101.15	2610.00	0.03875
FILLER	5.94	2780.0	0.0021	FILLER	5.95	2780.0	0.00214

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.3 Precios Unitarios.

Las siguientes planillas están diseñadas para la actividad “Conformación de la carpeta asfáltica convencional E= 0.07 m” en la unidad de metros cuadrados y en la moneda de bolivianos.

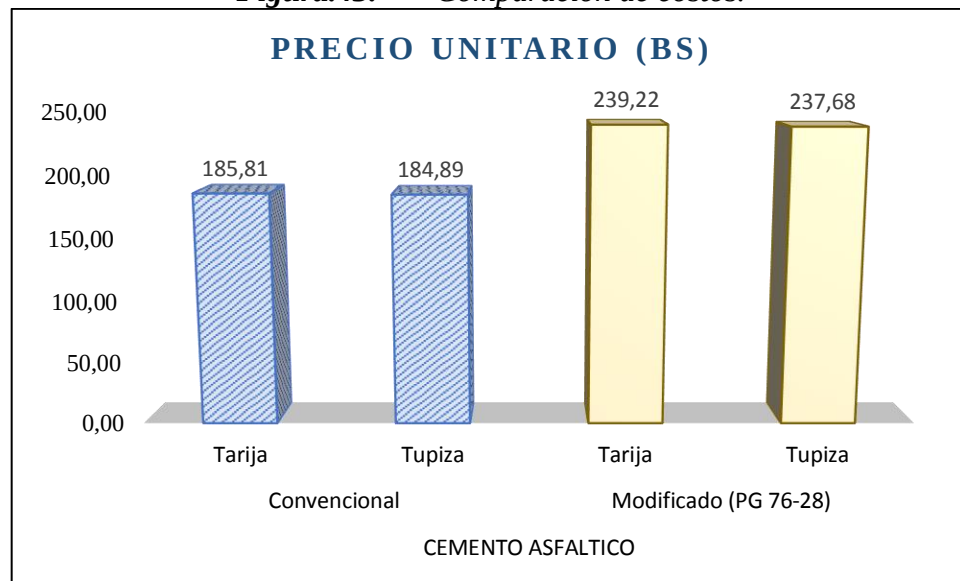
4.4 Comparación de costos.

Tabla.100. Cuadro comparativo de costos.

CARACTERÍSTICA	CEMENTO ASFÁLTICO			
	Convencional		Modificado (PG 76-28)	
	Tarija	Tupiza	Tarija	Tupiza
Precio Unitario (Bs)	185.81	184.89	239.22	237.68

Fuente: Elaboración Propia.

Figura.43. Comparación de costos.



Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENACIONES

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

De acuerdo con el estudio realizado sobre el comportamiento de los asfaltos convencionales y modificados Tipo I (PG 76-28) con diferentes tipos de agregados de las ciudades de Tarija y Tupiza, y con base en los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

- Se ha realizado la caracterización de los agregados, todos estos materiales han demostrado satisfactoriamente cumplir con las especificaciones técnicas requeridas para integrarse en el diseño de mezcla asfáltica según las normas AASHTO, ASTM y ABC, donde los agregados de Tarija presentan una granulometría más uniforme y mayor resistencia al desgaste en un 3.05% en la grava y en un 6.7% en la gravilla en comparación con los de Tupiza, que muestran una mayor variabilidad en sus propiedades físicas y mecánicas. Esto sugiere que los agregados de Tarija son más adecuados para mezclas asfálticas que requieren mayor estabilidad y durabilidad.
- Caracterizando del cemento asfáltico de grado de penetración 85/100, originario de Perú y del asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) originario de Rusia, se demostró que estos materiales cumplen satisfactoriamente con todas las especificaciones técnicas, además, se pudo observar que la menor penetración del asfalto modificado de 58 mm indica una mayor rigidez en comparación con el asfalto convencional con 90 mm, y en el ensayo del punto de ablandamiento del asfalto convencional puede situarse alrededor de los 43°C, el asfalto modificado alcanza valores de hasta 73°C, por lo que se concluye que tiene mejor comportamiento en climas cálidos y bajo condiciones de carga intensa.
- Se elaboraron las mezclas asfálticas donde los resultados del análisis Marshall indican que la mezcla asfáltica modificada mostró una estabilidad significativamente superior: 5210,59 N en Tarija y 4262,64 N en Tupiza. Ambos valores superan el mínimo requerido de 1800 N según la norma ASTM D 6927. Esto sugiere que la mezcla modificada tiene una capacidad adecuada para soportar cargas vehiculares de tráfico pesado sin fallas estructurales. En comparación, la mezcla asfáltica convencional mostró una estabilidad inferior de 3473,38 N en Tarija y 2751,53 N en Tupiza.

- Asimismo, los resultados del análisis Marshall indican que la mezcla asfáltica convencional presenta una deformación o fluencia de 13,87 mm en Tarija y 14,6 mm en Tupiza. Estos valores son indicativos de la susceptibilidad de la mezcla convencional a la deformación bajo carga. En comparación, la mezcla asfáltica modificada mostró una deformación significativamente menor: 8,9 mm en Tarija y 9,63 mm en Tupiza, pero ambas se encuentran dentro del rango de 8 a 14%.
- La mezcla con asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) presenta un aumento de resistencia o estabilidad del 50.0% en Tarija y del 54.9% en Tupiza respecto a las mezclas convencionales. Además, con respecto a la fluencia o deformación el asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) presenta una reducción del 35.8% en Tarija y del 34.0% en Tupiza respecto a las mezclas convencionales. Estos resultados indican que la mezcla modificada tiene un rendimiento mayor bajo cargas pesadas debido a la incorporación de aditivos que mejoran su cohesión y resistencia, lo que sugiere una vida útil más larga en comparación con las mezclas con asfalto convencional.
- De acuerdo a la hipótesis planteada se verificó en la investigación que la propiedad mecánico-resistente de estabilidad y fluencia, se incrementa a medida que se utiliza la combinación del asfalto modificado Tipo I (PG 76-28) con los agregados de Tarija, en comparación con las mezclas convencionales, además de que las mezclas modificadas son ideales para zonas de clima cálido como son las ciudades de Tarija y Tupiza.
- Se determinó que el contenido óptimo de cemento asfáltico es de 5.79% con los agregados de Tarija y 5.67% con los agregados de Tupiza para las mezclas con asfalto convencional. En el caso de las mezclas con asfaltos modificados, los valores obtenidos fueron 5.68% con los agregados de Tarija y 5.58% con los agregados de Tupiza. Estos resultados cumplen con los requisitos de estabilidad, flujo y vacíos establecidos por las especificaciones AASHTO M323 y ASTM D1559. Según los resultados, se observa una disminución en los porcentajes óptimos al emplear asfalto modificado. Para los agregados de Tarija, la reducción es del 0.10%, mientras que para los de Tupiza alcanza hasta el 0.19%. Esto representa un ahorro en la cantidad de asfalto utilizado, lo cual impacta favorablemente en los costos.
- Se calcularon los costos de las mezclas asfálticas con agregados de Tarija y Tupiza donde a pesar de que el costo inicial de producción de mezclas con asfalto modificado

Tipo I (PG 76-28) con alrededor del 29% que equivale a Bs 53 aproximadamente al del asfalto son superior al costo de la mezcla con asfalto convencional, aunque los beneficios en términos de durabilidad y menor necesidad de mantenimiento a largo plazo compensa la inversión inicial. Esto se traduce en un costo-beneficio favorable para proyectos de infraestructura sometidos a condiciones de tráfico intenso y climas extremos.

5.2 Recomendaciones.

- En cuanto a la provisión y almacenamiento del asfalto modificado Tipo (PG 76-28) debe ser un lugar seco y fuera de la luz solar, debe estar siempre cerrado sin filtraciones de aire y sólo se debe abrir en el momento de la incorporación al asfalto ya que es muy fácil proporcionar un medio favorable para el crecimiento de hongos y bacterias, lo que podría provocar la degradación del asfalto modificado Tipo I (PG 76-28), en cuanto a su manipulación se debe contar con guantes de protección.

- En relación a los agregados, es fundamental contar con un agregado triturado de buena calidad, ya que presenta una excelente cohesión y fricción interna. La estabilidad de la mezcla asfáltica depende en gran medida de estas propiedades. Agregados redondeados o con pocas superficies trituradas pueden generar ahuellamientos huellas profundas y canalización.

Cuando se utiliza el agregado, es crucial mantener un control estricto sobre la temperatura durante todo el proceso de mezclado, utilizando un termómetro para garantizar que no se superen los límites establecidos. La temperatura juega un papel clave en el desempeño final de la mezcla asfáltica y su durabilidad en servicio.

- Para ensayar el asfalto modificado o para cualquier aplicación que se desee, es necesario calentarlo durante una hora, mezclarlo suavemente y esperar a que se disuelva por complet