

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

“INTRODUCCIÓN”

1.1 INTRODUCCIÓN

El asfalto es 100% reciclable/reutilizable y, para el desarrollo sostenible, se debe alentar su reciclaje/reutilización. Los procesos de reutilización del asfalto siguieron evolucionando, en los últimos años ha habido tanto un progreso cuantitativo, es decir, un aumento de las tasas de reutilización en diferentes tipos de asfalto y un progreso cualitativo donde se ha puesto énfasis en la efectividad de la reutilización del asfalto recuperado y en la producción más eficiente energéticamente.

El RAP se puede reutilizar para producir una nueva mezcla asfáltica (en planta o in situ). Emulsiones, espuma de asfalto, agentes rejuvenecedores o aglutinantes asfálticos vírgenes se pueden utilizar, añadiéndolos a la nueva mezcla asfáltica.

En esta investigación se comparará los métodos alemán (homogeneidad) y estadounidense (PG-grade) de la reusabilidad del RAP en la nueva mezcla, se proporcionará datos sobre la reutilización del asfalto en Europa (Alemania) y Estados Unidos.

En la actualidad un material que no se ha explotado en Bolivia es el recurso del pavimento asfáltico reciclado (RAP de sus iniciales en inglés).

Como solución a lo mencionado se hizo necesario realizar investigaciones que buscan reutilizar el RAP y su aplicabilidad en proyectos viales.

El presente estudio busca establecer la incidencia en el comportamiento de las propiedades en mezclas asfálticas al incorporar RAP, disminuyendo así el impacto ambiental que causa ese material que es desechado en grandes cantidades.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los materiales empleados en la construcción de la mezcla asfáltica integran un papel fundamental a la hora de obtener una mezcla ideal, es por eso que surge la necesidad de buscar nuevos materiales alternativos, que mitiguen el daño ambiental que se produce con la explotación y obtención de agregados pétreos, procurando una reducción de costos en la elaboración y mejor desempeño de nuestros pavimentos flexibles.

Es así como se propone la utilización del RAP como material componente de las mezclas asfálticas, usado como agregado ya que el RAP es un material que es desechado en grandes cantidades en todas las partes del mundo y no son aprovechados sus componentes agregados y cemento asfáltico para producir una nueva mezcla asfáltica.

El reciclaje de mezclas asfálticas es de gran importancia para así poder coadyuvar a la protección ambiental sostenible (reducción y optimización de los recursos).

1.3 DISEÑO TEÓRICO

1.3.1 Planteamiento del problema

1.3.2 Situación Problemática

El comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas, es una forma de medir sus propiedades mecánicas, para relacionarlo con los esfuerzos a los que será sometido cuando estén puestos en la obra, estas propiedades pueden ser medidas utilizando el ensayo de Marshall.

Hoy en día se adicionan agentes modificadores para la mezcla asfáltica con el objeto de mejorar su comportamiento mecánico a diferentes temperaturas de servicio.

Con el presente estudio usando RAP en las mezclas asfálticas, se pretende detectar posibles variaciones favorables en el comportamiento mecánico de las propiedades de las mezclas asfálticas.

Como se conoce, en la actualidad el RAP no se lo reutiliza para producir una nueva mezcla asfáltica.

Problema.

¿De qué manera una comparación de propiedades entre una mezcla asfáltica en caliente convencional con otras modificadas con RAP, puede determinar si existen mejoras en su comportamiento mecánico? ¿Se podrá dar solución a la reutilización de mezclas asfálticas para evitar así utilizar agregados y asfaltos vírgenes?

1.4 OBJETIVOS

Entre los objetivos que se quiere lograr con la elaboración del presente trabajo de investigación se pueden mencionar los siguientes:

1.4.1 Objetivo General

- Realizar la comparación entre el método alemán (Homogeneidad) y el método americano (PG – GRADE) para la aplicación del RAP en nuevas mezclas asfálticas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar la información teórica de aplicación de RAP en mezclas asfálticas.
- Describir la temática de las mezclas asfálticas, propiedades, características, procedimientos de ejecución, ensayos de control y su análisis a través del método Marshall.
- Realizar los ensayos de la caracterización de los agregados pétreos y del cemento asfáltico.
- Realizar el análisis de los áridos del RAP.
- Elaborar briquetas de mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de RAP (Pavimento asfáltico reciclado) en reemplazo de los agregados.
- Analizar y comparar el desempeño de las mezclas asfálticas en caliente con la adición de RAP versus las mezclas asfálticas convencionales.

1.5 HIPÓTESIS

Realizando un estudio del comportamiento mecánico de las propiedades de las mezclas asfálticas, cuando se agrega RAP, mediante el método Marshall, se podrá determinar con precisión el efecto en las propiedades más relevantes (estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica), estableciendo una propuesta real sobre el aprovechamiento racional de un material que es desechado en grandes cantidades.

1.6 DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1 Variables Independientes

- Porcentajes de RAP (pavimento asfáltico reciclado) en las mezclas asfálticas.
- Temperaturas para el grado de desempeño P-G

1.6.2 Variables Dependientes

- Estabilidad
- Fluencia
- Porcentaje de vacíos

1.7 DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1 Componentes

1.7.1.1 Unidad de estudio.

Comportamiento mecánico de las propiedades de la mezcla asfáltica cuando se le agrega RAP en el proceso de fabricación.

1.7.1.2 Población.

Mezclas asfálticas modificadas con RAP (pavimento asfáltico reciclado).

1.7.1.3 Muestra.

Se realizará el estudio del comportamiento de la mezcla asfáltica con RAP adicionadas en varios porcentajes a las mezclas asfálticas utilizando agregados de la región.

1.7.1.4 Muestreo.

Para la selección de la muestra se analizará las mezclas asfálticas con la adición de RAP que cumpla con las especificaciones de acuerdo a la norma para posteriormente realizar una comparación con la mezcla asfáltica convencional.

1.7.2 Métodos y Técnicas Empleadas.

- **Definición, selección y/o elaboración de los métodos y técnicas en función del objeto y los objetivos**

El método utilizado para este trabajo será el correlacional mediante el cual estudiaremos, seleccionaremos, agruparemos las variables a analizar y así estudiar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con RAP para poder mejorar su resistencia característica y cumpla con la estabilidad Marshall.

- **Técnicas de Muestreo**

La técnica de muestreo aplicada para este estudio será la probabilística porque todas las muestras tendrán las mismas probabilidades y variaciones.

- **Ensayos previos a realizar**

Los agregados se obtendrán del acopio de la planta de asfaltos de la Alcaldía del gobierno municipal de Cercado, ubicada en la ciudad de Tarija, y que esté a su vez tiene como banco a la chancadora Fernández.

El betún tiene procedencia del país de Colombia y será proporcionado por la planta de asfaltos del Gobierno Municipal de la provincia Cercado del Departamento de Tarija.

Con los agregados y el cemento asfáltico se utilizará la técnica experimental con ensayos de laboratorio que caracterizarán dichos materiales, se procede a diseñar la mezcla asfáltica con el cemento asfáltico (85-100), con la granulometría de los agregados, y haciendo variar los porcentajes de RAP, obteniendo así la mezcla asfáltica.

1.7.3 Descripción de Equipos e Instrumentos

A. Para la caracterización de los agregados

- **Horno Eléctrico.** –El horno eléctrico es utilizado para el secado de los agregados y debe contar con una temperatura constante de 100 a 110 °C.
- **Balanza.** – La balanza es usada para obtener los distintos pesos que se requiera, con una sensibilidad de 0.1 gr.
- **Juego de Tamices.** –El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, que contiene los tamices 3", 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°200, tapa y fondo.

B. Para la caracterización del Cemento Asfáltico

- **Penetrómetro de Asfalto.** – Que sirve para determinar la penetración del betún
- **Aparato para la determinación del punto de inflamación Cleveland de copa abierta.** – Con el cual se determina el punto de ignición o punto de llama del betún en estudio.
- **Ductilímetro.** - Con el cual se determina la ductilidad del betún a una temperatura estándar de 25°C.
- **Peso Específico.** – Que sirve para determinar la densidad del cemento asfáltico.
- **Punto de Ablandamiento.** – Sirve para determinar el punto de ablandamiento del cemento asfáltico, por medio del aparato anillo y bola.

C. Para la caracterización del RAP

- **Extractor centrífuga.** – Para determinar el contenido de cemento asfáltico del RAP
- **Juego de Tamices.** –El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, la cual contiene los tamices 3", 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°200, tapa y fondo.

D. Para la dosificación y diseño de Briquetas

- **Moldes de compactación Marshall.** – En estos moldes se vaciará la mezcla bituminosa reciclada, creando briquetas con distintos porcentajes
- **Compactador para moldes Marshall.** – Esté compactador sirve para compactar las briquetas según especificaciones técnicas.

1.8 PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

1.8.1 Tratamiento de los datos (empleo de la estadística)

La estadística descriptiva

Es el estudio de los métodos para reunir, clasificar, presentar y describir un conjunto de datos. Se asume que es descriptivo el estudio de un conjunto de datos, cuando simplemente se describen o analizan los datos.

La media aritmética

En la práctica la medida de posición de mayor uso y más conocida es la media aritmética; a la media aritmética se la conoce directamente como media o promedio, la media aritmética es una medida de tendencia central.

De un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de tamaño n , de una variable o característica x , se denota \bar{X} a su media aritmética y se define como la suma de todos los valores observados en la muestra, dividida entre el número total de datos n .

$$\bar{x} = M_x = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} = \frac{\sum X}{n}$$

Donde:

\bar{x} = Media aritmética se la conoce directamente como media o promedio

X_1, X_2 = Conjunto de datos

n = Número total de datos

La mediana

Es otra de las medidas de posición de amplio uso y de fácil comprensión.

La mediana que se denota por $Me_{(X)}$ o por A se define como el valor central de un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de tamaño n , de una variable o característica X , donde los datos están ordenados correlativamente.

Cuando se tiene un número impar de datos la mediana será el valor del dato central $X_{(n+1)/2}$; para un número par de datos se calcula la media de los datos centrales: $X_{n/2}, X_{n/2+1}$

La moda

Otra medida de posición de amplio uso es la moda, que sin imaginarlo se usa frecuentemente. En un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ de tamaño n , de una variable o característica X , la moda se define como el valor que ocurre con mayor frecuencia, se denota por $Mo(X)$. En algunos conjuntos de datos, la moda puede no existir, o no ser única en otros casos.

La varianza

Es la principal medida de dispersión, es la más precisa y de mayor uso, en especial su uso es más amplio en la estadística inferencial.

Dependiendo de si los datos corresponden a una población o a una muestra, se obtendrán la varianza poblacional o la varianza muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes.

La varianza de una población o varianza poblacional se designa por σ^2 (sigma cuadrado), la varianza de una muestra o varianza muestral se designa por s^2 .

Para una ordenación de datos: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ la varianza se calcula como:

$$\text{Varianza poblacional } \sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N} = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N} = (X - \mu)^2$$

$$\text{Varianza muestral } s^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{\sum (X - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{n \sum X^2 - (\sum X)^2}{n(n-1)}$$

Donde:

X= Variable

X_j = Observación número j de la variable X

N, n= Número de observaciones

μ, \bar{X} =Media aritmética de una población y de una muestra respectivamente (su modo de cálculo es el mismo)

Desviación estándar

Con base en la varianza, otra medida de dispersión es la desviación estándar, o desviación típica. Según se trabaje con una población o con una muestra, se obtendrán la desviación estándar poblacional o la desviación estándar muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes.

La desviación estándar de una población se designa por σ (sigma). La desviación estándar de una muestra se designa por s . Son las raíces cuadradas de las varianzas de una población o muestra respectivamente, por tanto:

Para una ordenación de datos: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ La desviación estándar se calcula por

$$\text{Desviación estándar poblacional } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N}}$$

$$\text{Desviación estándar muestral } s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Donde:

X = Variable

X_j = Observación número j de la variable X

N, n = Número de observaciones

μ, \bar{x} = Son la media aritmética de una población o de una muestra

Coefficiente de variación

Se llama también coeficiente de dispersión, es una medida de dispersión relativa, permite efectuar comparaciones entre diversos conjuntos de datos que no necesariamente poseen la misma frecuencia total (número total de datos).

Para un conjunto de datos, se llama coeficiente de variación al cociente de la desviación estándar muestral entre su media aritmética:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} * 100$$

Donde:

S= Desviación estándar

\bar{x} = Media aritmética

1.9 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación se centra en la comparación del método alemán (homogeneidad) y americano (PG - grade) para la utilización del RAP en nuevas mezclas asfálticas, para lo cual se estudiara conceptos básicos y parámetros de análisis, comparación, recopilación de varios libros y normas.

Los ensayos realizados están orientados de manera objetiva a comparar y evaluar el comportamiento mecánico de mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica elaborada con RAP.

Para ello se realizara un estudio de los parámetros de diseño que interviene en las mezclas asfálticas adoptando un método de dosificación; así mismo se analizará en laboratorio los materiales que componen la mezcla para verificar que cumplan con ciertas exigencias establecidas en norma, para así poder elaborar briquetas y diseñar mediante el método Marshall su dosificación optima, obteniendo sus propiedades mecánicas para analizarlas y dar validez a los resultados.

La finalidad de este estudio es de poder brindar información necesaria de la mezcla con RAP y que sea esta una opción a tomar en cuenta al momento de realizar pavimentos flexibles

CAPÍTULO II
FUNDAMENTACIÓN
TEÓRICA

CAPÍTULO II

“FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA”

2.1 INTRODUCCIÓN

2.1.1 Antecedentes de Asfaltos

La historia del asfalto se inició hace miles de años, siendo utilizado de su versión natural en yacimientos que se encontraban en estanques y lagos de asfalto, así como en rocas asfálticas. Los antiguos pobladores de Mesopotamia lo emplearon como sellante en los tanques y embalses de agua. Fue también utilizado por los fenicios en la construcción de sus barcos mercantes. En los días de los Faraones, los egipcios lo usaron como material que, aplicado a las rocas a lo largo del río Nilo, prevenían la erosión del suelo, y el cesto del niño Moisés fue impermeabilizado con asfalto.

El término asfalto, se deriva del vocablo acadio asphatu o asphallo, que significa dividirse, resquebrajarse. Posteriormente, fue adoptado por los griegos como adjetivo cuyo significado es estable, seguro y al verbo estabilizar o asegurar. De, donde se supone que el primer uso del asfalto en las civilizaciones antiguas es que fue utilizado en forma de cemento, para asegurar o unir objetos.

Del griego paso al latín, después al francés (asphalte) y finalmente al inglés (asphalt). Desde la antigüedad hasta hoy en día, el asfalto ha sido utilizado como cemento para ligar, cubrir o impermeabilizar objetos.

Es un material muy versátil, se puede decir que es el material de ingeniería más antiguo utilizado por el hombre.

A principios del siglo XIX el descubrimiento del asfalto refinado por medio de la destilación del petróleo crudo y el auge de la industria automovilística, dio lugar al aumento en el consumo de éste. Fue utilizado como material para pavimentar caminos y otras aplicaciones.

A continuación se muestra un cuadro donde se observa cronológicamente el desarrollo de la utilización del asfalto como material de construcción.

Tabla 2.1 Historia del asfalto

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

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

2.1.2 Caracterización de los Materiales Asfálticos

Las propiedades y características de los materiales asfálticos dependen de su estructura y composición química; pero dada su gran complejidad, estos materiales se caracterizan mediante ensayos empíricos para valorar las propiedades que tiene que poseer para emplearse como ligante en obras de carreteras.

Las propiedades fundamentales que tiene que poseer los asfaltos para su empleo en carretera son:

- Buen comportamiento mecánico y reológico para resistir tensiones impuestas por el tráfico y poder mantener a las temperaturas de servicio la estructura de la mezcla asfáltica.
- Carácter termoplástico: por acción de la temperatura su consistencia debe disminuir de manera que sean capaces de mojar y envolver los áridos. Al enfriarse debe adquirir la consistencia primitiva y dar cohesión a la mezcla.
- Resistir al envejecimiento frente a los agentes atmosféricos y condiciones ambientales para conservar sus propiedades con el tiempo.
- Debe poderse trabajar con facilidad y su puesta en obra factible.

Es decir que las propiedades fundamentales que deben poseer los asfaltos para emplearse en carreteras son: adhesividad a lo áridos, buen comportamiento reológico y resistencia al envejecimiento.

2.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas son la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico. Se elaboran normalmente en plantas mezcladoras, pero en algunos casos pueden fabricarse in situ. También reciben el nombre de aglomerados, están formados por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros.

Las mezclas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5 % de polvo mineral (filler) y otro 5 % de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. La mezcla asfáltica debe ser duradera, es decir, debe ser resistente a las acciones tales como despegue de la película de asfalto del agregado por efectos del agua, abrasión del tránsito, etc. Debe ser resistente a las sollicitaciones de tránsito a través de su estabilidad. Una mezcla debe ser impermeable para que sus componentes no estén bajo la acción directa de los agentes atmosféricos y debe ser trabajable para su fácil colocación y compactación en terreno. Se fabrican en centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

2.2.1 Clasificación

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

a) Por el tamaño máximo del agregado pétreo.

Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.

Mezclas Finas: También llamadas micro aglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser doble al triple del tamaño máximo.

b) Por fracciones de agregado pétreo empleado

Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante

Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.

Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.

Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico

c) Por la temperatura de puesta en obra

Mezclas asfálticas en caliente: Se fabrican con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos.

La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

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

d) Por la proporción de vacíos en las mezcla asfáltica.

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

Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.

Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6% y el 10%.

Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12%.

Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

e) Por la estructura del agregado pétreo.

Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debido al rozamiento interno de los agregados es notable.

Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debido exclusivamente a la cohesión de la masilla.

Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

f) Por la granulometría.

Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.

Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaño de agregado pétreo en el uso granulométrico.

2.2.2 Características de las Mezclas Asfálticas

Propiedades de las mezclas asfálticas.

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría del agregado a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas en la mezcla y se satisfagan los requisitos específicos del proyecto. La selección apropiada de los materiales (con la calidad suficiente) que constituirán la mezcla y de sus proporciones correctas, requiere el conocimiento de las propiedades más significativas de las mezclas, y de su influencia en el comportamiento del pavimento.

Las características más notables en una mezcla asfáltica son:

Estabilidad: Es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta ahuellamientos, corrugaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Durabilidad: Es la capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito, que se observa en desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.

Impermeabilidad: Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento.

Flexibilidad. Es la capacidad del pavimento para acomodarse sin agrietamientos, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante.

Resistencia a la fatiga. Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse.

Resistencia al deslizamiento. Capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada.

2.2.3 Componentes de las Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas están compuestas por agregados, asfalto y vacíos de aire. La calidad de la mezcla asfáltica está directamente ligada con las propiedades y dosificación de los agregados y del cemento, como también a la cantidad de los vacíos de aire. Las mezclas asfálticas constituyen la parte superior de los pavimentos flexibles y proporcionan un medio de distribución de carga y de impermeabilización que protege la estructura del pavimento de los efectos adversos del agua y de la acción del tránsito. Se emplean para la construcción de pavimentos nuevos, para incrementar la resistencia o mantener una calidad satisfactoria en la superficie de un pavimento existente, o para mejorar la resistencia al deslizamiento.

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

2.3 AGREGADOS

Es una mezcla, natural o no, de piedra o gravas trituradas, escorias, arenas finas, arenas gruesas y llenante mineral. Puede contener todos o algunos de estos materiales. Los agregados deben ser limpios, duros y durables. Los agregados son los responsables de la capacidad de carga o resistencia de la mezcla y constituyen entre el 90% y 95% en peso de la mezcla y entre el 75% y 85% en volumen de la misma. Los agregados pueden ser naturales o procesados. De acuerdo con su tamaño, se dividen en gravas, arenas y relleno mineral (llenante mineral o filler).

Los materiales pueden ser producidos en canteras abiertas o tomado de las riveras de los ríos (cantera de río). En este último caso son agregados pétreos aluviales. Los agregados

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

a) Agregados naturales

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento, son los más empleados en la fabricación de las mezclas asfálticas, y estos se encuentran en canteras, como así también en depósitos de origen fluvial, y también proceden de la desintegración de rocas; el método de obtención de estos agregados son de vital importancia puesto que de este trabajo dependerán básicamente los resultados que se quiere obtener.

b) Agregados artificiales

Estos agregados proceden de procesos industriales de los cuales son un subproducto o bien del tratamiento industrial de los agregados naturales también pueden proceder de la trituración o fragmentación de las rocas, son utilizados en la construcción de las mezclas asfálticas, cuando los proyectos tienen que cumplir especificaciones rígidas, consideraciones ambientales y eventual escases de los agregados naturales.

2.3.1 Agregado Grueso

Reciben el nombre de agregados gruesos los materiales retenidos en el tamiz #4 estos materiales serán piedras o escorias machacadas, gravas machacadas o combinaciones de ellas, o en materiales que se presenten naturalmente en estado fracturado (como granito disgregado) o en áridos naturales muy angulosos con texturas superficial áspera o rugosa. Los agregados no estarán recubiertos de arcilla, limo u otras sustancias perjudiciales ni contendrán trozos de arcilla ni otros agregados de material fino.

2.3.2 Agregado fino

Según el sistema de clasificación SUCS, se define como agregado fino, a la parte del agregado pétreo total que pasa por el tamiz # 4 y queda retenido en el tamiz # 200. Constarán de arena natural y/o material obtenido del machaqueo de piedra, escoria o grava.

Las partículas serán limpias resistentes, duraderas, moderadamente angulosas y sin revestimiento de arcilla, limo u otras sustancias perjudiciales y no contendrán grumos de arcilla u otros aglomerados de material fino.

Respecto a los fenómenos de adhesividad agregado fino-ligante, hay que tener en cuenta que las acciones químicas o químico - físicas en las partículas de menor tamaño son más complejas. Su mayor superficie específica, facilidad para acumular humedad y gran heterogeneidad de su naturaleza determinan una mayor sensibilidad a toda clase de transformaciones químicas, fenómenos polares y de adhesividad, absorción, etc.

2.3.3 Filler

Se define como filler a la fracción que pasa el tamiz Nro. 200, de la mezcla compuesta por los áridos. Existen 2 tipos de filler más utilizados en la construcción de pavimentos flexibles, uno del proceso de trituración de roca natural (filler mineral) y otro proveniente de otra naturaleza como procesos industriales.

Filler mineral

El filler mineral se obtiene mediante la trituración de rocas, donde normalmente se encuentra mezclado con otros tamaños como de tamices Nro. 8, 40, 200 y de características no plástica.

Estará perfectamente seco y no contendrá grumos, ensayado por el método (AASHTO T-37, ASTM D-546) su granulometría cumplirá las siguientes condiciones:

Tabla 2.2. Granulometría filler mineral.

Número del tamiz	Porcentajes en peso seco que pasa
30	100
100	90
200	65

Fuente: Metodologías De Diseño De Pavimentos Flexibles: Tendencias, Alcances Y Limitaciones-Hugo Alexander Rondón Quintana/ Freddy Alberto Reyes Lizcano-Bogotá

2.3.4 Pruebas de laboratorio

Deben realizarse los siguientes ensayos de laboratorio de acuerdo a normas y los mismos se detallan en el capítulo 3.

Tabla 2.3 Especificaciones que debe cumplir los agregados

N°	Parámetro	Norma	Especificaciones AASHTO - ASTM
1	Abrasión de los Ángeles	AASHTO T 96	35.00% máx.
2	Granulometría agregado grueso	ASTM E 40; AASHTO T27-99	-
3	Granulometría agregado fino	ASTM E 117; AASHTO T11-96	-
4	Porcentaje de Caras fracturadas	ASTM D 5821-95	75.00 min
5	Peso específico y absorción del agregado fino	AASHTO T84 y ASTM D-128	-
6	Peso específico y absorción del agregado grueso	AASHTO T85y ASTM D-127	-
7	Peso unitario agregado grueso	AASHTO T19y ASTM C-29	-
8	Durabilidad, sulfato de sodio	AASHTO T 104	12.00% máx.
9	Partículas planas y alargadas	ASTM D-4791	-
10	Equivalente de arena	AASHTO T176 y ASTM D 2419	>45

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente

2.3.5 Pavimento asfáltico reciclado (RAP)

Se denomina RAP por sus siglas en inglés “Reclaimed Asphalt Pavement” o pavimento asfáltico reciclado que ya completó su vida útil y fue removido debido a proceso de rehabilitación, reconstrucción o recarpeteo en vías existente. Posterior a la remoción conlleva un proceso de trituración, con el fin de ser reutilizado en la conformación de una nueva mezcla.

El RAP aporta a la mezcla: agregado mineral, granulometría y asfalto, por lo que se utiliza como un agregado más en la mezcla asfáltica y debe cumplir con las propiedades mínimas que se les demandan a los agregados pétreos para su utilización en el diseño de mezcla.

Para la caracterización del RAP se practicará los ensayos que normalmente se realizan sobre agregados naturales.

Tabla 2.4 Ensayos de caracterización de RAP

Caracterización del RAP	
Análisis granulométrico	ASTM C 1236; AASHTO T 27
Desgaste de los ángeles	ASTM E 131; AASHTO T96-99
Peso específico del agregado grueso	ASTM C 127; AASHTO T -85
Peso específico del agregado fino	ASTM C 128; AASHTO T -84
Caras fracturadas	ASTM D 5821-95
Alargamiento y aplanamiento de los agregados	ASTM D-4791

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos de laboratorio anteriormente mencionados suelen practicarse a los agregados que serán empleados en una mezcla con el objetivo de poder contrastar las propiedades evaluadas en cada ensayo con los parámetros establecidos en las normas.

Consecuentemente se valida o no el uso de agregados según se observe su comportamiento a partir de las pruebas de laboratorio, ya que de estos dependen en gran manera la resistencia y durabilidad de la mezcla.

2.4 ASFALTO DE PETRÓLEO

La American Society for Testig and Materials (ASTM) define al asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido, principalmente, por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos. Los asfaltos de petróleo son las fracciones más pesadas que se obtienen del petróleo crudo, tanto por destilación a elevado vacío como por desasfaltado con propano de un residuo de vacío.

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

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

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

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

2.4.1 Propiedades del asfalto

Propiedades químicas

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

Propiedades físicas

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

2.4.2 Cementos Asfálticos

A la temperatura ambiente el cemento asfáltico es negro, pegajoso, semisólido, altamente viscoso. Es un cemento fuerte y durable con excelentes características adhesivas e impermeables. También es muy resistente a la acción de muchos ácidos y sales.

Los grados del cemento asfáltico, basados en su consistencia, son disponibles comercialmente. Para clasificar o definir la gradación del cemento asfáltico se usan tres métodos basados en la penetración, viscosidad o performance.

Son preparados especialmente por presentar cualidades y consistencias propias para su uso directo en la construcción de pavimentos asfálticos. Es un material ideal para

aplicaciones en trabajos de pavimentación por sus propiedades aglutinantes, impermeabilizantes, flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a los ácidos y álcalis en general. Se clasifican de acuerdo a su consistencia medida por la viscosidad dinámica o absoluta y por su penetración (PEN).

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

Los asfaltos obtenidos son denominados con la siguiente nomenclatura:

CAP PEN: 60/70 (Penetración 60 a 70).

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

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

2.5 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, MÉTODO MARSHALL

2.5.1 Metodología

El método de diseño de mezclas Marshall fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. Posteriormente, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró el procedimiento de prueba Marshall.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que desarrolla cuando es ensayado a una temperatura de 60 °C. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0,25 mm (1/100"), que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

El método Marshall solo establece requisitos para la granulometría y los parámetros volumétricos de la mezcla. Los requisitos de calidad del agregado y del asfalto los fijan las dependencias encargadas del desarrollo de la infraestructura.

2.5.2 Propósito de la metodología

El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla.

El método Marshall, solo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 plg) o menor. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

2.5.3 Descripción general

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2.5 plg) de espesor por 102 mm (4 plg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica. Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

- **Preparación para efectuar los procedimientos Marshall**

Los agregados y asfaltos presentan diferentes características, que tienen un impacto directo sobre la naturaleza del pavimento. El primer paso en el método de diseño, es determinar las cualidades que se necesita en una determinada mezcla asfáltica, y posteriormente seleccionar el tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

- **Selección de las muestras de material**

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras de asfalto y del agregado que van a ser utilizados en la mezcla asfáltica. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple, los datos

de los procedimientos de diseño de la mezcla determinan la "receta" para la elaboración de la mezcla final usada en el proceso de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en laboratorio tienen características idénticas a los usados en el producto final.

- **Preparación del agregado**

Los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar claramente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico y efectuar un análisis granulométrico, con la finalidad de preparar una serie de briquetas que tengan diferentes contenidos de asfalto.

Se prepara una dosificación por el método de tanteo, en función de una faja de trabajo que se adecue al proyecto, y de una granulometría conocida de los agregados disponibles (Grava de 3/4, Gravilla de 3/8, Arena Natural y filler).

Como indica el nombre del método, se tantea con diferentes porcentajes de agregado, hasta que se encuentre una combinación que se adecue de mejor manera posible a la faja de trabajo.

Sabiendo que la muestra final se tiene que elaborar con briquetas con un peso de 1200 g se determina el contenido de asfalto en peso equivalente a un porcentaje del peso total' de la briqueta, conociendo el peso del agregado que tiene que ocupar cada briqueta por la diferencia en peso entre el total de la briqueta y el peso del asfalto, se separa una dosificación en pesos retenidos, que aporta cada tamiz.

Se prepara un número determinado de muestras de agregado para cada contenido de asfalto para elaborar un punto en la curva de dosificación Marshall y se separa cada uno en fuentes o bandejas correctamente identificadas.

Es importante mencionar que, para la elaboración del método tradicional de mezcla asfáltica en caliente, el agregado tiene que estar seco, para tal fin, antes de efectuar el pesado se deja el material en horno a 110 °C durante 24 horas.

- **Preparación de las muestras de ensayo (briquetas)**

Las briquetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentos son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto, como se mencionó anteriormente. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados de análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan por separado y se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén recubiertas (esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta).
- La mezcla se vierte en los moldes, luego se procede a la compactación con el martillo, el número de golpes se especifica en la tabla 2.7 Después de completar la compactación, las briquetas se dejan enfriar para luego proceder a su extracción de los moldes.

2.5.4 Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

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

2.5.4.1 Determinación del contenido de cemento asfáltico

Corresponde a la cantidad de cemento asfáltico mínimo y óptimo que debe considerarse en la mezcla de acuerdo a los requerimientos de cada proyecto.

Contenido Mínimo

Es la cantidad de cemento asfáltico como mínimo que debe utilizarse en una mezcla asfáltica.

Contenido Óptimo

Es la cantidad óptima de cemento asfáltico cuya consecuencia es obtener las mejores características y propiedades de la mezcla asfáltica.

2.5.4.1.1 Contenido Mínimo de cemento Asfáltico

Para determinar el contenido mínimo de cemento asfáltico tenemos dos métodos que son los más utilizados.

- Método por procedimiento del área superficial
- Método por procedimiento basado en la distribución de tamaño de las partículas

Método por procedimiento del área superficial

Este procedimiento es aplicable a materiales graduados que contienen cierta cantidad de finos.

Este método está basado en la estimación de la superficie de los agregados pétreos por cada kilogramo de material; para hacer esta estimación se hace uso de las siguientes constantes:

Material pasa malla 1 1/2 ”	y retiene en 3/4 ”	0.27 m ² kg
Material pasa malla 3/4 ”	y retiene en N°4	0.41 m ² kg
Material pasa malla N°4	y retiene en N°40	2.05 m ² kg
Material pasa malla N°40	y retiene en N° 200	15.38 m ² kg

Material pasa malla N|200

Se suman todas las superficies calculadas y el resultado se multiplica por el índice asfáltico que se determina de la siguiente tabla.

Tabla. 2.5 Datos de índice asfáltico por el método del área superficial, según el material pétreo

Material pétreo	Índice asfáltico
Gravas y arenas redondeadas de baja absorción	0,0055
Gravas angulosas trituradas de baja absorción	0,0060
Gravas angulosas o redondeadas de mediana absorción.	0,0070
Gravas trituradas de alta absorción	0,0080

Fuente: Diseño y construcción de pavimentos Luis Antonio Mendoza Román

Método por procedimiento basado en la distribución de tamaño de las partículas

Este método está basado en la distribución de las partículas en el agregado cuya determinación se realiza a través de la siguiente fórmula.

$$p = 0,020*a + 0,045*b + c*d$$

Donde:

a = Porcentaje de material retenido en la malla N°10

b = Porcentaje que pasa malla N°10 y se retiene en malla N°200

c = Porcentaje que pasa la malla N° 200

d = Coeficiente asfáltico según el tipo de material

El índice asfáltico se determina de la siguiente tabla.

Tabla.2.6 Datos de índice asfáltico (d) por el método distribución de agregados, según el material pétreo

Material pétreo	Índice asfáltico
Gravas y arenas redondeadas de baja absorción	0,15
Gravas angulosas trituradas de baja absorción	0,20
Gravas angulosas o redondeadas de mediana absorción.	0,30
Gravas trituradas de alta absorción	0,35

Fuente: Diseño y construcción de pavimentos Luis Antonio Mendoza Román

Una vez obtenido el contenido mínimo de cemento asfáltico se preparan los moldes de la mezcla asfáltica con los siguientes contenidos de cemento asfáltico

Contenido mínimo – 1%

Contenido mínimo neto

Contenido mínimo + 0,5%

Contenido mínimo + 1%

Contenido mínimo + 1,5%

Contenido mínimo + 2%

Y mediante la metodología Marshall se obtendrá el contenido óptimo

2.5.4.2 Estimación del porcentaje óptimo de asfalto

La estimación del porcentaje óptimo de asfalto es de una gran ayuda y se realiza utilizando la relación propuesta por el instituto del asfalto, ya que proporciona un valor de asfalto óptimo teórico y a partir de este se establecen los demás porcentajes de asfalto para el diseño.

Relación propuesta por el Instituto del asfalto

$$\%A = 0.035a + 0.045b + K.c + F$$

Donde:

%A= % de asfalto en la mezcla

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

b = % de agregado pasante en el tamiz N°8 y se retiene en el N° 200.

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

K = 0.15, si el % que retiene el tamiz 3/4" está entre 11 % y 15 %, 0.18, si el % que retiene está entre 6 % y 10 %, 0.20, si el % que retiene es el 5 % o menos.

F = De 0 a 2 % que varía según la absorción del material (se puede asumir 0.7)

Es común emplear 5 ó 6 series de probetas que abarquen un abanico de porcentajes alrededor de 6%.

Los porcentajes para los que se trabajará en siguientes briquetas son los siguientes 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5% es decir realizaremos 3 briquetas por cada punto, y le agregaremos dicho porcentaje en peso de la muestra total, que comúnmente las pastillas se proporcionan 1200 gr. de material pétreo.

2.5.4.3 Granulometría

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.

2.5.4.4 Golpes de compactación

El proceso de compactación se realiza mediante una serie de golpes con el martillo Marshall sobre ambas caras de la muestra, según el propósito y tránsito esperado de la mezcla que se está diseñando.

Tabla 2.7 Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo.

Número de golpes			
	Alto	Medio	Bajo
Condición de tránsito que resultan en un ESALs de diseño (millones)	> 10 hasta 30	Entre 0.3 hasta 30	< 0.3
Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo	75	50	35

Fuente: Materiales, mezclas asfálticas y técnicas de preservación, división 400

2.6 RAP

2.6.1 Introducción

Un material que no se ha explotado en Bolivia es el recurso del pavimento asfáltico reciclado (RAP de sus iniciales en inglés). La reutilización de éste es un beneficio tanto económico como ambiental, económico porque el RAP posee ligante asfáltico y agregados pétreos por ende al reutilizarlo en la MAC disminuye los porcentajes de materiales vírgenes, y ambiental debido a que disminuye la explotación de los recursos naturales no renovables (agregados pétreos y ligante asfáltico) y disminuye los escombros de construcción que van directo a los botaderos.

Imagen 2.1 Acopio de materiales RAP



Fuente: Evaluación de mezclas asfálticas reciclables Martínez Montaña y Higuera Sandoval,C.H. 2016

El RAP, consiste en el material recuperado de un pavimento flexible que ha alcanzado el final de su vida de servicio; no obstante, sus características permiten reutilizarlo como parte de estructuras nuevas o rehabilitadas. La incorporación de este material en mezclas asfálticas favorece la reducción de nuevo material, generando ahorros a nivel de costos y a su vez contribuyendo a la conservación de los recursos naturales.

El propósito primordial de la implementación del RAP como componente de la mezcla asfáltica se direcciona hacia la sostenibilidad, como medida de mitigación del impacto ambiental producto de la reutilización de un material de desecho con alto potencial mecánico y reducción en la extracción de fuentes de agregados. Por otro lado, en el ámbito económico, la sustitución de un porcentaje de material de mezcla asfáltica representa un ahorro en la cantidad de ligante asfáltico y agregados vírgenes requeridos para la producción de la mezcla, impactando el costo del producto final.

Las características mecánicas del RAP, así como su papel como potencial abaratador de la mezcla asfáltica, representan tan solo algunos de los beneficios del material. No obstante, la implementación de la técnica demanda buenas prácticas, las cuales deben estar presentes tanto en los procesos de recuperación, triturado e incorporación del material,

asegurando la correcta distribución y recubrimiento de las partículas de agregado para garantizar el aporte a las propiedades de la mezcla asfáltica final.

2.6.2 Definición

Se denomina RAP por sus siglas en inglés “Reclaimed Asphalt Pavement” o pavimento asfáltico reciclado a materiales procedentes de las capas estructurales de pavimentos asfálticos que son removidos y/o reprocesados, el cual se utiliza para construir nuevas mezclas asfálticas. De acuerdo con Han, Thakur, Chong y Parsons (2011), tanto el agregado como el ligante asfáltico que conforman el RAP aún poseen la capacidad de aportar ciertas propiedades en una nueva estructura de pavimento.

2.6.3 Extracción

El RAP se obtiene mediante alguno de los siguientes procesos:

- Extracción por Fresado: Extraer el nivel superior del pavimento.

Imagen 2.2 Extracción por fresado



Fuente: El reciclaje de los pavimentos asfálticos

- Extracción por fractura.

Imagen 2.3 Extracción por fractura



Fuente El reciclaje de los pavimentos asfálticos

2.6.4 Aplicaciones

La Federal Highway Administration (FHWA, por sus siglas en inglés) define las principales aplicaciones del uso de RAP en la construcción y mantenimiento de carreteras, según se define a continuación (Han, Thakur, Chong y Parsons, 2011).

2.6.4.1 Agregado de una base

El agregado del RAP es procesado y mezclado con material virgen para producir agregado para bases o subbases granulares como componentes de la estructura de pavimento. Huntington, Khaled & Koch (2013) intervinieron 4 carreteras de lastre ubicadas en el Condado de Jhonson y el Condado de Sweetwater, ambos en Wyoming, las cuales fueron construidas en diferentes tramos con porcentajes de agregado RAP entre el 50 y el 80 %. En el desarrollo del proyecto se identificaron problemas de mezclado y compactación de RAP. Los autores enfatizan en posibles problemas de segregación del material a largo plazo.

2.6.4.2 Agregado de bases estabilizadas

EL RAP es procesado y mezclado con agentes estabilizadores y compactado de manera que obtenga una mayor capacidad mecánica en la mezcla final. Al-Harty, Al-Shamsi, Al-Zubeidi, & Taha, desarrollaron en el 2002 una investigación en Omán, donde se utilizaron porcentajes de RAP desde el 70 hasta 100 %. De la investigación, los autores concluyen que esta aplicación permite una disminución en el espesor de la capa requerida en comparación con una base granular convencional.

2.6.4.3 Mezcla asfáltica

La aplicación en mezcla asfáltica puede ser implementada a partir de dos métodos: procesamiento en planta y reciclado en campo. El primero de ellos consiste en el mezclado del RAP con los materiales de la mezcla asfáltica nueva, para ello el material de RAP es procesado hasta obtener la gradación requerida, posteriormente se realiza el proceso de mezclado con agregado y asfalto virgen, en algunos casos con agentes rejuvenecedores hasta obtener la mezcla asfáltica requerida. El segundo método de ellos consiste en el reciclado en campo, en el cual el material de RAP se utiliza con las características con las que fue recuperado en campo. En este caso la superficie del pavimento es fresada hasta una profundidad de 150 mm y combinado con emulsión asfáltica para posteriormente ser colocado y compactado a partir del procedimiento convencional. En ambos casos se debe tomar en cuenta el aporte que puede tener el asfalto del RAP en la mezcla final.

Otras aplicaciones

Otra de las aplicaciones comprende la utilización de RAP en bloques de asfalto como adoquines, de acuerdo a las investigaciones desarrolladas por Abdelgalil & Nor (2014), Jenkins (2000), Armijos (2011) y por la empresa HANOVER de los Estados Unidos (HANOVER). La investigación liderada por Marín (2016) evaluó el desempeño de un tramo experimental construido con adoquines conformados con material de RAP, a nivel de planta se identificaron problemas de cohesión en la mezcla para contenidos por encima de 25% de RAP. Consistente con los hallazgos anteriores, se recomienda la utilización de este material para caminos de bajo volumen.

2.6.5 Beneficios de la utilización de RAP

2.6.5.1 Beneficios ambientales

Los beneficios a nivel ambiental producto de implementación de mezclas asfálticas con RAP comprenden:

- Reutilización de material que ha finalizado su vida útil.
- Disminución del volumen de botaderos.
- Disminución de suministro de material virgen.
- Reducción en los procesos de extracción de materias primas limitadas.

2.6.5.2 Beneficios económicos

Desde el punto de vista económico se asocian los siguientes beneficios:

- Reducción de costos en pavimentación.
- Ahorro en importación y extracción de materia prima (asfalto y agregados).
- Disminución en las importaciones de los productos asociados a la obra.
- Reducción en los porcentajes de ligante asfáltico requerido en la mezcla.

2.6.6 Tipos de reciclado

2.6.6.1 Reciclados In situ “en el lugar”

En caliente

En frío

2.6.6.2 Reciclados en Planta

En caliente

En frío

2.6.6.1.1 Reciclado “in situ” en caliente.

Son utilizados cuando no existen problemas de insuficiencia estructural en los pavimentos, sino cuando hay problemas con la función del ligante asfáltico, excesivo pulimento de la superficie, desgaste de los áridos o pérdida de la textura superficial, éste reutiliza la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido mediante un tratamiento con aportación de calor que se realiza en el mismo lugar de la obra. El firme se calienta

mediante unos quemadores y se fresa un grosor determinado. Este material es mezclado normalmente con agentes químicos rejuvenecedores y con una nueva mezcla. Finalmente, la nueva mezcla se extiende y se compacta mediante los procedimientos convencionales.

2.6.6.1.2 Reciclado in-situ en frío

Las máquinas de reciclado han evolucionado a través de los años, desde las primeras máquinas modificadas para fresar y estabilizar suelos, hasta las recicladoras especializadas utilizadas hoy en día. Estas recicladoras son especialmente diseñadas para lograr la capacidad de reciclar capas de pavimento de gran espesor en una sola pasada. Las recicladoras modernas tienden a ser máquinas grandes y potentes, las cuales pueden estar montadas sobre orugas o sobre neumáticos de flotación.

Reciclado “in situ” en frío con cemento.

Este es un procedimiento que se basa en el fresado en frío de un cierto grosor del firme envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico (cemento normalmente). El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos. El reciclado in situ con cemento es una alternativa para el refuerzo estructural de firmes agotados cuya aceptación y popularidad es cada vez mayor en todo el mundo. Ello es debido a varios factores: los avances en las recicladoras, los distribuidores de conglomerante y los equipos de compactación; un mejor conocimiento de las propiedades de los materiales reciclados con cemento; el comportamiento de muchos firmes reciclados con esta técnica; la posibilidad de contar con empresas de gran experiencia y la reducción de los costos que es posible conseguir en comparación con otras opciones de rehabilitación. En la actualidad el reciclado con cemento es una técnica muy utilizada en un gran número de países; entre sus líderes están: Australia, Estados Unidos, Francia, Sudáfrica y España. Sus aplicaciones no se limitan solo a firmes de carreteras, también se han utilizado en algunos aeropuertos. Como resultado de esta amplia experiencia, el reciclado con cemento, empleado en un principio únicamente en vías de baja intensidad de tráfico, se aplica ya en carreteras con un importante volumen de vehículos pesados.

Reciclado “in situ” en frío con emulsiones bituminosas (RFSE).

El reciclado en frío “in situ” de firmes y pavimentos de carreteras consiste en la reutilización de materiales procedentes de las capas de firme existente, después de su disgregación por fresado, de su mezclado y homogeneización con emulsión bituminosa, agua envuelta y, eventualmente, árido de corrección y aditivos, y de su extendido y compactación en el propio lugar de extracción. Esta técnica, permite reutilizar la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido en condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales muy favorables.

2.6.6.2.1 Reciclado en planta en caliente:

Este reciclado consiste en la reutilización de los materiales recuperados (RAP) de las capas envejecidas del pavimento asfáltico o flexible, mediante fresado o demolición mecánica, además de mezclas nuevas por no haber cumplido con las especificaciones o exigencias del proyecto, para su posterior tratamiento en una planta de fabricación de mezclas asfálticas en caliente. Estos son mezclados con áridos vírgenes, asfalto y agentes rejuvenecedores en ocasiones en las proporciones adecuadas para producir nuevas mezclas que cumplan con los requerimientos de calidad, resistencia y durabilidad exigidos para el tipo de capa asfáltica que serán utilizados. También deben cumplir con las prescripciones exigidas a las mezclas asfálticas en caliente convencionales.

Es el proceso mediante el cual los materiales recuperados de capas bituminosas de pavimento deteriorados, son mezclados con árido virgen, asfalto nuevo y/o agente rejuvenecedor, en las proporciones adecuadas, para producir nuevas mezclas en caliente que cumplan con los requerimientos de calidad, resistencia y durabilidad exigidos para el tipo de capa en que serán utilizados.

En general, el 100% de los materiales recuperados de pavimentos deteriorados son susceptibles de ser reciclados. Generalmente, la utilización de mezclas recicladas está enfocada a la rehabilitación de rutas existentes, sin embargo, pueden formar parte de pavimentos de nueva construcción, sin que esto signifique un problema de calidad, resistencia o durabilidad.

El proceso de fresado o demolición de las capas asfálticas se realiza retirando las mezclas en forma de bloques, extraídos con palas, martillos neumáticos rompedores o con masas de caída libre o mediante los escarificadores de los Buldóceres, si se trata de la eliminación completa del conjunto de las mezclas. Empleando el fresado se utiliza la misma maquinaria que para los reciclados “in situ”, eliminándose una parte de la capa asfáltica del pavimento flexible. Este material es trasladado a la planta donde es machacado o triturado, ensayándolo para ver las propiedades de los materiales componentes, así como clasificación granulométrica y adicionado para elaborar nuevas mezclas.

2.6.6.2.2 Reciclado en planta en frío

El tratamiento en planta permanece siempre como una opción que debería ser considerada cuando el reciclado tiene aplicación, particularmente en aquellos proyectos que requieren una mezcla de materiales vírgenes a ser tratados, y también cuando son tratados con asfalto espumado y luego almacenados en acopios para su uso posterior.

Los principales beneficios del reciclado en planta versus el reciclado in situ son:

- Control de los materiales de entrada. Mientras que el reciclado in-situ permite un control limitado del material recuperado del pavimento existente, el reciclado en planta permite producir un producto final específico al mezclar distintos tipos de agregados. Los materiales de entrada pueden ser almacenados en acopios y ser sometidos a ensayos antes de producir la mezcla, y también es posible cambiar la proporción de los mismos en la mezcla.
- Calidad de mezclado. Es posible realizar modificaciones en la operación de mezclado continuo para variar el tiempo en que el material es retenido dentro de la cámara de mezclado, cambiando la calidad de la mezcla.
- Posibilidades de acopiar el material. Particularmente en los materiales tratados con asfalto espumado, el producto producido puede ser almacenado y ser utilizado cuando sea requerido, y de ese modo evitar la dependencia de la producción de la mezcla y la colocación de la misma.

2.6.7 Transporte, puesta en obra y compactación de mezclas asfálticas recicladas en caliente en planta

Para el transporte, puesta en obra y compactación de las mezclas recicladas en caliente en planta, se utilizan los mismos procedimientos y equipos que se emplean cuando se trata de mezclas convencionales.

2.7 UTILIZACIÓN DEL ASFALTO RECICLADO

El reciclaje y la reutilización de pavimentos de asfaltos recuperados (RAP) comenzaron hace más de 30 años. Cada año, alrededor de 50 millones de toneladas de RAP se producen en Europa y una gran cantidad de estos 50 millones de toneladas es reutilizada. El objetivo es alcanzar el 100%.

El desarrollo de mezclas utilizando Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) es común en muchas partes del mundo ya que presenta beneficios tanto económicos como ambientales, sin embargo, no se ha explotado su potencial en Bolivia.

El asfalto es 100% reciclable/reutilizable y, para el desarrollo sostenible, se debe alentar su reciclaje/reutilización. Los procesos de reutilización del asfalto siguieron evolucionando, en los últimos años ha habido un progreso cuantitativo, es decir, un aumento de las tasas de reutilización en diferentes tipos de asfalto.

En Alemania, se producen más de 11 Millones de toneladas de RAP cada año a partir del cual se reutilizan cerca de 90%. En los Estados Unidos son cerca de 85% de los 93 Millones de toneladas producidas.

Una de las razones por que no pueden reutilizarse 100% del asfalto es la presencia de asbesto que se considera tóxico. Antiguamente se utilizaba asbesto la construcción de carreteras y hoy esto es considerado carcinogénico.

En los Países Bajos existen plantas especiales que pueden quemar este material. Otro uso es el llamado “downcycling” o capa inferior de la pista.

En Alemania existen 650 plantas productoras de mezclas asfálticas con la producción actual de 41 Millones de toneladas siendo en torno de 10 Millones de toneladas de asfalto

reciclado reutilizable, lo que significa cerca de 25% de la producción. En los Estados Unidos este porcentaje es muy similar: 1.158 plantas productoras de mezclas asfálticas producen 330 mil toneladas de mezclas de las cuales 25% es reciclado.

Tabla 2.8 Producción de mezclas asfálticas.

País	Producción mezclas asfálticas (t)	Producción asfalto reciclado (t)	Reutilización del asfalto reciclado (%)
Turquía	46.200.000	1.200.000	3
Alemania	41.000.000	11.500.000	90
Francia	35.400.000	6.900.000	64
Italia	22.300.000	10.000.000	20
Reino Unido	19.200.000	5.000.000	80
España	13.300.000	205.000	85
Países Bajos	9.700.000	4.500.000	90
Estados Unidos	332.000.000	80.000.000	95
Europa	300.000.000	56.000.000	75

Fuente: Tasas de reciclaje en diferentes países Siteb

2.7.1 Requisitos Previos Para Alta Tasa De Reciclaje

Los prerrequisitos técnicos para una alta tasa de utilización del material reciclado imponen altas exigencias a los productores de asfalto y su planta. La producción de una nueva mezcla de asfalto utilizando, asfalto reciclado requiere, algunos cambios tecnológicos en la planta, con el objetivo de agregar más partes de asfalto reciclado.

La extracción y recuperación selectiva, la molienda de los gránulos, la adición selectiva, el almacenamiento adecuado para la gestión selectiva basada en tipos y el almacenamiento en seco son algunos de los requisitos que son básicos para el uso de reciclado.

A parte de eso, el suave calentamiento del asfalto es de crucial importancia aquí. El mayor desafío es conseguir que el RAP sea calentado a la temperatura necesaria sin dañarlo y causando el mínimo envejecimiento del aglutinante asfáltico.

Diferentes tecnologías están disponibles en la producción de asfalto, dependiendo de la cuota de reciclaje deseada:

- Sistemas para la adición en frío de material como ascensor y admisión en mezclador para uso con hasta 25% de material RAP
- Secador de anillo central para uso con hasta 40% de material RAP
- Secador DC para uso de hasta 60% de material reciclado caliente
- Secador de contracorriente para el uso de material 100% reciclado en caliente 165°C
- Secador de contracorriente para el uso de material 100% reciclado en caliente 125°C

Cuanto más eficiente y sofisticada es la planta, más reciclado se puede agregar, tomando en consideración también los demás aspectos ya mencionados, como por ejemplo tipo de carpeta.

2.8 MÉTODO DE CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE REUTILIZACIÓN DE RAP EN LA NUEVA MEZCLA

2.8.1 El método de la homogeneización

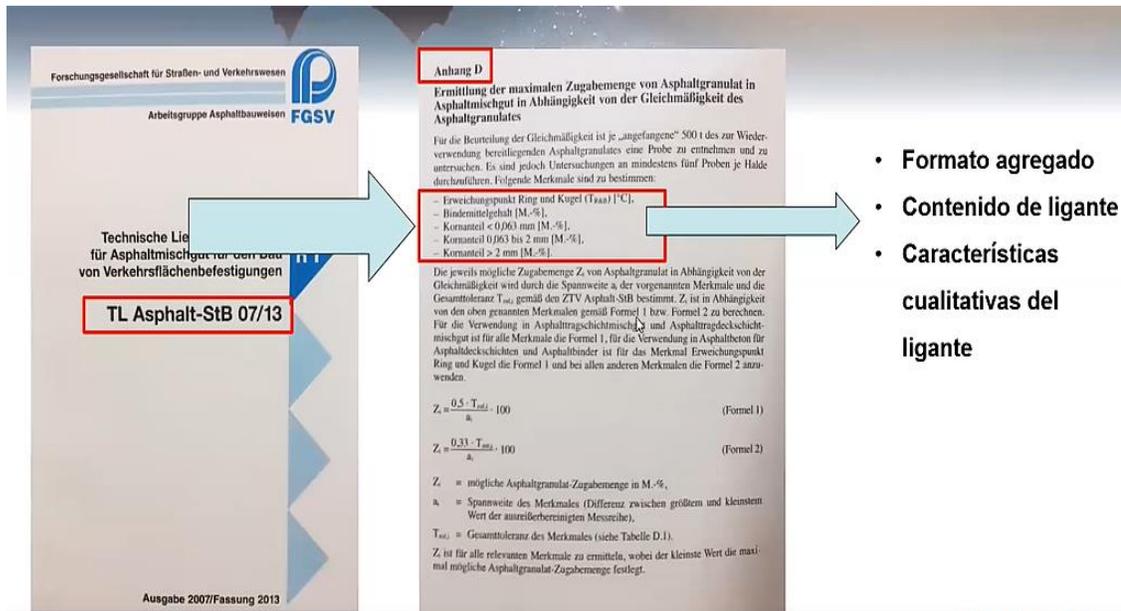
El principio de la homogeneización utilizado en Alemania dice que la uniformidad de la mezcla es fundamental y debe evaluarse por referencia a una gama de características de los materiales contenidos en la mezcla.

Para caracterizar el material, debe examinarse sus características principales:

- Determinación del Contenido del aglutinante asfáltico
- Determinación de la distribución del tamaño de los áridos:
 - Fracción de granulado <0,063 mm [M .-%]
 - Fracción de granulado de 0,063 - 2 mm [M. -%]
 - Fracción de granulado > 2 mm [M .-%]

El procedimiento para determinar la cantidad máxima de adición de granulado de asfalto en la nueva mezcla se describe en el Anexo D del Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07.

Imagen 2.4 Metodología alemana para cálculo del porcentaje de RAP



Fuente: Anexo D del Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07.

2.8.1.1 Determinación del contenido de aglutinante asfáltico en la mezcla asfáltica

Una de las atribuciones más importantes y fundamentales de la norma EN 12697 es la primera parte (EN 12697-1) que trata de la determinación del contenido de aglutinante asfáltico en la mezcla asfáltica.

En los Estados Unidos la norma ASTM D 8159 acaba de ponerse en acción y el método estándar de combustión utilizado en el pasado está condenado a desaparecer. La determinación del contenido de aglutinante asfáltico en las mezclas asfálticas recicladas es generalmente un proceso de trabajo intensivo, con el uso de solventes, predominantemente los hidrocarburos clorados, lo que puede ser muy perjudicial para la salud y el medio ambiente.

Sin embargo, equipos modernos y de alta tecnología consiguen extraer y recuperar todo el aglutinante asfáltico contenido en una mezcla asfáltica usando un sistema de extracción automático, haciendo esté trabajo en un ambiente cerrado, seguro y respetuoso con el medio ambiente, con foco en la sustentabilidad.

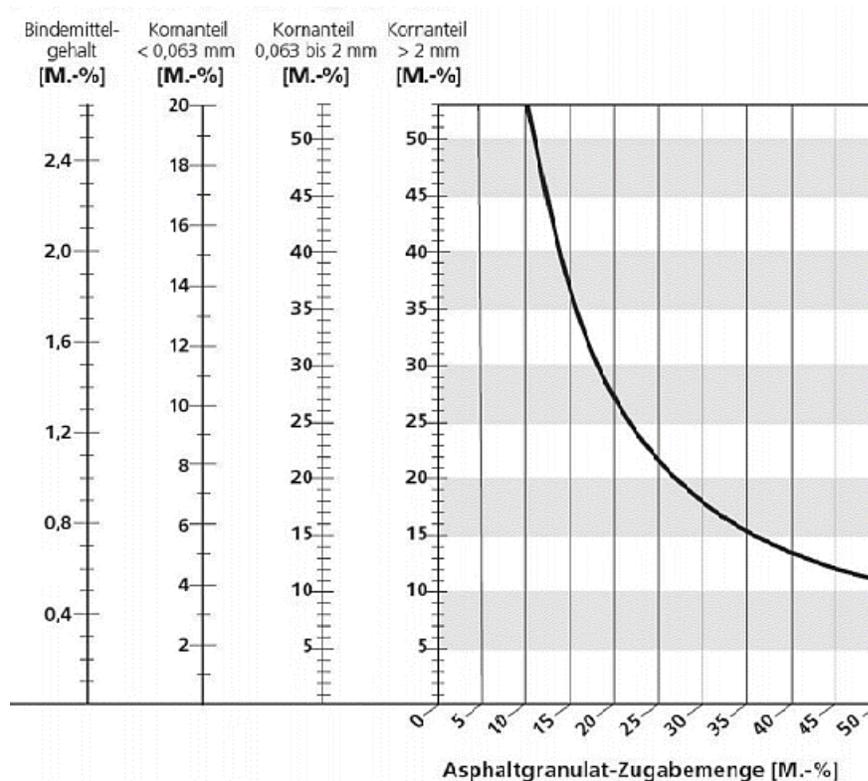
2.8.1.2 Determinación de la cantidad de adición del RAP

Para la evaluación de la homogeneidad, se debe tomar una muestra y examinarla en sus características principales.

La adición máxima resultante de la homogeneidad del granulado de asfalto es el menor de los valores determinados para esas características (contenido de aglutinante y conteos de partículas de áridos de 0 a 0.063 mm, de 0.063 a 2 mm y > 2 mm).

Con la ayuda del nomograma (figura 2.5), podemos ver el máximo posible del RAP en la nueva mezcla.

Imagen 2.5 Máxima cantidad de adición de RAP en %



Fuente: Anexo D del Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07.

Las cantidades máximas de adición también dependen del tipo de capa. Para su uso en la capa de base, capa sub base y capa binder constante 0.5, para rodamiento, constante 0.33

$$Z_i = \frac{\text{const.} * T_{zul,i}}{a_i} * 100$$

Donde:

Z_i = Es la Posible cantidad de suministro de asfalto reciclado en M.-%,

a_i = Es la envergadura de la función (diferencia entre el valor más grande y el más pequeño de la serie de medición de valores atípicos)

T_{zul,i} = Es la tolerancia total (véase la tabla 2.9)

Const. = Constante 0.5 para capas bases, capas sub bases y capas binder y 0.33 para capas de revestimiento

Es necesario determinar todos los valores de Z_i. El menor valor determina la cantidad máxima posible de asfalto reciclado.

Tabla 2.9 Cuadro de tolerancia T_{zul, i} de características relevantes dependiendo del tipo de capa.

Características	T _{zul,i}	
	Capa de rodamiento, capa de revestimiento	Capa de base Capa sub bases , binder
Contenido de aglutinante [M.-%,]	0.8	1
Fracción de áridos < 0.063 mm [M.-%,]	6	10
Fracción de áridos 0.063 bis 2 mm [M.-%,]	16	16
Fracción de áridos > 2 mm [M.-%,]	16	18

Fuente: Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07

2.8.2 El método PG-Grade

2.8.2.1 Definición

El sistema (PG) es el método para categorizarse un cemento asfáltico utilizado su rendimiento observado en diferentes temperaturas. Fue originalmente desarrollado durante el programa de desarrollo de la investigación en marcha (SHRP) 1990's y se llamó "SuperPave." El grado de desempeño o Grado PG es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente.

2.8.2.2 Especificación

El grado de desempeño o Grado PG es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. La especificación "SuperPave." Para ligantes asfálticos define el grado de desempeño (PG) con base en registros de temperaturas ambiente de estaciones meteorológicas por un periodo mínimo de 20 años. Se calcula el promedio y la desviación estándar de las temperaturas máximas del aire de los 7 días consecutivos más calurosos del año y el promedio y la desviación estándar de la temperatura mínima del aire del día más frío del año.

2.8.2.3 Niveles de variación del grado PG

El grado de desempeño varía en niveles, cada nivel equivale a 6°C tanto en altas temperaturas como en bajas temperaturas. Los investigadores del "SuperPave." vieron que debería juntarse por niveles y cada nivel equivale a 6 grados de diferencia.

Tabla 2.10 Rangos para el grado PG a diferentes temperaturas

Clasificación a alta temperatura	Clasificación a baja temperatura
PG 46	-34, -40, -46
PG 52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46
PG 58	-16, -22, -28, -34, -40
PG 64	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG 70	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG 76	-10, -16, -22, -28, -34
PG 82	-10, -16, -22, -28, -34

Fuente: Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas SUPERPAVE

2.8.2.4 Cálculo de las temperaturas del aire

Para ello necesitamos datos de las condiciones de registro de temperaturas ambiente necesitamos datos de las temperaturas máximas y mínimas del aire por un periodo mínimo de 20 años; con base en esos datos de temperaturas máximas y mínimas por un período de 20 años nosotros podemos hacer un cálculo de los promedios para el caso de la temperatura máxima de los siete días consecutivos más calientes del año, es decir de cada año se escoge los siete días consecutivos más calientes del año y con eso podríamos tener el promedio de esos siete días consecutivos más calientes del año; si tenemos 20 años entonces tendríamos 20 datos y lo que hacemos después a esos 20 datos es sacar el promedio y se saca la desviación estándar y con base en esa data de condiciones climáticas se va a calcular la temperatura máxima del pavimento o la temperatura máxima a la cual va a llegar el pavimento; por otro lado tenemos a la temperatura mínima y la temperatura mínima establecen que la temperatura mínima será pues aquel representado por el día más frío del año, entonces si tenemos datos climatológicos de 20 años de cada año vamos a escoger el día más frío es decir la temperatura más fría, la más extrema y si tenemos 20 años tenemos entonces 20 datos de temperaturas frías; a esos 20 de datos le sacamos el promedio y le sacamos la desviación estándar y con base en este dato ya empezamos a calcular las temperaturas máximas y mínimas del pavimento en base a modelos establecidos justamente por el programa SUPERPAVE.

El cálculo de la temperatura máxima y mínima del aire depende de la confiabilidad requerida (z) y de la desviación estándar de los datos (σ):

$$T_{MAX\ ar} = T_{media} + z^* \sigma$$

$$T_{MIN\ ar} = T_{media} - z^* \sigma$$

Donde:

$T_{MAX\ ar}$ = Promedio de las temperaturas máximas del aire de 7 días consecutivos (°C)

$T_{MIN\ ar}$ = Temperatura mínima del aire (°C)

2.8.2.5 Cálculo de las temperaturas del pavimento

Las temperaturas máximas y mínima del pavimento son calculadas a partir de las temperaturas del aire y de un coeficiente (Lat.), en función de la localización geográfica (latitud).

2.8.2.5.1 Temperatura máxima del pavimento

Primer modelo, desarrollado por el SHRP para el cálculo de las temperaturas máximas del pavimento a **20 mm** de profundidad, propuso la siguiente ecuación (**McGennis et al., 1994**):

Modelo SHRP Original (McGennis et al.,1994)

$$T_{MAX} = 0.9545*(T_{MAX\ ar} - 0.00618*Lat^2 + 0.2289* Lat + 42.2) - 17.78$$

Modelo LTPP Bind (Mohseni, 1996) Basado en 30 pistas experimentales

$$T_{MAX} = 54.32 + (0.77585*T_{MAX\ ar}) - (0.002468*Lat^2) - [15.137*\log_{10}(H+25)]$$

Modelo LTPP Bind (Mohseni e Carpenter, 2004) - ICM

ICM basado en datos de aproximación 8000 estaciones meteorológicas

$$T_{MAX} = 32.7 + 0.837*T_{MAX\ ar} - 0.0029*Lat^2 + z * (\sigma^2 + \delta_{modelo}^2)^{1/2}$$

Donde:

$$\delta_{modelo} = \text{Error estándar de modelo} = 2.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.8.2.5.2 Temperatura mínima del pavimento

Para el cálculo de las temperaturas mínimas el SHRP original recomienda considerar la temperatura del pavimento igual a la temperatura mínima del aire que es una recomendación bastante conservadora, porque generalmente la temperatura del pavimento es superior a la temperatura del aire.

Modelo SHRP original (McGennis et al., 1994)

$$T_{MIN} = T_{MIN\ ar}$$

Modelo C- SHRP (Canadá)

Los investigadores del C-SHRP (SHRP Canadiense) recomiendan utilizar la ecuación

$$T_{MIN} = 0.859 * T_{MIN\ ar} + 1.7$$

Modelo LTPP Bind (Mohseni, 1996) Basado en 30 pistas experimentales

$$T_{MIN} = -1.56 + (0.71819 * T_{MIN ar}) - (0.003966 * Lat^2) + [6.264 * \log_{10}(H+25)]$$

Modelo LTPP Bind (LTPP-FHWA, 1998 e Bosscher, 2000)

$$T_{MIN} = -1.56 + 0.72 * T_{MIN ar} - 0.004 * Lat^2 + 6.26 \log(H+25) - z * (4.4 + 0.52 * \sigma^2)^{1/2}$$

2.8.2.6 Determinación del grado PG

El grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante.

Una vez que calculamos las temperaturas del pavimento con base a modelos teniendo en consideración la temperatura ambiente de proyecto vamos a poder determinar cuál es el grado de desempeño del pavimento.

Por ejemplo la temperatura del pavimento nos dio 61 grados, entonces 61 en qué rango se encuentra, se encuentra en un rango que es mayor a 58.1 pero menor o igual a 64 correcto, entonces cuál sería el PG que requerimos a la alta temperatura sería 64, qué pasa si la temperatura sería 60 igual sería 64 y que pasa si la temperatura fuese 64, también sería 64 y que tal que fuese 64.1 ya sería el PG de 70 los rangos van variando de 6 en 6 grados lo mismo pasa hacia la baja temperatura, "SuperPave", arranca en menos 10°C bajo cero que es lo mínimo hacia la baja temperatura y va de 6 en 6 es decir de -10°C pasa a -16°C. Para un PG 76-10.

Imagen 2.6 Clasificación del grado de desempeño PG



Fuente: Guías de selección de aglutinantes para mezclas de RAP según AASHTO M 323

El grado PG lo que está dando es el rango de trabajo del asfalto ósea hasta qué temperatura alta va a trabajar ese ligante asfáltico de manera correcta y hasta qué

temperatura baja también va a trabar de manera correcta sin presentar problemas de deterioro.

La norma AASHTO recomienda tres niveles de uso de RAP. El primer nivel establece la cantidad máxima de RAP (15 %) que se puede utilizar sin cambiar el grado PG del ligante virgen. El segundo nivel, de 15 a 25 %, se puede utilizar cuando el grado de desempeño del ligante virgen se reduce en un grado. El tercer nivel es para los contenidos de RAP superiores (más del 25 %); para estos contenidos más altos, es necesario extraer, recuperar, y ensayar el ligante RAP.

2.8.2.7 Procedimiento a realizar

El objetivo del proceso de evaluación es determinar las propiedades importantes de los materiales componentes para llegar a una combinación óptima de materiales para satisfacer los requisitos de la nueva mezcla. Los pasos específicos del proceso de evaluación de materiales y de diseño de mezclas son los siguientes:

- Obtener muestras de campo representativas de la mezcla reciclada.
- Obtener datos de temperaturas máximas y mínimas para luego calcular la temperatura del pavimento
- Realizar los ensayos de laboratorio:
- Calcular el grado PG del aglutinante asfáltico reciclado
- Evaluar las mezclas realizadas con RAP versus grado de desempeño PG

2.9 MARCO NORMATIVO EN ALEMANIA

Los estándares para la pavimentación de carreteras en Europa se definen en las "Directrices para la estandarización de la superestructura de áreas de tráfico" siendo que todos los ensayos son llevados muy a serio y seguidos a la raya por todos los participantes del ciclo de construcción, desde el proveedor de materiales hasta el cliente final.

2.9.1 Carreteras y Reglamentos.

Alemania posee cerca de 13.000 kilómetros de carreteras y 39.500 Km de carreteras federales y cerca de 67.000 puentes sobre la responsabilidad del gobierno federal. Además, son 86.000 km de carreteras estatales y provinciales en la jurisdicción de los estados. Las condiciones de tráfico pesado en las calles y carreteras tienen una

participación cada vez mayor y requiere un cuidado especial en lo que se refiere al dimensionamiento y la implementación de las características teóricamente calculadas en la construcción de las carreteras. El número de vehículos en las carreteras, principalmente los comerciales ha aumentado mucho en los últimos años.

Más del 90% de la red de carreteras total tiene una superficie de asfalto. Más de 300 Millones de toneladas de asfalto caliente se producen al año en Europa y aproximadamente 5 Millones de toneladas de mezclas frías. Hay más de 4.000 lugares de producción de asfalto en Europa y más de 10.000 empresas participan en la producción y/o en la aplicación del asfalto.

Imagen 2.7 Mapa de las carreteras en Alemania (2018)



Fuente: InfraTest Systems

Por esta razón, Alemania es muy exigente en lo que se refiere a la elección de socios para la construcción de carreteras. Es necesario atestar una excelente calidad de construcción y calidad de materiales para conseguir siquiera participar en un concurso público de una obra de carreteras.

La construcción en general está determinada por los reglamentos existentes que se siguen rígidamente. Los estándares para la pavimentación de carreteras dentro y fuera de las zonas edificadas están definidas en las "Directrices para la estandarización de la superestructura de áreas de tráfico" (RstO) y en las "Directrices para la estandarización de la superestructura en la renovación de áreas de tráfico" (RstO- E).

2.9.2 Normas DIN

DIN es el acrónimo de Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización). El Deutsches Institut für Normung (su marca empresarial es DIN), con sede en Berlín, es el organismo nacional de normalización de Alemania. Elabora, en cooperación con el comercio, la industria, la ciencia, los consumidores e instituciones públicas, estándares técnicos (normas) para la racionalización y el aseguramiento de la calidad.

En Alemania las normas vigentes son las normativas nacionales TP – "**Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau**" (pruebas técnicas para asfalto en carreteras), realizada por la Sociedad de Investigación de Carreteras y Transportes (FGSV) que es una asociación técnica y científica sin fines de lucro que fue fundada en 1924 con el objetivo principal de desarrollar los conocimientos técnicos en todo el sistema de carreteras y tráfico.

La sociedad FGSV actúa en cooperación con el Instituto Alemán de Normalización (DIN) y como comités de los órganos competentes en el Comité Europeo de Normalización (CEN) y contribuye para la creación de las normas europeas (EN).

Los reglamentos técnicos publicados por la FGSV son seguidos por todos los miembros que forman parte de la cadena de calidad para la construcción de carreteras, desde las refinerías, plantas de asfalto, constructoras, laboratorios independientes de ingeniería hasta las autoridades tributarias o las alianzas público-privadas que, son los propietarios de las carreteras y por lo tanto también interesados en carreteras de calidad a largo plazo lo que significa larga vida con costos mínimos de mantenimiento.

2.9.2.1 Ensayos Técnicos.

La preparación de una mezcla asfáltica normalizada es fundamental para la calidad de la vía pavimentada. Los métodos de ensayo para asfalto se describen en la EN 12697 "Métodos de ensayo para mezclas asfálticas". Siguen los métodos de ensayo para clasificar los materiales (agregados y ligantes bituminosos).

Para las operaciones en el marco de los estudios de diseño de asfalto debe garantizarse que los agregados y el ligante que se utilice para la producción de asfalto tengan el marcado CE.

Marcación o Certificado de conformidad CE es un indicativo de cumplimiento obligatorio para diversos productos comercializados en Europa e indica que un producto atiende las legislaciones de la Unión Europea. El marcado CE es colocado por el propio fabricante, el cual asume íntegramente toda la responsabilidad por la conformidad del producto en cumplir con las directivas legales vigentes en Europa.

Además, son necesarios los ensayos de rendimiento que determinan la influencia del tráfico, carga y clima en las construcciones.

2.9.2.2 Inspección inicial y certificado de aprobación

El Parlamento Europeo, teniendo en cuenta el tratado de la Unión Europea, considera las aprobaciones, especificaciones y disposiciones técnicas relacionadas con la construcción, fundamentales y necesarias para garantizar la vida larga y sana de las carreteras.

El fabricante de mezclas asfálticas es responsable de la inspección inicial y de las pruebas en muestras tomadas en fábrica y por el control en la producción.

Los Laboratorios de Ensayos autorizados por el Gobierno Nacional y la Comisión Europea o los Organismos de Certificación también son responsables por la inspección inicial y por pruebas de muestras tomadas aleatoriamente en la fábrica, en el mercado o en el sitio de obras y por el monitoreo continuo de la producción de la fábrica.

La inspección inicial se compone de una serie de pruebas iniciales obligatorias, de conformidad con los requisitos pertinentes de las normas europeas armonizadas y debe realizarse antes de la primera utilización del producto. Estas pruebas son de responsabilidad del fabricante de la mezcla asfáltica y éste debe contratar un laboratorio (propio o de otra autoridad) para proceder a las pruebas.

Los resultados de las pruebas iniciales sirven como base para la evaluación de muestras realizadas en la producción de la fábrica y como requerimiento para la determinación de los niveles de satisfacción operativa.

Forma parte de la inspección inicial, de conformidad con la normativa europea EN 13108 y la normativa alemana TL Asfalto-STB.

La **norma EN 13108** especifica los requisitos para las mezclas asfálticas destinadas a ser utilizadas en la construcción de carreteras, aeródromos y otras zonas de tráfico, para capas superficiales, capas intermedias y capas de base, tanto para las mezclas asfálticas calientes como para mezclas que contienen emulsiones de betún y materiales basados en el reciclaje del asfalto. Todas están cubiertas por este estándar. Esta norma europea señala los requisitos para la selección de materiales, a saber:

Agregados

- Tipo y origen
- Porcentaje de categoría de granos (granos, finos, menores que 0,063 mm, menores de 0,125 mm)
- Densidad

Ligante bituminoso

- Tipo y origen
- Punto de ablandamiento Anillo y Bola inicial del ligante
- Penetración
- Recuperación elástica.

Aditivos

- Tipo de aditivo
- Cantidad de aditivos.

Mezcla Asfáltica

- Contenido del ligante
- Tipo y origen de los agregados
- Análisis granulométrico
- Densidad de la mezcla

- Grado de compactación de la mezcla
- Resistencia a la deformación permanente
- Ensayos en el ligante recuperado

Reciclado o Fresado

- Tipo y cantidad de reciclado
- Porcentaje y categoría de granos
- Contenido de ligante
- Punto de ablandamiento del ligante recuperado del asfalto reciclado
- Punto de ablandamiento en la mezcla ligante resultante
- Densidad

La evaluación inicial es un requisito previo para el marcado CE del asfalto. Los reglamentos para las pruebas también están escritos en una norma EN.

Los certificados de calidad emitidos sobre la base de los resultados de las pruebas realizadas forman parte de los fundamentos contractuales para la construcción en un proyecto.

La evaluación (inspección) inicial de los materiales y de la mezcla asfáltica se considera la prueba del cumplimiento de la calidad requerida.

El contratista prueba entonces que los materiales que se suministran son adecuados para la obra específica.

2.9.2.3 Determinación del contenido de ligante en la mezcla asfáltica

La primera parte de la normativa de ensayo para mezclas asfálticas EN 12697-1 - es una de las atribuciones más importantes y fundamentales de la norma EN 12697 que trata de la determinación del contenido de ligante en la mezcla asfáltica.

En los Estados Unidos la norma internacional ASTM D 8159 es el método de prueba para la determinación del contenido de ligante de asfalto en mezclas de asfalto y muestras de pavimento y se desarrolló de conformidad con los principios internacionalmente reconocidos sobre normalización establecidos en la decisión sobre los principios para el

desarrollo de normas internacionales, guías y recomendaciones del Comité de Obstáculos Técnicos al Comercio (OTC) de la Organización Mundial del Comercio.

El método de prueba ASTM D 6307 que cubre la determinación del contenido de asfalto de la mezcla de asfalto mediante la eliminación del cemento asfáltico en un horno de ignición utilizado en el pasado prácticamente ya desapareció.

Especialmente hablando de mezcla asfáltica moderna en la que los aditivos como aglutinantes, ceras modificadas, nanopartículas, polímeros, caucho, agentes de rejuvenecimiento, etc., se pueden mezclar al ligante; el método de horno de ignición no es una alternativa interesante.

Además, la determinación de las propiedades del ligante bituminoso recuperado se ha vuelto muchísimo más importante en los últimos tiempos, especialmente en el estudio y en el control de asfalto reciclado, ayudando a minimizar la falla en la construcción de carreteras que utilizan mezcla de asfalto con asfalto reciclado en su composición.

2.9.2.4 Defectos por error en la cantidad de ligante

Un fallo en la determinación de la cantidad de ligante bituminoso, puede llevar a errores considerables en una obra de carreteras; tanto el exceso como la falta de ligante asfáltico presente en la mezcla asfáltica, pueden causar grandes defectos de la carretera.

Los defectos por error en el contenido de ligante como exudación y trincas por fatiga se producen por mezclas con mayor porcentaje de ligante asfáltico y por un porcentaje menor, respectivamente.

Otras fallas como baja estabilidad, baja resistencia al trinquete por fatiga, corrugación, deformaciones plásticas, desgarramientos, bajo fricción neumático / pavimento, oxidación acelerada y permeabilidad excesiva afectan directamente la comodidad del usuario, la seguridad en la vía y durabilidad del revestimiento.

2.9.3 Asfaltos utilizados en Alemania

Los asfaltos que se utilizan en Alemania en la construcción de carreteras son los siguientes:

Tabla 2.11 Asfaltos utilizados en Alemania

Betún	Punto de ablandamiento Anillo & Bola en °C	Penetración en 1 /10 mm
160-220	35-43 (37-43)	160-220
70-100	43-51 (43-49)	70-100
50-70	46-54 (48-54)	50-70
30-45	52-60 (53-59)	30-45
20-30	55-63 (57-63)	20-30

Fuente: TL Asphalt-StB

2.9.4 Norma alemana Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen TL Asphalt- StB 07/13

Es la que se utiliza en Alemania para determinar la cantidad máxima de adición de granulado de asfalto en la nueva mezcla el procedimiento se describe en el Anexo D

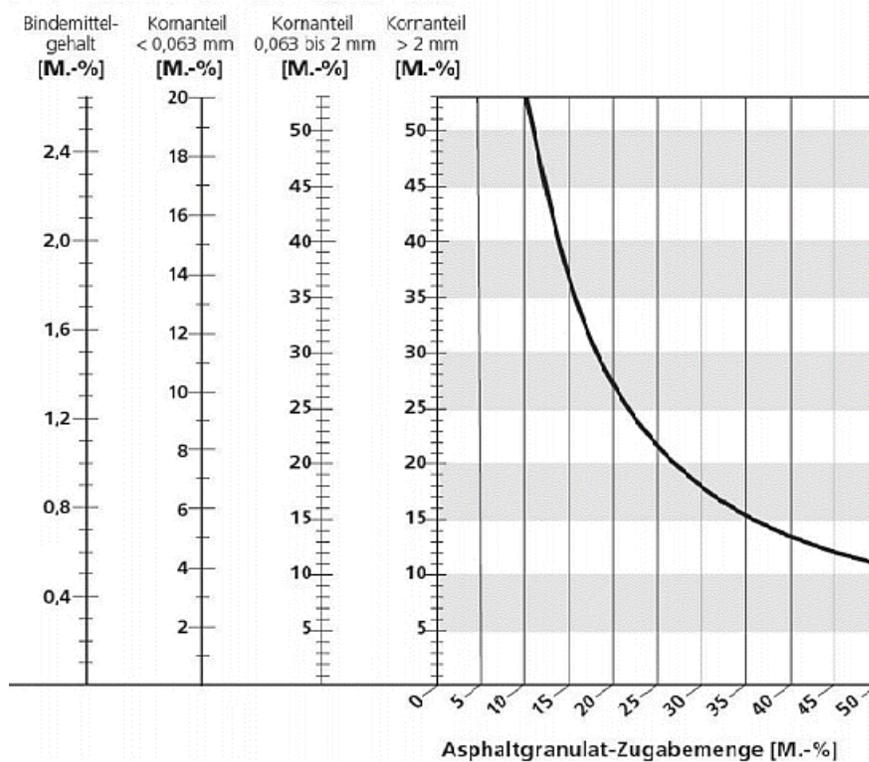
2.9.4.1 Anexo D

Para la evaluación de la homogeneidad, se debe tomar una muestra y examinarla en sus características principales.

La adición máxima resultante de la homogeneidad del granulado de asfalto es el menor de los valores determinados para esas características (contenido de aglutinante y conteos de partículas de áridos de 0 a 0.063 mm, de 0.063 a 2 mm y > 2 mm).

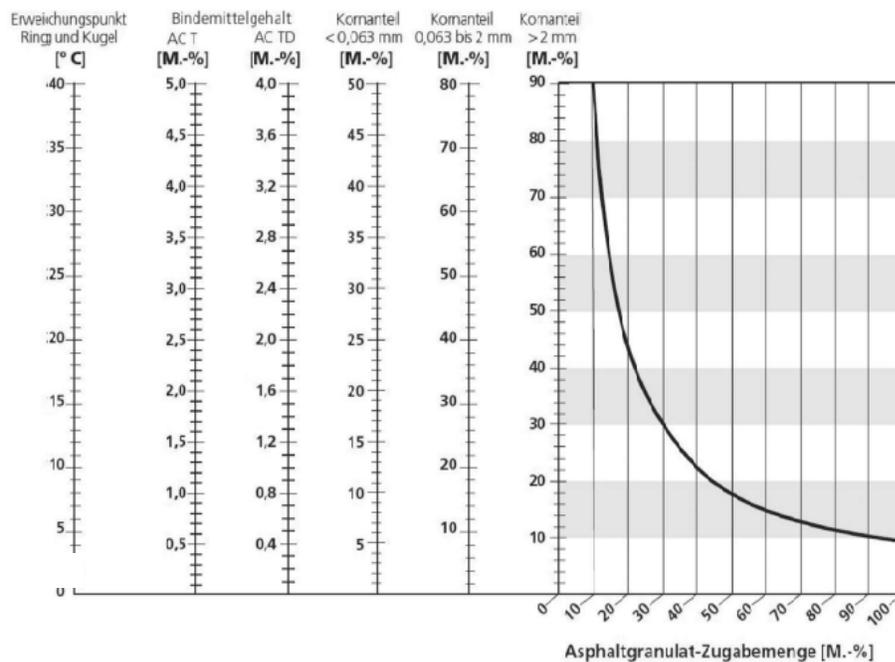
Con la ayuda del nomogramas (Gráficos 2.1 2.2), podemos ver el máximo posible del RAP en la nueva mezcla.

Gráfico 2.1 Máxima cantidad de adición de RAP en capas de rodadura %



Fuente: Anexo D del Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07.

Gráfico 2.2 Máxima cantidad de adición de RAP en capas base sub base %



Fuente: Anexo D del Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07.

Las cantidades máximas de adición también dependen del tipo de capa. Para su uso en la capa de base, capa sub base y capa binder constante 0.5, para rodamiento, constante 0.33

$$Z_i = \frac{\text{const.} * T_{zul,i}}{a_i} * 100$$

Donde:

Z_i = Es la Posible cantidad de suministro de asfalto reciclado en M.-%,

a_i = Es la envergadura de la función (diferencia entre el valor más grande y el más pequeño de la serie de medición de valores atípicos)

T_{zul,i} = Es la tolerancia total (véase la tabla 2.12)

Const. = Constante 0.5 para capas bases, capas sub bases y capas binder y 0.33 para capas de revestimiento

Es necesario determinar todos los valores de Z_i. El menor valor determina la cantidad máxima posible de asfalto reciclado.

Tabla 2.12 Valor de T_{zul, i} de características relevantes dependiendo del tipo de capa.

Características	T _{zul,i}	
	Capa de rodamiento, capa de revestimiento	Capa de base Capa sub bases , binder
Contenido de aglutinante [M.-%,]	0.8	1
Fracción de áridos < 0.063 mm [M.-%,]	6	10
Fracción de áridos 0.063 bis 2 mm [M.-%,]	16	16
Fracción de áridos > 2 mm [M.-%,]	16	18

Fuente: Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07

2.9.5 Equipos de pruebas de calidad para la caracterización de ligantes bituminosos y de mezclas asfálticas utilizados en Alemania

Equipos de prueba para betún:

- Prueba automática de anillo y bola – Art Nr. 20-2200
- Penetrómetro automático – Art Nr. 20-20670
- Ductilómetro digital – Art Nr. 20-2355
- Punto de ruptura según Fraass – Art Nr. 20-22610

2.9.5.1 Aparato Anillo y Bola automático

Para la determinación del punto de reblandecimiento anillo y bola de los materiales bituminosos. El conocimiento del punto de reblandecimiento tiene utilidad en la comprobación de la uniformidad de las partidas y fuentes de suministro, así como en el cálculo del índice de Penetración, uno de los criterios de medida de la susceptibilidad térmica de estos materiales.

Esté ensayo se realiza según norma DIN EN 1427/ ASTM D36/ AASTHO T53

Para la determinación de las especificaciones del punto de ablandamiento del ligante.

- Calentamiento de vitro-cerámica
- Motor de agitación magnética con rango de velocidad variable
- Dos muestras simultaneas
- Sistema controlado por microprocesador
- Lectura automática del punto de ablandamiento por láser

Imagen 2.8 Aparato Anillo y Bola automático



Fuente: InfraTest

Especificaciones:

- Opción de agua 30..80 ° C
- Opción glicerol 80..150 ° C
- La temperatura sube 5 K / min.
- Alimentación 230 V, 60 Hz

2.9.5.2 Prueba de penetración betún

El penetrómetro se usa para determinar la consistencia y la plasticidad de las muestras del betún en condiciones estandarizadas de carga, temperatura y tiempo, de acuerdo con la norma DIN EN 1426 / ASTM D5 / AASHTO T49.

Para la determinación de la resistencia del betún mediante la penetración de una aguja.

Penetrómetro automático

Imagen 2.9 Penetrómetro automático



Fuente: InfraTest

- La ejecución y el toque de la aguja se realizan automáticamente a través del sistema electrónico de medición.
- La detección de la superficie es completamente automática.
- La profundidad de penetración se determina con un sistema de medición electrónico.
- La aguja se separa del émbolo durante la prueba
- Ninguna influencia a través de la carga y de la fricción
- Control opcional a mano con el Joy stick o en modo completamente automático

- Unidad de temperatura independiente para la regulación de temperatura de la prueba a 25 ° C.

Especificaciones:

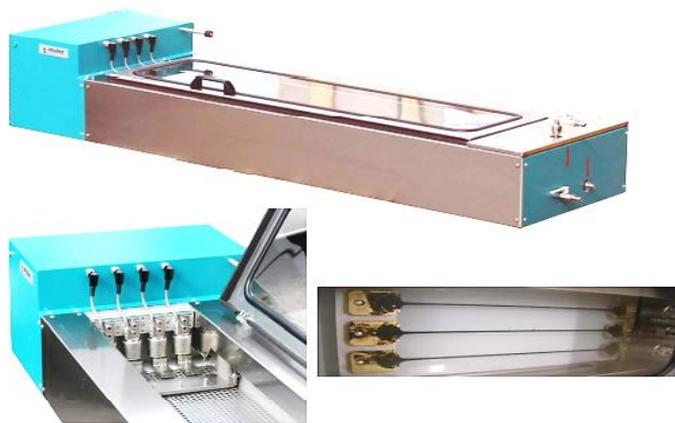
- Rango de medición 0..300 unidades de penetración (equivalente a 0..30 mm)
- Resolución 0,01 mm
- Carga de prueba 100 g
- Tiempo de prueba 5 seg
- Fuente de alimentación 100/240 V, 50/60 Hz

2.9.5.3 Ductilómetro automático digital

Esté ensayo se realiza según norma EN 13398 / 13587 / 13589

Para la determinación de la Ductilidad, Recuperación Elástica y Fuerza Ductilidad del betún.

Imagen 2.10 Ductilómetro automático digital



Fuente: InfraTest

- Carcasa de acero inoxidable con baño de agua aislado.
- Motor paso a paso que proporciona velocidad variable
- Sistema de medición de desplazamiento digitales
- Se pueden probar simultáneamente hasta 4 muestras

Especificaciones:

- Medición de la longitud de 1500/ 1000/ 400 mm

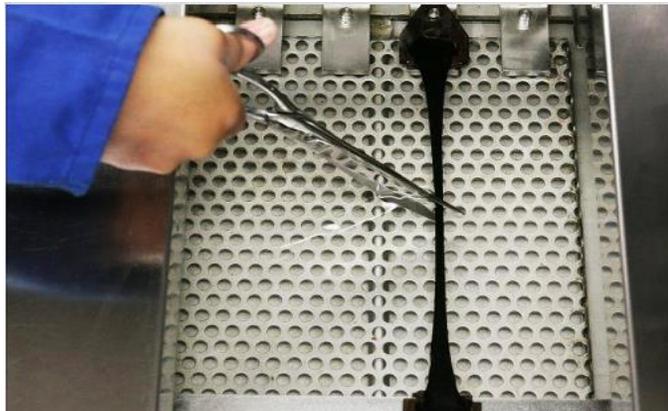
- Rango de velocidad 1..50 mm / min
- 500N célula de carga, resolución de 0,02 N (opcional 100 N, resolution 0,004N)
- unidad de refrigeración para las pruebas de -5 ° C .. + 80 ° C
- Fuente de alimentación 230 V, 60 Hz

Recuperación Elástica

Según norma EN 13398

La norma especifica el método para determinar el retorno elástico de los ligantes a una temperatura determinada mediante el Ductilómetro. El método es específico para ligantes modificados con polímeros termoplásticos elastoméricos, pero también se puede utilizar para otros ligantes con valores de recuperación elásticos más bajos.

Imagen 2.11 Recuperación elástica



Fuente: InfraTest

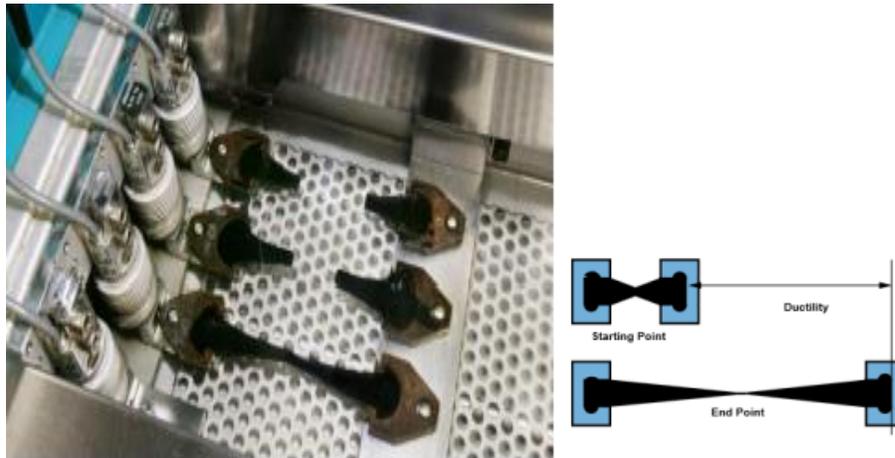
Fuerza Ductilidad

Según norma EN 13589

La norma especifica, un método para determinar las características de tracción de ligantes, en particular modificados por polímeros, utilizando el método de tracción a través del Ductilómetro.

El dispositivo está equipado con un sistema de medición de desplazamiento digital, totalmente automático.

Imagen 2.12 Ensayo de ductilidad



Fuente: InfraTest

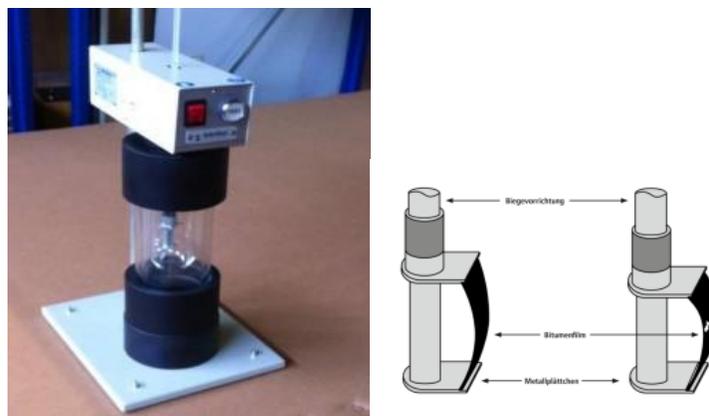
2.9.5.4 Punto de ruptura según Frass

Esté ensayo se realiza según Norma Española EN 12100/ EN 12593

Da una idea sobre el comportamiento del betón a temperaturas bajas. Para la determinación del punto de ruptura del betón.

- Aparato de plegado motorizado
- Tubo de ensayo, un contenedor de Dewar y termómetro
- Las temperaturas de prueba se obtienen mediante el uso de hielo seco o dióxido de carbono
- Dos muestras al mismo tiempo

Imagen 2.13 Equipo para el Ensayo de ruptura Frass



Fuente: InfraTest

Especificaciones

- Rango de temperatura $-38\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +30\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Tensión: 230V, 60 Hz
- Entrada de energía 10W
- Volumen líquido de refrigeración aprox. 650ml
- Peso vacío 3,5 kg

Pruebas avanzadas de betún (PG Grade):

- Reómetro de cizallamiento dinámico - DSR – Art Nr. 20-4440
- Reómetro de haz de curvatura - BBR – Art Nr. 20-44200
- Horno de envejecimiento por presión (largo plazo)- PAV – Art Nr. 20-44000
- Horno de película fina RTFOT (corto plazo) RTFOT – Art Nr. 20-25720

2.9.5.5 Dynamical Shear Rheometer – DSR

Esté ensayo se realiza según Norma Española EN 14770

El DSR Kinexus es un reómetro de plataforma con un concepto único para parametrización, aplicación y evaluación de las mediciones reológicas del betún.

- Viscosimetría controlada por tasa de tracción y cizallamiento
- Oscilación controlada por deformación y esfuerzo cortante
- Fluencia de recuperación / creep
- Capacidad de relajación
- Rampa de deformación

Imagen 2.14 Reómetro de cizallamiento dinámico



Fuente: InfraTest

Especificaciones

- Torque de viscosimetría: 20nNm a 200mNm
- Torque de oscilación: 10nNm a 200mNm
- Resolución del torque 0,1 nNm
- Velocidad angular 10 nrad / s a 500 rad / s
- Salto de la deformación: < 10 ms
- Resolución angular < 10 nrad
- Frecuencia de oscilación de 1 Hz a 100 Hz
- Rango de fuerza normal 0,001 N a 20 N (opcional 50N)
- Tiempo de respuesta normal < 10 ms
- Velocidad de elevación vertical 0,1µm / s a 35mm / s
- Resolución de clivaje 0,1 µm
- Velocidad de datos máxima 5kHz
- Fuente de alimentación 230 V, 60 Hz

2.9.5.6 Bending Beam Rheometer – BBR

Este ensayo se realiza según Norma DIN EN 14771, NF T66-062, ASTM D 6648, AASHTO T313.

Sistema de prueba para la determinación de la rigidez de fluencia flexural del ligante a bajas temperaturas. La resistencia a la flexión, entre otras cosas, se determina con el fin de evaluar el comportamiento del ligante y productos similares a bajas temperaturas.

Imagen 2.15 Reómetro de haz de curvatura - BBR



Fuente: InfraTest

Datos técnicos:

- Dimensiones 1000 x 425 x 500 mm
- Baño de prueba aprox. 11 l
- Peso aprox. 80 kg sin accesorios
- Datos eléctricos 230/240 V, 50/60 Hz,
- Rango de temperatura de 0,5 kW -40... + 20°C
- Resolución de 0,1 K
- Eje de carga máx. fuerza 2000 mN
- Tamaño del haz de betún 6,35 x 12,7 x 127,0 mm
- Codificador incremental, resolución 1 micra
- Precisión de la célula de carga Clase 0,1%
- Control de fuerza de 5 mN
- Espacio de trabajo 0... 1500 mN
- Baño - Aceite de silicona líquido (recomendado) (Fragol Therm X-T12)
- Aire comprimido mín. 5 bar

2.9.5.7 Horno de envejecimiento – PAV

Este ensayo se realiza según Norma EN 14769/ ASTM D652/ AASTHO R28

Envejecimiento del betún a largo plazo, simula el envejecimiento del betún después de 5 a 10 años.

- Recipiente de presión/ temperatura
- Condiciones de sobrepresión
- Grabación continua de los datos
- Presión de alimentación 21 bar ... 25bar

Imagen 2.16 Horno de envejecimiento por presión (largo plazo)- PAV



Fuente: InfraTest

Especificaciones

Presión de suministro 21bar ... 25bar

Peso 50 kg

Potencia 600W

Fuente de alimentación 230 V, 60 Hz, 10A

2.9.5.8 Horno de película delgada- RTFO

Esté ensayo se realiza según Norma EN 12607-1/ ASTM D2872/ AASHTO T240

Envejecimiento del betún a corto plazo Medición de los efectos del aire y temperatura en la especificación del betún.

- Hasta 8 vasos de prueba
- Control de la temperatura por termostato
- Jet de aire por tubería de cobre
- Temperatura de calentamiento 163 ° C
- Velocidad de 15 / min
- Flujo de aire de 4.000 ml / min

Imagen 2.17 Horno de película fina RTFOT (corto plazo) RTFOT



Fuente: InfraTest

Especificaciones

- Temperatura de calentamiento 163 ° C
- Velocidad de rotación 15 / min.
- Flujo de aire de 4.000 ml / min.
- Peso 72 kg
- Tensión 230 V, 60 Hz
- Fusible 10^a
- Consumo de energía 2 kW
- Peso: 110Kg
- Dimensión optimizada 770 x 730 x 610

Infratest Testing “Made in Germany”

El Infratest Testing GmbH es una empresa de tamaño medio que se ha convertido en un importante proveedor mundial de sistemas de prueba desde su fundación en 1991. Infratest Testing GmbH fabrica, distribuye y comercializa desde el equipo estándar para los sistemas más complejos para las pruebas, análisis y pruebas de betón, asfalto, el cemento y el suelo. Los productores de materiales de construcción, universidades y colegios, así como varios tipos de laboratorios de ensayo, instituciones públicas y privadas también pertenecen a la gran base de clientes de “ Infratest Testing GmbH”. “Jugadores globales”

de la industria de la construcción, así como los pesos pesados de la industria petroquímica también pertenecen a nuestra lista de clientes.

Servicio rápido y competente, centro logístico capaz de llegar a cualquier parte del mundo dentro de 48 horas, 37 filiales internacionales, así como distribuidores independientes y profesionales capacitados para apoyar las diferentes tareas y post-venta. Esta es la base de un buen servicio de Infratest Testing GmbH. Apuesta por la innovación y la sostenibilidad. Somos dueños de las patentes de nuestros procesos de fabricación de productos con la certificación ISO es nuestra alta prioridad. Es bajo la etiqueta “Made in Germany” en Baden-Württemberg que mostramos nuestra experiencia y preocupación personal para cada empleado.

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LAS MEZCLAS

ASFÁLTICAS CON RAP

CAPÍTULO III

“DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON RAP”

3.1 DESCRIPCIÓN DE CRITERIOS E IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE MUESTREO

Los materiales pétreos utilizados deben cumplir especificaciones técnicas de la norma ASTM, ASSHTO. Para el presente proyecto utilizaremos materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas vigentes; además de tener una disponibilidad.

En el departamento de Tarija existen varios bancos de materiales; para el presente estudio se utilizó los agregados que utiliza la Alcaldía del municipio con los que realiza los asfaltados, para así tener la seguridad de la calidad de los mismos; los agregados pétreos son provenientes de la planta “Chancadora de Áridos Fernández” ya que estos cumplen con las especificaciones técnicas requeridas para la investigación y tienen disponibilidad continua de los mismos.

Ubicación geográfica

Imagen 3.1 Ubicación de la planta de la Alcaldía de la provincia Cercado



Fuente: Google earth

Los agregados pétreos que utiliza la planta de asfaltos están ubicado en la provincia Cercado departamento de Tarija, Bolivia a $21^{\circ}31'34.32''$ S y $64^{\circ}44'29.45''$ O a una elevación de 1878 msnm.

Imagen 3.2 Acopio de agregados planta de asfaltos alcaldía de Cercado



Fuente: Elaboración Propia

3.1.1 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico es empleado para la producción de mezclas asfálticas en caliente, ya que por sus propiedades adhesivas facilita la unión de los áridos. El CA, en conjunto con los agregados pétreos, conforman las mezclas asfálticas que son las que otorgan soporte estructural y funcionalidad a los pavimentos.

El cemento asfáltico a usar es el provisionado de la planta asfáltica del Gobierno Municipal de la provincia Cercado. Se usó el cemento asfáltico CONVENCIONAL 85-100 con nombre Betupen Plus de procedencia de Colombia. A continuación se muestra sus especificaciones en la siguiente tabla.

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas del cemento asfáltico Betumen Plus 85-100

N°	Ensayos	Método		Exigencias
		AASHTO	ASTM	
1	Penetración muestra original 25°C	T-49-97	D-5	85-100
2	Viscosidad saybol furorol a 135°C , seg.	T -72	D-102	> 85 seg.
3	Punto de inflamación cleveland °c vaso abierto	T-79-96	D-92	> a 232 °C
4	Contenido de agua	T- 55	-	<a 0,2
5	Solubilidad en tricloroetileno %	T- 44 -97	D-2042	> a 99.00%
6	Ensayo de la mancha (cuando y como se especifique), con: solvente gasolina-xiol, heptano -xiol.	T-102	-	(-) Negativo
7	Ensayo en horno película delgada	T-179-05	D-1754	<a 1
8	Ductilidad 25°C	T-51	D-113	> a 100cm
9	Penetración del residuo de pérdida, x calentamiento % original	T -49	D-5	> a 50
10	Índice de susceptibilidad térmica	-	-	-1 a 1

Fuente: Especificaciones técnicas del fabricante

3.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Para realizar la caracterización de los agregados utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas, se asistió al Laboratorio de Hormigones y Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

3.2.1 Granulometría

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

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

Procedimiento

Hacer secar la muestra por un periodo de 24 horas en horno a temperatura entre 100-110 °C .Tomar una muestra de 45 kg aproximadamente, y tamizar de forma mecánica inicialmente y después un tamizado final que tiene que ser manual.

Imagen 3.3 Muestra seca sacada del horno agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.4 Muestra seca sacada del horno agregado intermedio (gravilla)



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.5 Juego de tamices para granulometría



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.6 Muestra seca agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.7 Juego de tamices para granulometría para agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.8 Obtención de pesos retenidos en cada tamiz



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

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

Retenido acumulado

$$\text{Retenido acumulado} = \text{retenido acumulado} + \text{Peso retenido}$$

$$\text{Retenido acumulado} = 687 \text{ g} + 0.00 \text{ g}$$

$$\text{Retenido acumulado} = 687 \text{ g}$$

Porcentaje retenido

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

$$\% \text{ Retenido} = \frac{687}{5000} * 100$$

$$\% \text{ Retenido} = 13.74 \%$$

Porcentaje que pasa del total

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

$$\% \text{ Que pasa del total} = 100\% - 13.74\%$$

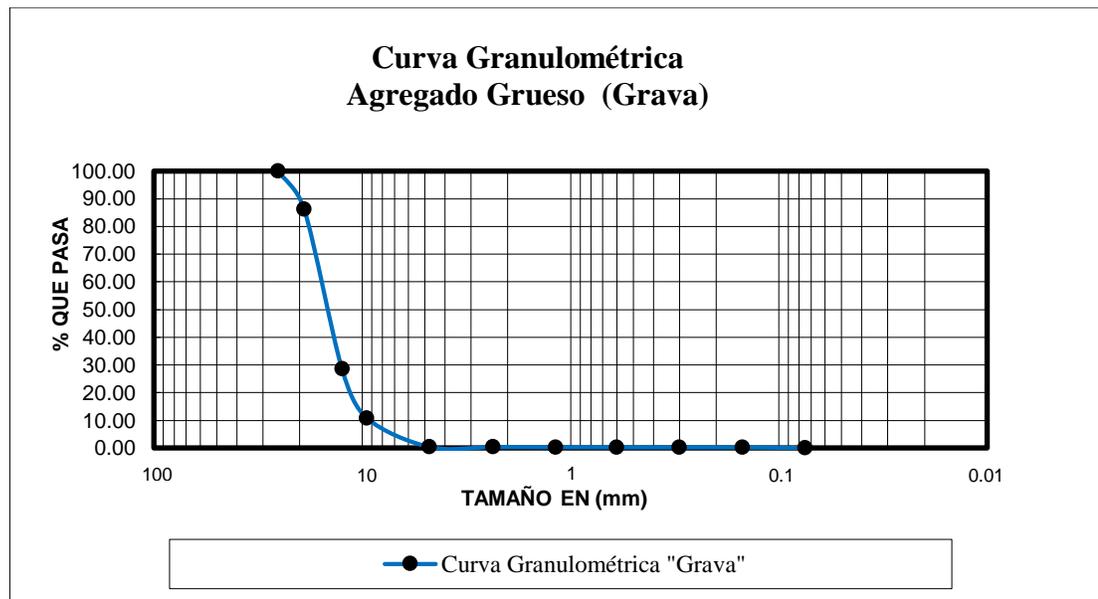
$$\% \text{ Que pasa del total} = 86.26 \%$$

Tabla 3.2 Tabla de resultados de la granulometría del agregado grueso (grava)

Peso Total (gr.)		5000			
Tamices	tamaño	Peso Ret.	Ret. Acum	%	% que pasa
	(mm)	(g)	(g)	Retenido	del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	687.20	687.20	13.74	86.26
1/2"	12.5	2886.70	3573.90	71.48	28.52
3/8"	9.50	882.90	4456.80	89.14	10.86
Nº4	4.75	522.20	4979.00	99.58	0.42
Nº8	2.36	1.00	4980.00	99.60	0.40
Nº16	1.18	1.90	4981.90	99.64	0.36
Nº30	0.60	2.30	4984.20	99.68	0.32
Nº50	0.30	0.90	4985.10	99.70	0.30
Nº100	0.15	0.70	4985.80	99.72	0.28
Nº200	0.075	10.29	4996.09	99.92	0.08
BASE	-	3.70	4999.79	100.00	0.00
SUMA		4999.8			
PÉRDIDAS		0.2			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1 Curva Granulométrica del agregado grueso (grava)



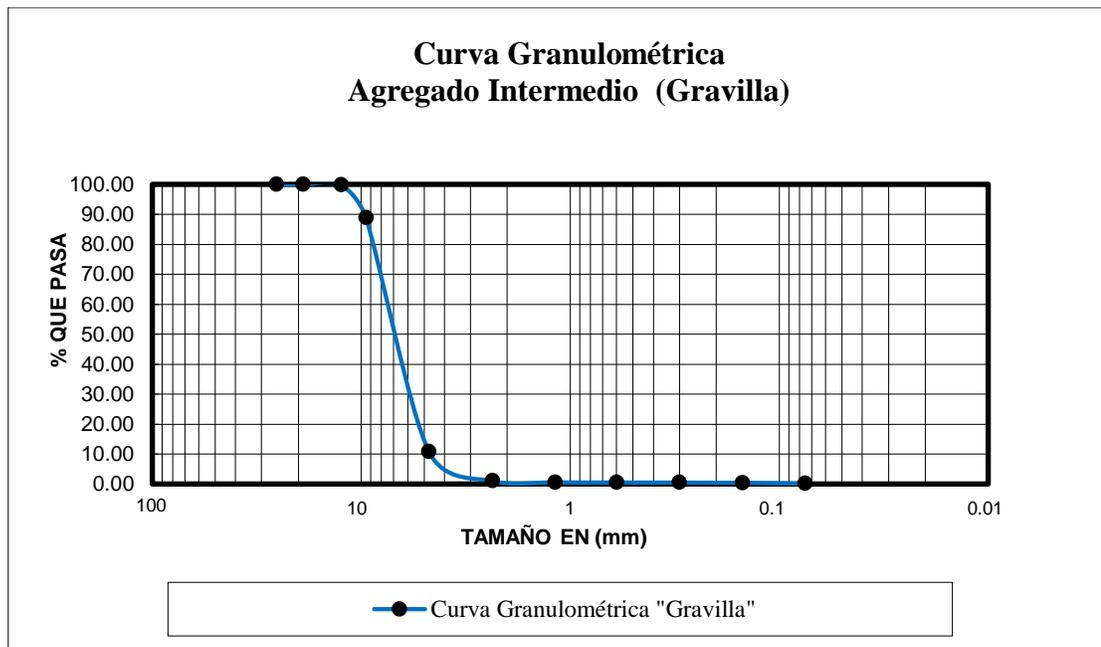
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3 Tabla de resultados de la granulometría del agregado intermedio (Gravilla)

Peso Total (gr.)		5000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	9.30	9.30	0.19	99.81
3/8"	9.50	550.80	560.10	11.20	88.80
Nº4	4.75	3894.80	4454.90	89.10	10.90
Nº8	2.36	494.70	4949.60	98.99	1.01
Nº16	1.18	22.30	4971.90	99.44	0.56
Nº30	0.60	2.76	4974.66	99.49	0.51
Nº50	0.30	2.20	4976.86	99.54	0.46
Nº100	0.15	3.50	4980.36	99.61	0.39
Nº200	0.075	12.90	4993.26	99.87	0.13
BASE	-	6.60	4999.86	100.00	0.00
SUMA		4999.9			
PÉRDIDAS		0.1			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2 Curva Granulométrica del agregado intermedio (gravilla)



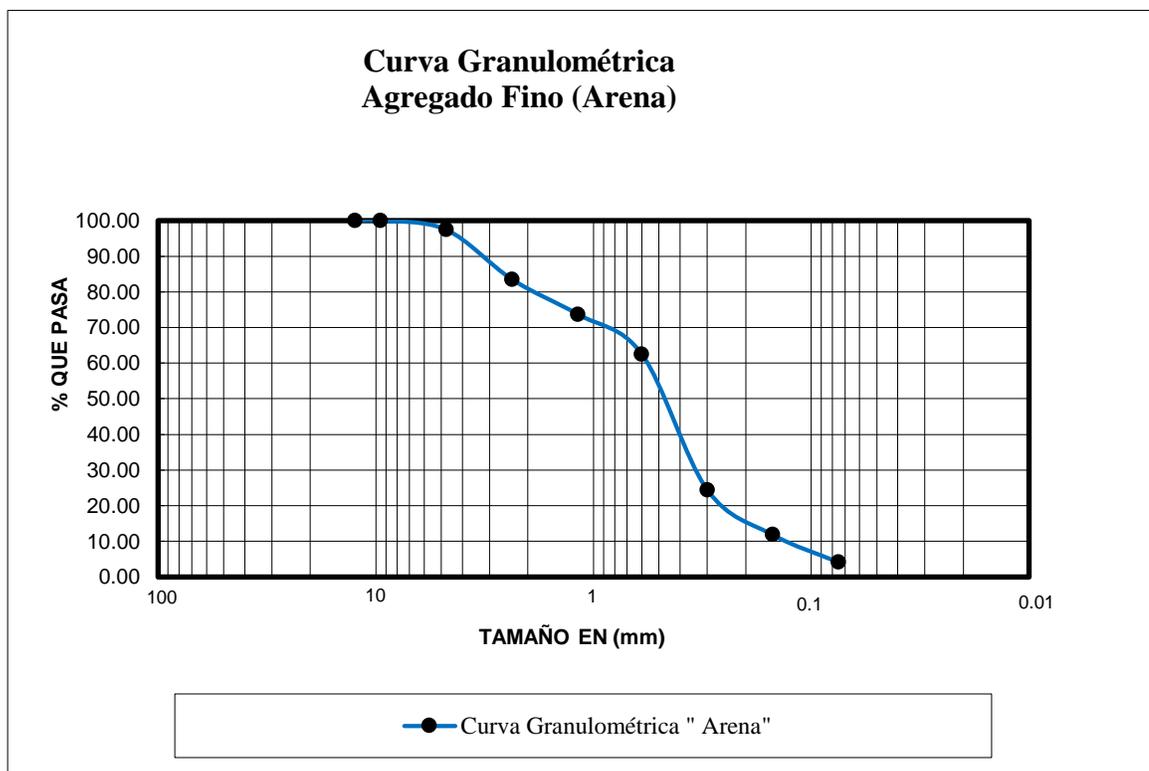
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4 Tabla de resultados de la granulometría del agregado fino (arena)

Peso Total (gr.)		3000 (g)			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1/2	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	76.50	76.50	2.55	97.45
Nº8	2.36	420.10	496.60	16.55	83.45
Nº16	1.18	292.30	788.90	26.30	73.70
Nº30	0.60	335.10	1124.00	37.47	62.53
Nº50	0.30	1143.30	2267.30	75.58	24.42
Nº100	0.15	378.40	2645.70	88.19	11.81
Nº200	0.075	231.20	2876.90	95.90	4.10
BASE	-	123.10	3000.00	100.00	0.00
SUMA		3000.0			
PÉRDIDAS		0.0			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.3 Curva Granulométrica del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Peso específico y porcentaje de absorción

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

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

Es aplicable a los áridos gruesos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m^3 , que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Densidad o peso específico de pétreos:

Cociente entre la masa y el volumen de un material pétreo a una temperatura determinada.

Se expresa normalmente en kg/m^3 .

Peso específico aparente, a granel o peso específico bruto:

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

Peso específico neto:

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

Peso específico real:

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

Peso específico real saturado superficialmente seco:

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

Peso específico seco:

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

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

Procedimiento

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

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

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

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

Imagen 3.9 Secado superficial del agregado pétreo saturado



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.10 Obtención del peso de las muestras superficialmente seca.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.11 Muestra sumergida



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.12 Muestra secas del horno después de 24 horas



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

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

Ecuaciones

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

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

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

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

Donde:

P.E. = Peso específico (kg/m^3)

A = Masa del agregado seco (g)

B = Masa del agregado saturado superficialmente seco (g)

C = Masa de agregado sumergido (g)

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

Peso específico a granel o real del árido seco:

$$\text{P.E. a granel} = \frac{A}{B-C} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$\text{P.E. a granel} = \frac{4428.20}{4500\text{g}-2755\text{g}}$$

$$\text{P.E. a granel} = 2.54 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Peso específico del pétreo saturado superficialmente:

$$\text{P.E. saturado sup. Seco} = \frac{B}{B-C} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$\text{P.E. saturado sup. Seco} = \frac{4500}{4500 - 2755}$$

$$\text{P.E. saturado sup. Seco} = 2.58 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Peso específico aparente:

$$\text{P.E. aparente} = \frac{A}{A-C} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$\text{P.E. aparente} = \frac{4428.20}{4428.20-2755}$$

$$\text{P.E. aparente} = 2.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Porcentaje de absorción:

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

$$\% \text{ de absorción} = \frac{4500 - 4428.20}{4428.20} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = 1.62 \quad \%$$

Tabla 3.5 Datos de las muestras de agregado grueso (grava) para el peso específico

Muestra n°	Peso muestra secada "a" (g)	Peso muestra saturada con sup. seca "b" (g)	Peso muestra saturada dentro del agua "c" (g)
1	4428.20	4500.00	2755.00
2	4436.00	4500.00	2778.00
3	3931.20	4000.00	2460.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 Resultados de peso específico agregado grueso (grava)

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
2.54	2.58	2.65	1.62
2.58	2.61	2.68	1.44
2.55	2.60	2.67	1.75
2.56	2.60	2.66	1.60

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 Datos de las muestras de agregado intermedio (gravilla) para el peso específico

Muestra n°	Peso muestra secada "a" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "b" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "c" (gr)
1	2937.00	3000.00	1850.00
2	2932.80	3000.00	1844.00
3	2933.90	3000.00	1847.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8 Resultados de peso específico agregado intermedio (gravilla)

	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
	2.55	2.61	2.70	2.15
	2.54	2.60	2.69	2.29
	2.54	2.60	2.70	2.25
PROMEDIO	2.55	2.60	2.70	2.23

Fuente: Elaboración propia

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

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

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

Absorción de agua:

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

Procedimiento

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

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

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

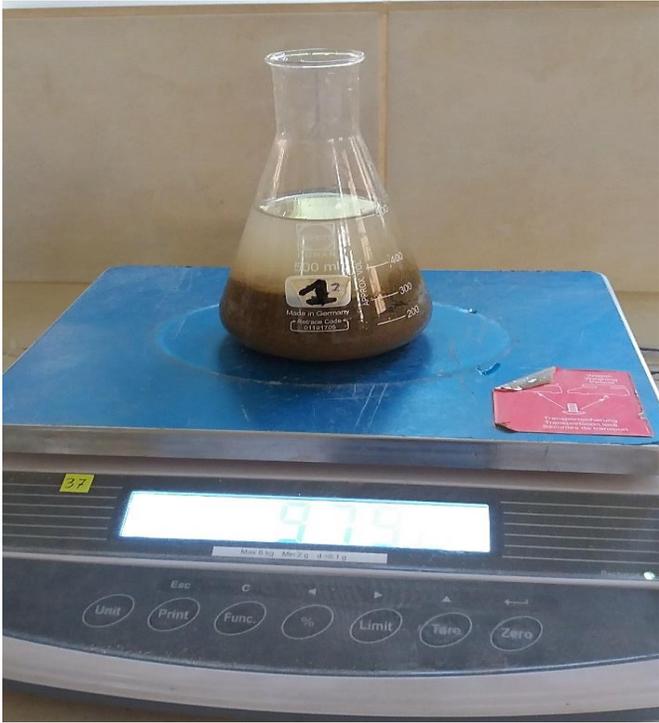
Sacar la muestra por completo del matraz para llevar al horno entre 100-110 ° C, por 24 horas dejar enfriar a temperatura ambiente y pesar.

Imagen 3.13 Muestra retirada del cono, saturada superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.14 Peso del agregado fino más el matraz y agua



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.15 Peso de la muestra secada en horno



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

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

Peso específico a granel o real del árido seco:

$$\text{P.E. a granel} = \frac{A}{V-W} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$\text{P.E. a granel} = \frac{490}{500\text{g}-301.40}$$

$$\text{P.E. a granel} = 2.47 \quad (\text{g/cm}^3)$$

Peso específico del pétreo saturado superficialmente:

$$\text{P.E. saturado sup. seco} = \frac{500}{V-W} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$\text{P.E. saturado sup. Seco} = \frac{500}{500-301.40}$$

$$\text{P.E. saturado sup. seco} = 2.52 \quad (\text{g/cm}^3)$$

Peso específico aparente:

$$\text{P.E. aparente} = \frac{A}{(V-W)-(500-A)} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$\text{P.E. aparente} = \frac{490}{(500-301.40)-(500-490)}$$

$$\text{P.E. aparente} = 2.60 \quad (\text{g/cm}^3)$$

Porcentaje de absorción:

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

$$\% \text{ de absorción} = \frac{500-490}{500} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = 2 \quad (\%)$$

Donde:

P.E.= Peso específico (kg/m^3)

A = Masa del agregado fino seco (g)

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

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

Tabla 3.9 Datos de las muestras de agregado fino (arena) para el peso específico

Muestra N°	Peso muestra (gr)	Peso de matraz (gr)	Muestra + matraz + agua (gr)	Peso del agua agregado al matraz "w" (ml) ó (gr)	Peso muestra secada "a" (gr)	Volumen del matraz "v" (ml)
1	500	177.8	979.2	301.40	490.00	500.00
2	500	237	1022	285.00	490.50	500.00
3	500	196	973.1	277.10	492.60	500.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10 Resultados de peso específico agregado fino (arena)

	Peso específico a granel (gr/cm^3)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm^3)	Peso específico aparente (gr/cm^3)	% de absorción
	2.47	2.52	2.60	2.00
	2.28	2.33	2.39	1.90
	2.21	2.24	2.39	1.48
PROMEDIO	2.32	2.36	2.47	1.79

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Método para determinar el peso unitario de agregados (ASTM E 30 AASHTO T19M-00)

Este método de ensayo se usa frecuentemente para determinar los valores de la densidad aparente (peso unitario) de los áridos en condición compactada y suelta, que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Es aplicable para los agregados pétreos de tamaño máximo nominal igual o inferior que 100mm.

Es muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de agregados a utilizar en las mezclas del concreto asfáltico.

Esta práctica se realizó en dos métodos según norma, que son el peso unitario suelto y el peso unitario compactado o varillado, de los cuales se muestra parte de la práctica con las siguientes imágenes.

Imagen 3.16 Pesado los moldes vacíos para realizar la práctica



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.17 Llenado en el recipiente



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.18 Enrazado los moldes con el agregado de manera suelta y varillado



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.11 Tabla de datos y resultados del peso unitario suelto (grava)

Peso unitario suelto					
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm3)
1	5840.00	9920.00	20050.00	14210.00	1.432
2	5840.00	9920.00	20010.00	14170.00	1.428
3	5840.00	9920.00	19860.00	14020.00	1.413
Promedio					1.425

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.12 Tabla de datos y resultados del peso unitario compactado (grava)

Peso unitario compactado					
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm3)
1	5840.00	9920.00	21485.00	15645.00	1.577
2	5840.00	9920.00	21585.00	15745.00	1.587
3	5840.00	9920.00	21715.00	15875.00	1.600
Promedio					1.588

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.13 Tabla de datos y resultados del peso unitario suelto (gravilla)

Peso unitario suelto					
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm3)
1	5840.00	9920.00	19800.00	13960.00	1.407
2	5840.00	9920.00	19685.00	13845.00	1.396
3	5840.00	9920.00	19705.00	13865.00	1.398
Promedio					1.400

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.14 Tabla de datos y resultados del peso unitario compactado (gravilla)

Peso unitario compactado					
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm3)
1	5840.00	9920.00	20910.00	15070.00	1.519
2	5840.00	9920.00	21010.00	15170.00	1.529
3	5840.00	9920.00	21270.00	15430.00	1.555
Promedio					1.535

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.15 Tabla de datos y resultados del peso unitario suelto (arena)

Peso unitario suelto					
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm3)
1	2610.00	2990.00	7436.50	4826.50	1.614
2	2610.00	2990.00	7398.10	4788.10	1.601
3	2610.00	2990.00	7390.40	4780.40	1.599
Promedio					1.605

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.16 Tabla de datos y resultados del peso unitario compactado (arena)

Peso unitario compacto					
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm3)
1	2610.00	2990.00	7897.50	5287.50	1.768
2	2610.00	2990.00	7912.20	5302.20	1.773
3	2610.00	2990.00	7850.60	5240.60	1.753
Promedio					1.765

Fuente: Elaboración Propia

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

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Debido a las condiciones de esfuerzo deformación, la carga de la rueda de los vehículos de distintas características es transmitida del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

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

El ensayo de desgaste de los Ángeles determina el desgaste de los agregados para determinar su aplicabilidad en mezclas asfálticas, cuando son sometidas a los efectos del tráfico de vehículos.

Procedimiento

Pesar los tamaños de las fracciones correspondientes al grado elegido, de acuerdo con la tabla 3.17. Registrar la masa total del material por ensayar como más inicial de muestra (m_i) aproximado a 0.1 g. Colocar la masa inicial de material en la máquina de los ángeles, de acuerdo con el grado elegido, seleccionar el número de esferas y número de revoluciones según la tabla 3.17.

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

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

Tabla 3.17 Grado de ensayo definidos por su rango de tamaño

Gradación		1	2	3	4	5	6	7
Diámetro	Cantidad de material a emplear (g)							
Pasa	Retenido							
3"	2 ½"	2500±50						
2 ½"	2"	2500±50						
2"	1 ½"	5000±50	5000±50					
1 ½"	1"		5000±50	5000±25	1250±10			
1"	¾"			5000±25	1250±25			
¾"	½ "				1250±25	1250±10		
½ "	⅜ "				1250±10	1250±10		
⅜ "	¼ "						2500±10	
¼ "	Nº4						2500±10	
Nº4	Nº8							5000±10
Peso total		10000±100	10000±75	10000±50	5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Numero de esferas		12			12	11	8	6
Nº de revoluciones		1000			500			

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

Imagen 3.19 Muestra sacada de la máquina de los ángeles a 500 revoluciones



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.20 Separación por el tamiz N°12 y lavado



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.21 Pesado del material después del lavado y secado en horno (24 horas)



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Muestra agregado grueso gradación 5

- Desgaste de los ángeles

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

$$P = \frac{5002.70 - 3661}{5002.70} * 100$$

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

Donde:

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

m_i = Masa inicial de la muestra (g)

m_f = Masa final de la muestra (g)

Tabla 3.18 Datos para el ensayo de desgaste de los ángeles agregado grueso (grava)

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

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19 Resultados del porcentaje de desgaste de los ángeles agregado grueso
(grava)

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

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20 Datos para el ensayo de desgaste de los ángeles agregado intermedio
(gravilla)

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

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21 Resultados del porcentaje de desgaste de los ángeles agregado intermedio
(gravilla)

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

Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Equivalente de arena (ASTM D 2419)

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

Procedimiento

Hacer pasar el material por el tamiz N°4 para tener una muestra representativa; con ayuda del embudo verter la muestra aproximada a 40 g de arena en el cilindro graduado. Golpear varias veces el fondo del cilindro con la palma de la mano para liberar las burbujas de aire y remojar la muestra completamente

Dejar el cilindro y el contenido en reposo, esperar que se sedimente, al finalizar el periodo de sedimentación, leer y anotar los niveles alcanzados

Imagen 3.22 Ensayo de equivalente de arena



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Muestra equivalente de arena

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

Donde:

H_1 = Nivel de arena (cm)

H_2 = Nivel total de arena más filer (cm)

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{9.85 \text{ cm}}{11.40 \text{ cm}} * 100$$

$$\text{Equivalente de arena} = 86.40 \quad (\%)$$

Tabla 3.22 Datos y resultados para el ensayo de equivalente de arena

N° de Muestra	H1 (cm)	H2 (cm)	Equivalente de arena (%)
1	9.15	11.00	83.18
2	9.85	11.40	86.40
3	9.80	11.45	85.59
Promedio			85.06

Fuente: Elaboración propia

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

3.3.1 Ensayo de penetración (ASTM D-5)

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetros hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga tiempo y temperatura. Normalmente el ensayo se realiza a 25°C durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja de 100 gramos.

Procedimiento

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

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

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

Imagen 3.23 Ensayo de penetración



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Promedio de la muestra 1

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

$$\text{Promedio} = \frac{88 + 90 + 88}{3}$$

$$\text{Promedio} = 88.67$$

Promedio de las tres muestras

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

$$\text{Promedio} = \frac{88.67 + 92.67 + 90}{3}$$

$$\text{Promedio} = 90.45$$

Tabla 3.23 Datos y resultados del ensayo de penetración

Penetración	Muestra	Lectura 1 (mm)	Lectura 2 (mm)	Lectura 3 (mm)	Promedio (mm)
Temperatura = 25°C Tiempo = 5 seg. Carga= 100 gramos	1	88	90	88	88.67
	2	96	92	90	92.67
	3	91	86	93	90
Promedio					90.45

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Ensayo de peso específico (ASTM-70)

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

Procedimiento

Limpiar el matraz para la calibración, después que ha secado, pesar, designar esté peso como “A”.

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

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

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

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

Imagen 3.24 Ensayo de peso específico acondicionamiento de muestras



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.25 Ensayo de peso específico determinación de la masa de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Cálculos y resultados

Muestra 3, peso específico del cemento asfáltico:

$$\text{P.E. de cemento asfáltico} = \frac{(C-A)}{(B-A)-(D-C)} * 0.997077(\text{g/cm}^3)$$

$$\text{P.E. de cemento asfáltico} = \frac{(61.38-32.20)}{(77.53-32.20)-(77.69-61.38)} (\text{g/cm}^3)$$

$$\text{P.E. de cemento asfáltico} = 1.003 (\text{g/cm}^3)$$

$$\text{P.E. promedio de cemento asfáltico} = \frac{1.003+1.005+1.004}{3}$$

$$\text{P.E. promedio de cemento asfáltico} = 1.004 \text{ g/cm}^3$$

Donde:

A = Peso del matraz vacío (g)

B = Peso del matraz más agua (g)

C = Peso del matraz más cemento asfáltico (g)

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

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

Tabla 3.24 Datos y resultados del ensayo de peso específico del cemento asfáltico

Muestra	Peso matraz vacío "A" (g)	Peso matraz + agua "B" (g)	Peso matraz + C.A. "C" (g)	Peso matraz + C.A. + agua "D" (g)	P.E. del cemento asfáltico (g/cm^3)
1	32.20	77.53	61.38	77.69	1.003
2	33.73	81.49	64.79	81.72	1.005
3	33.98	81.06	61.29	81.25	1.004
Promedio					1.004

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Ensayo de ductilidad (ASTM D-113)

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas, el ensayo se efectúa a una temperatura de 25 ± 0.5 °C y a una velocidad de 5 cm/min + 5%.

Procedimiento

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

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

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

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

Imagen 3.26 Ensayo de ductilidad, acondicionamiento de muestras



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.27 Ensayo de ductilidad, proceso de elongación de las muestras



Fuente: Elaboración propia

Cálculos y resultados.

- Promedio de las tres muestras

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

$$\text{Promedio} = \frac{125.00 + 135.00 + 140.00}{3} \text{ (cm)}$$

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

Tabla 3.25. Resultado del ensayo de ductilidad

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

Fuente: Elaboración propia

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

El punto de inflamación del cemento asfáltico se emplea para identificar la temperatura máxima a la cual éste puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame.

Procedimiento

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

Imagen 3.28 Ensayo de punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

Cálculos y resultados.

- Promedio de las tres muestras

$$\text{Promedio} = \frac{\text{ensayo 1} + \text{ensayo 2} + \text{ensayo 3}}{3} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\text{Promedio} = \frac{298+295+296}{3} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\text{Promedio} = 296.33 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Tabla 3.26 Resultado del ensayo de punto de inflamación

Ductilidad	Muestra	Lectura (°C)
Punto de inflamación	1	298
	2	295
	3	296
Promedio		296.33

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D-36)

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentra en el rango de 30 a 200 °C, por medio del aparato de anillo y bola. En general, con materiales de este tipo, el ablandamiento no ocurre a una temperatura definida; a medida que la temperatura aumenta, el material cambia gradual e imperceptiblemente de un estado quebradizo o excesivamente espeso y de poca fluidez, a líquidos y blandos y menos viscosos.

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

Procedimiento

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

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

Imagen 3.29 Colocación del cemento asfáltico en los anillos



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.30 Ensayo de punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Cálculos y resultados.

- Promedio de las muestras

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

$$\text{Promedio} = \frac{50 + 48}{2} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\text{Promedio} = 49 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Tabla 3.27 Resultado del ensayo de punto de ablandamiento

Ductilidad	Muestra	Lectura ($^\circ\text{C}$)
Punto de ablandamiento	1	50.00
	2	48.00
Promedio		49.00

Fuente: Elaboración propia

3.3.6 Ensayo de viscosidad Saybolt – Furol (ASTM E-102)

La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas que se emplean durante su aplicación. La viscosidad o consistencia del betún asfáltico se mide en el ensayo de viscosidad Saybolt-Furol o en el ensayo de viscosidad cinemática.

En el ensayo Saybolt-Furol se emplea un viscosímetro Saybolt con un orificio Furol. Se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho, una cantidad especificada de betún asfáltico. Como las temperaturas a las que se determina la viscosidad de los betunes asfálticos son frecuentemente superiores a los 100 $^\circ\text{C}$, el baño de temperatura constante del viscosímetro se llena con algún tipo de aceite. Cuando el asfalto ha alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide el tiempo necesario en segundos para que pasen a través del orificio Furol 60 ml del material.

Cuando más viscosos son los materiales más tiempo es necesario para que pasen a través del orificio. Los valores obtenidos se expresan como segundos Saybolt-Furol (SSF). Los aparatos y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método AASTHO T-72 ASTM E102.

Imagen 3.31 Equipo y materiales utilizado en el ensayo



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.32 Tomando la temperatura



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.33 Asfalto pasando del viscosímetro Saybolt-Furol al matraz aforado



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.28 Resultados del ensayo

Viscosidad Cinemática	Muestra	Lectura (mm ² /s)	Especificaciones	
			Mínimo	Máximo
Viscosidad Cinemática 135 °C	1	318		
mm ² /s	2	307		
	Promedio	313	>250	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29 Resultados de la caracterización de cemento asfáltico y comparación con la norma ASTM

Ensayos	Especificación		Resultado	Norma
	Mínimo	Máximo		
Penetración a 25 °C , 100g, 5 s (1/10mm)	85	100	90.45	ASTM D-5
Peso específico (Kg/m ³)	1000	1005	1004	ASTM D-71
Ductilidad (cm)	100	--	133.33	ASTM D-113
Punto de inflamación (°C)	232	--	296	ASTM D-92
Punto de ablandamiento(°C)	42	--	49	ASTM D-36
Viscosidad (mm ² /s)	>250	--	313	ASTM E-102

Fuente: Elaboración propia

3.4 PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP)

3.4.1 Antecedentes del RAP utilizado

El material mencionado como RAP se lo encuentra en las inmediaciones de carreteras nacionales, departamentales o municipales, las cuales en cierto momento de su vida útil fueron reparadas o remplazadas por diversos motivos particulares en cada caso, por tanto al contar con las capas deterioradas o retiradas en calidad de escombros o residuos de obra nace la idea de reutilizar este material para la producción de nuevas mezclas asfálticas y así cuidar el medio ambiente evitando la contaminación del mismo con residuos distribuidos a lo largo de toda la historia de asfaltado en la región.

Este material en calidad de carpeta deteriorada y/o desechada (RAP) debe estar visual y técnicamente libre de contaminantes que originalmente no formaron parte de la dosificación de la carpeta asfáltica de la cual provienen; dicha contaminación podría ser consecuencia del medio en el cual fueron depositados.

El tramo de la tranca – túnel falda la Queñua, carretera Tarija Potosí de donde se obtuvo el material RAP responde al pavimentado que ha sido ejecutado por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) por medio de la empresa brasilera Queiroz Galvao inicialmente; posteriormente rescindieron contrato con dicha empresa y termino concluyendo dicho proyecto la empresa OAS .

Por deterioros que se han producido en el pavimento como ser hundimientos, rajaduras debido a fallas estructurales en la capa base y sub base por temas de drenaje porque no se colocaron pedraplenes y demás gran parte de la plataforma de capa de rodadura fue retirada para su reparación.

Imagen 3.34 Recolección del material



Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Método para determinar el contenido de ligante de mezcla asfáltica por centrifugación- ensayo de extracción

Este ensayo describe el procedimiento para determinar el contenido de ligante asfáltico y la extracción de los agregados pétreos de la carpeta asfáltica a reciclar, mediante el proceso de la centrifugación, que consiste en un recipiente semiesférico montado en el extremo superior de un eje vertical con tapa que se ajusta al bowl- rotor por medio de un embudo a un tornillo que sirve a la vez para introducir el solvente durante el ensayo.

También se utiliza un papel filtro el cual permite la extracción del solvente durante el centrifugado. Cuerpo de base de metal fundido con soportes de goma para apoyar sobre el piso otorgándole a la máquina gran estabilidad. Accionamiento eléctrico con motor monofásico ubicado exteriormente para evitar posibles contactos con derrame del producto a centrifugar.

Primeramente la muestra se coloca en el horno para una mayor disgregación para luego dejar reposar con solvente y así luego colocar en el extractor.

Posteriormente se vierte un disolvente como ser el tetracloruro de carbono, sulfuro carbono, benzol o cloroformo; en este caso para realizar el lavado de la muestra a reciclar se vierte gasolina como solvente a utilizar mediante una jarra, se cubre la tasa con papel filtro, se tapa en forma segura y se lo hace girar hasta que el disolvente se haya salido por

el orificio. La operación del lavado se repite hasta que hayan desaparecido todos los restos de cemento asfáltico, lo cual se observa cuando el disolvente salga de color claro es decir limpio, entonces es cuando se quita la tapa y se coloca la muestra en una bandeja para secar.

Una vez secada la muestra se lleva a pesar y así luego restar a la muestra inicial y obtener de esta manera el peso de cemento asfáltico extraído

En la tabla que se muestra posteriormente se puede apreciar el porcentaje de cemento asfáltico, obteniendo un porcentaje dentro del rango que se establece en la norma que es de 5% - 7% de asfalto.

Procedimiento

Imagen 3.35 Muestra de RAP a ensayar



Fuente: Elaboración propia

Si la mezcla no está lo suficientemente blanda como para separarla y homogeneizarla con una espátula, colocar en una bandeja y calentarla en horno hasta que sea manipulable.

Imagen 3.36 Horno donde se calentó la muestra



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.37 Muestra sacada del horno



Fuente: Elaboración propia

Colocar en el bol la cantidad de muestras necesaria

Imagen 3.38 Colocación del RAP en el extractor



Fuente: Elaboración propia

Cocar papel filtro para evitar perder material fino, tapar y hacer funcionar la centrífuga aumentando lentamente la velocidad y empezar a echar el solvente (gasolina).

Imagen 3.39 Lavado del RAP en el extractor



Fuente: Elaboración propia

Repetir el procedimiento las veces necesarias, hasta que el asfalto sea totalmente extraído y el solvente emerja limpio (Con su color original).

Terminando el lavado remover el papel filtro y sacar el fino adherido tanto como sea posible y agregarlo bol del extractor.

Imagen 3.40 Papel filtro utilizado en el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Sacar el agregado pétreo de la centrífuga, cuidadosamente en una bandeja y secarlo en un horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ o en una placa caliente.

Imagen 3.41 Muestra de RAP seca sacada del horno



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.42 Separación del RAP en gravas, gravillas, arenas y filler



Fuente:

Elaboración propia

El porcentaje de cemento asfáltico de la muestra se procede a calcular por medio de la siguiente ecuación.

$$\% \text{ de asfalto en la mezcla} = \frac{A - (B + C)}{A}$$

Donde:

A = Peso de la mezcla inicial

B = Peso de los agregados secos

C = Material retenido en el papel filtro.

Cálculos

$$A = 1947.3 \text{ g}$$

$$B + C = 1843.7$$

$$\% \text{ de asfalto en la mezcla} = \frac{1947.3 - (1843.7)}{1947.3} * 100 \%$$

$$\% \text{ de asfalto en la mezcla} = 5.32 \%$$

En la siguiente tabla que se muestra a continuación se puede apreciar el porcentaje de cemento asfáltico

Tabla 3.30 Contenido de cemento asfáltico

N° Muestra	Masa seca de la muestra (g) (con ligante asfáltico)	Masa seca de la muestra lavada (g) (sin ligante asfáltico)	% de ligante asfáltico
1	1947.30	1843.70	5.32
2	1500.00	1404.90	6.34
3	1260.00	1180.00	6.35
4	2300.60	2167.86	5.77
5	1600.00	1516.64	5.21
Promedio			5.80

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Análisis granulométrico de áridos (AASHTO T27-99 y ASTM E-40)

El análisis granulométrico de un material tiene por objeto separar y clasificar los gránulos de que está formado según su tamaño, esta separación se hace mediante una colección de tamices de malla cuadrada.

Imagen 3.43 Juego de tamices para granulometría



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.44 Muestra de RAP separada en gravas, gravillas, arenas y filler



Fuente: Elaboración propia

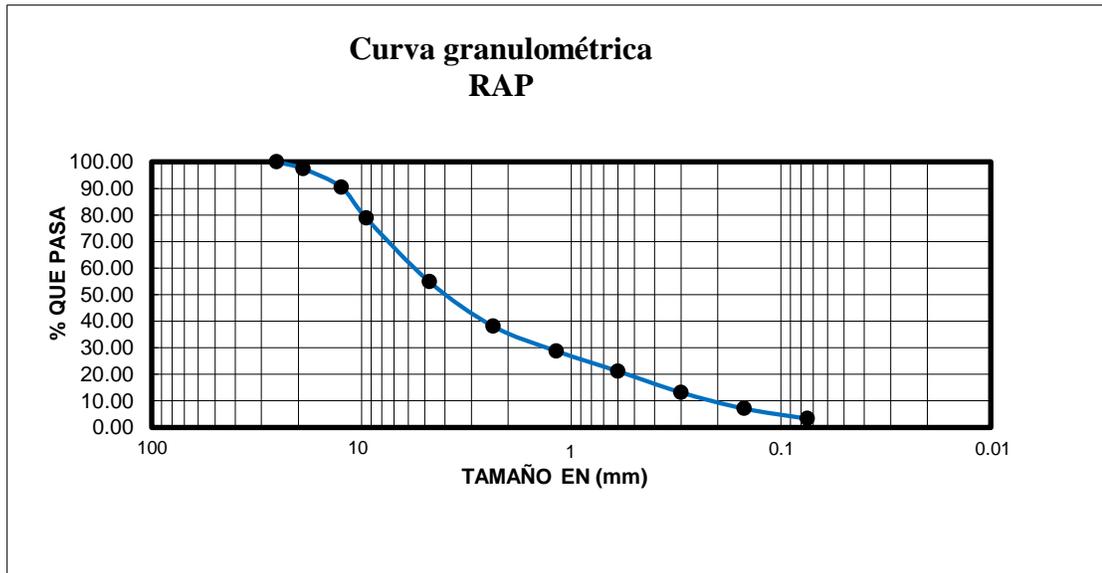
Tablas de resultados

Tabla 3.31 Tabla de resultados de la granulometría del RAP

Peso total (gr.)			1779.2		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	45.90	45.90	2.58	97.42
1/2"	12.5	123.50	169.40	9.52	90.48
3/8"	9.50	207.30	376.70	21.17	78.83
Nº4	4.75	426.00	802.70	45.12	54.88
Nº8	2.36	298.10	1100.80	61.87	38.13
Nº16	1.18	166.00	1266.80	71.20	28.80
Nº30	0.60	134.88	1401.68	78.78	21.22
Nº50	0.30	142.60	1544.28	86.80	13.20
Nº100	0.15	108.30	1652.58	92.88	7.12
Nº200	0.075	67.75	1720.33	96.69	3.31
BASE	-	58.68	1779.01	99.99	0.01
	Suma	1779.0			
	Pérdidas	0.2			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico.3.4 Curva granulométrica del RAP



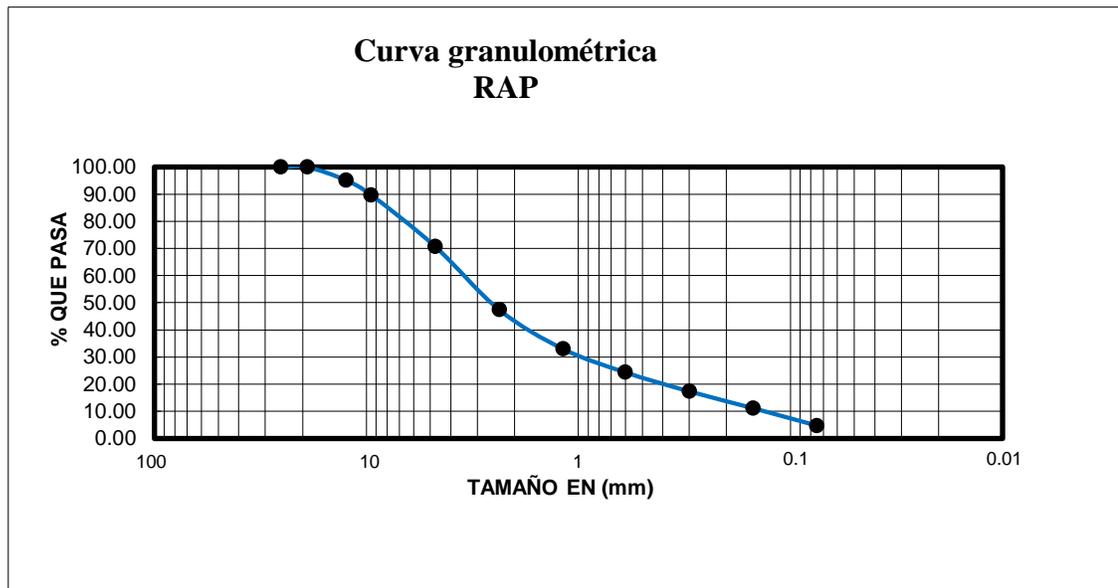
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.32 Tabla de resultados de la granulometría del RAP

Peso total (gr.)			1381.1		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	66.20	66.20	4.79	95.21
3/8"	9.50	75.30	141.50	10.25	89.75
Nº4	4.75	261.80	403.30	29.20	70.80
Nº8	2.36	323.70	727.00	52.64	47.36
Nº10	1.18	199.40	926.40	67.08	32.92
Nº30	0.60	119.10	1045.50	75.70	24.30
Nº50	0.30	96.60	1142.10	82.69	17.31
Nº100	0.15	85.80	1227.90	88.91	11.09
Nº200	0.075	88.60	1316.50	95.32	4.68
BASE	-	64.40	1380.90	99.99	0.01
Suma		1380.9			
Pérdidas		0.2			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico.3.5 Curva granulométrica del RAP



Fuente: Elaboración propia

Las demás tablas y gráficos se muestran en el anexo 5

3.4.4 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821-95)

La importancia de contar con un alto contenido de partículas fracturadas consiste en maximizar la resistencia al corte incrementando la fricción interna entre partículas en mezclas de agregados ligados o no ligados.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje en peso del material que presente una o más caras fracturadas de las muestras de áridos.

Se esparce la muestra en un área suficientemente grande para inspeccionar cada partícula. Si es necesario, se lava el árido sucio, esto facilitará la inspección y detección de las partículas fracturadas.

A continuación, se separa con el borde de la espátula, las partículas que tengan una o más caras fracturadas. Si una partícula de árido redondeada presenta una fractura muy pequeña, no se clasificará como partícula fracturada. Una partícula se considera como fracturada cuando un 20% o más del área de la superficie aparece fracturada. Las fracturas deben

ser únicamente las recientes, aquellas que no han sido producidas por la naturaleza, sino por procedimientos mecánicos.

Imagen: 3.45 Caras fracturadas del agregado



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.33 Datos y resultados del ensayo del porcentaje de caras fracturadas

Tamiz	Peso Retenido (gr)	% retenido	Peso de partículas fracturadas (gr) (mi)	Porcentaje de partículas fracturadas (P)
1 1/2" - 1"	0.00	0.00	0.00	0.00
1" - 3/4"	423.20	19.16	344.70	81.45
3/4" - 1/2"	960.60	43.48	807.60	84.07
1/2" - 3/8"	510.40	23.10	398.30	78.04
3/8" - 1/4"	315.10	14.26	208.30	66.11
Peso total	2209.30	100.00	1758.90	

Porcentaje de partículas fracturadas (P)	79.61	%
--	--------------	---

Fuente: Elaboración propia

3.4.5 Porcentaje de Partículas Planas y Alargadas (ASTM D 4791-10)

La forma de la partícula es un parámetro que influencia las propiedades de desempeño de la mezcla asfáltica, por lo que, para un comportamiento adecuado, se busca contar con partículas esféricas y evitar las partículas planas y alargadas debido a que pudieran presentar tendencia a fracturarse durante la construcción y bajo la acción del tránsito.

Las partículas planas y alargadas son definidas respectivamente, como aquellas partículas cuya dimensión última es menor que 0.6 veces de su dimensión promedio y aquellas que son mayores 1.8 veces la dimensión promedio.

3.4.5.1 Partículas Alargadas

Imagen: 3.46 Equipo donde se ensayó el alargamiento del agregado



Fuente: Elaboración propia

Imagen: 3.47 Realizando el ensayo de el alargamiento del agregado



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.34 Datos y resultados del ensayo partículas alargadas

Tamaño de la muestra de ensayo = 2000 gr

Tamiz	Peso Retenido (gr) (Ri)	% retenido	Peso de partículas retenidas (gr)	Índice de alargamiento % (IAi)
1 1/2" - 1"	0.00	0.00	0.00	
1" - 3/4"	83.90	4.20	0.00	0.00
3/4" - 1/2"	250.00	12.50	67.70	27.08
1/2" - 3/8"	265.80	13.29	69.60	26.19
3/8" - 1/4"	309.60	15.48	58.80	18.99
	1090.00	54.50		
Peso total	1999.30	99.97	196.10	-

Índice de alargamiento global % (IA) =	9.81	%
--	------	---

Fuente: Elaboración propia

3.4.5.2 Partículas Aplanadas

Imagen: 3.48 Tamices para el ensayo de aplanamiento



Fuente: Elaboración propia

Imagen: 3.49 Realizando el tamizado correspondiente



Fuente: Elaboración propia

Imagen: 3.50 Material retenido en el tamiz



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.35 Datos y resultados del ensayo partículas aplanadas

Tamaño de la muestra de ensayo = 2000 gr

Tamiz	Peso Retenido (gr) (Ri)	% retenido	Peso de partículas que pasa (gr) (mi)	Índice de aplanamiento % (ILi)
1 1/2" - 1"	0.00	0.00	0.00	
1" - 3/4"	83.90	4.20	31.70	37.78
3/4" - 1/2"	250.00	12.50	66.90	26.76
1/2" - 3/8"	265.80	13.29	90.20	33.94
3/8" - 1/4"	309.60	15.49	64.30	20.77
Base	1090.00	54.52		
Peso total	1999.30	100.00	253.10	-

índice de aplanamiento global % (IL) =	12.66	%
--	-------	---

Fuente: Elaboración propia

3.4.6 Ensayo de Abrasión por medio de la Máquina de los Ángeles (AASHTO T96-99 y ASTM C- 131)

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 1/2"), por medio de la máquina de los ángeles. Para la grava 3/4 se utilizan once esferas mientras que para la grava 3/8 se utilizan ocho esferas para evaluar el desgaste.

Imagen: 3.51 Colocación del material en equipo desgaste de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Imagen: 3.52 Material después de realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.36 Resultados del ensayo de desgaste de los Ángeles

Pasado	Retenido	Cantidad tomada (gr)
3/4	1/2	2500.20
1/2	3/8	2500.00
Retenido Tamiz De Corte N° 12 (1,7 mm)		3655.80
Diferencia		1344.4
% Desgaste		26.89
Especificación ASTM		35% Max
% Desgaste		26.89<35

Fuente: Elaboración propia

3.4.7 Peso Específico (AASHTO T85-91 y ASTM D-127)

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

La gravedad específica del agregado es necesaria para determinar el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas compactadas.

Por definición, la gravedad específica de un agregado es la relación del peso por unidad de volumen de un material respecto del mismo volumen de agua a aproximadamente 23°C (73.4°F).

Imagen: 3.53 Realizando el secado superficialmente del material correspondiente



Fuente: Elaboración propia

Imagen: 3.54 Realizando el peso del material sumergido



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.37 Datos de las muestras de agregado para peso específico

Muestra n°	Peso muestra secada “a” (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca “b”(gr)	Peso muestra saturada del agua “c” (gr)
1	2942.20	3000.00	1835.70
2	2943.10	3000.00	1826.10
3	2933.90	3000.00	1857.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.38 Resultados de peso específico del agregado

	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
	2.53	2.58	2.66	1.96
	2.51	2.56	2.63	1.93
	2.57	2.62	2.72	2.25
Promedio	2.53	2.59	2.67	2.05

Fuente: Elaboración propia

3.4.8 Gravedad Específica en Agregados Finos (AASHTO T84-00 y ASTM E-128)

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso. El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

Imagen: 3.55 Verificando el grado de humedad del material



Fuente: Elaboración propia

Imagen: 3.56 Llenado de material dentro de los frascos



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.39 Datos de las muestras de agregado fino para el peso específico

Muestra N°	Peso muestra (gr)	Peso de matraz (gr)	Muestra + matraz + agua (gr)	Peso del agua agregado al matraz "w" (ml) o (gr)	Peso muestra secada "a" (gr)	Volumen del matraz "v" (ml)
1	500	237.00	989.00	252.00	493.30	500
2	500	221.60	941.70	220.10	490.40	500
3	500	198.00	998.30	300.30	492.50	500

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.40 Resultados de peso específico del agregado fino

	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
	1.99	2.02	2.04	1.34
	1.75	1.79	1.81	1.92
	2.47	2.50	2.56	1.50
Promedio	2.07	2.10	2.14	1.59

Fuente: Elaboración propia

Tablas 3.41 Tabla de resultados del material RAP

AGREGADOS			
Ensayos	Unidad	Resultados	Especificaciones ASHTOO-ASTM
Caras fracturadas	%	79.61	>75
Aplanamiento	%	12.66	---
Alargamiento	%	9.81	---
Desgaste de los ángeles	%	26.89	35 Max
Peso específico agregado grueso	g/cm ³	2.67	---
Peso específico agregado fino	g/cm ³	2.14	---

Fuente: Elaboración propia

3.5 MÉTODO DE LA HOMOGENEIZACIÓN

3.5.1 Procedimiento

El principio de la homogeneización utilizado en Alemania dice que la uniformidad de la mezcla es fundamental y debe evaluarse por referencia a una gama de características de los materiales contenidos en la mezcla.

Para caracterizar el material, debe examinarse sus características más principales:

- Determinación del Contenido del aglutinante asfáltico
- Determinación de la distribución del tamaño de los áridos:
 - Fracción de granulado <0,063 mm [M .-%]
 - Fracción de granulado de 0,063 - 2 mm [M. -%]
 - Fracción de granulado > 2 mm [M .-%]

El procedimiento para determinar la cantidad máxima de adición de granulado de asfalto en la nueva mezcla se describe en el Anexo D del Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07.

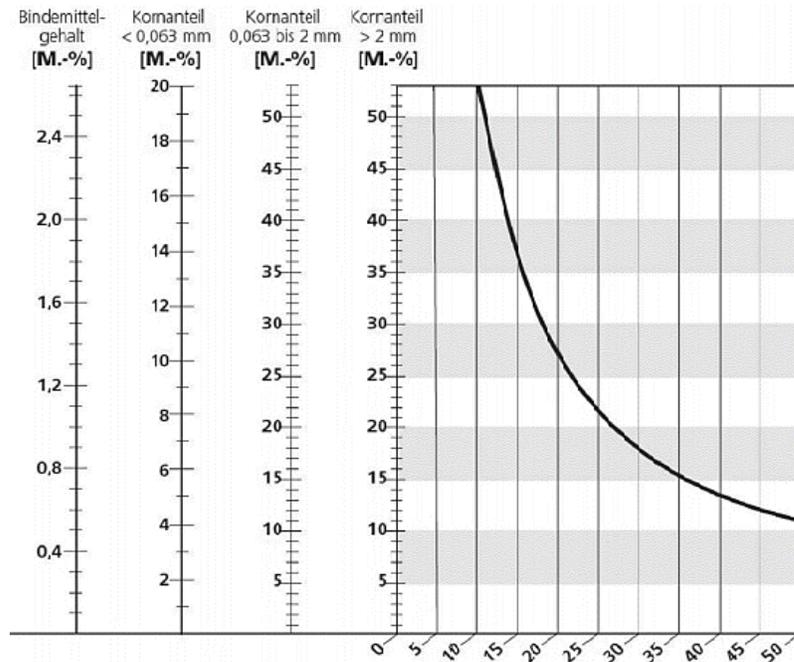
3.5.2 Determinación de la cantidad de Adición del RAP

Para la evaluación de la homogeneidad, se debe tomar una muestra y examinarla en sus características principales. La adición máxima resultante de la homogeneidad del

granulado de asfalto es el menor de los valores determinados para esas características (contenido de aglutinante y conteos de partículas de áridos de 0 a 0.074 mm, de 0.074 a 2 mm y > 2 mm),

Con la ayuda del nomograma (gráfico 3.6.), podemos ver de manera aproximada el máximo posible del RAP en la nueva mezcla.

Gráfico 3.6. Máxima cantidad de adición de RAP en %



Fuente: Anexo D del Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07.

Las cantidades máximas de adición también dependen del tipo de capa. Para su uso en la capa de base, capa sub base y capa binder constante 0.5, para rodamiento, constante 0.33

$$Z_i = \frac{const.*T_{zul,i}}{a_i} * 100$$

Donde:

Z_i = Es la Posible cantidad de suministro de asfalto reciclado en M.-%,

a_i = Es la envergadura de la función (diferencia entre el valor más grande y el más pequeño de la serie de medición de valores atípicos)

Tzul,i = Es la tolerancia total (véase la tabla 3.42)

Const. = Constante 0.5 para capas bases, capas sub bases y capas binder y 0.33 para capas de revestimiento

Es necesario determinar todos los valores de Zi. El menor valor determina la cantidad máxima posible de asfalto reciclado.

Tabla 3.42 Cuadro de tolerancia Tzul, i de características relevantes dependiendo del tipo de capa.

Características	Tzul,i	
	Capa de rodamiento, capa de revestimiento	Capa de base Capa sub bases , binder
Contenido de aglutinante [M.-%,]	0.8	1
Fracción de áridos < 0.063 mm [M.-%,]	6	10
Fracción de áridos 0.063 bis 2 mm [M.-%,]	16	16
Fracción de áridos > 2 mm [M.-%,]	16	18

Fuente: Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07

Cálculos

Determinación del contenido de asfalto por centrifugación

$$\% \text{ de asfalto en la mezcla} = \frac{A - (B + C)}{A} * 100$$

Donde:

A= Peso de la mezcla inicial

B= Peso de los agregados secos

C= Material retenido en el papel filtro

Muestra 1

Datos

$$A = 1947.3$$

$$B+C = 1843.7$$

$$\% \text{ De asfalto en la mezcla} = \frac{1947.3 - 1843.7}{1947.3} * 100$$

$$\% \text{ De asfalto en la mezcla} = 5.32 \%$$

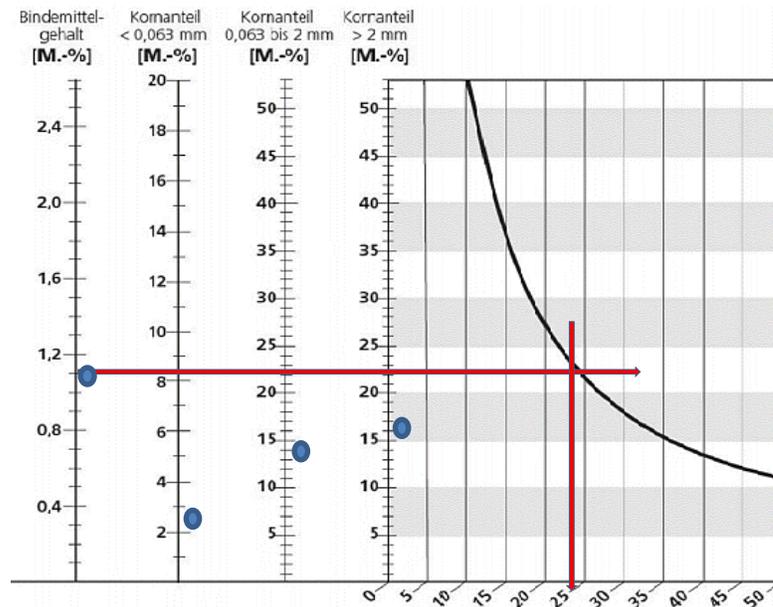
Tabla 3.43 Resultados para las distintas muestras ensayadas

	Contenido de cemento asfáltico	Fracción de granulado <0.074 mm[M-%]	Fracción de granulado entre 0.074 mm y 2 mm[M-%]	Fracción de granulado > 2 mm[M-%]	%
Muestra 1	5.32	3.31	32.39	64.30	100
Muestra 2	6.34	4.68	39.02	56.30	100
Muestra 3	6.35	3.15	31.98	64.87	100
Muestra 4	5.77	2.36	24.11	73.53	100
Muestra 5	5.21	4.67	39.02	56.31	100
Media	5.80	3.63	33.30	63.06	100
Intervalo	1.14	2.32	14.91	17.23	

Fuente: Elaboración propia

Con la ayuda del nomograma (gráfico 3.7), podemos ver de manera aproximada el máximo posible del RAP en la nueva mezcla.

Gráfico 3.7 Calculo de la adición de RAP en %



Fuente: Anexo D del Reglamento alemán TL Asphalt-StB 07.

Cantidad máxima de adición de RAP 23 % aproximado

$$Z_i = \frac{\text{const.} \cdot T_{zul,i}}{a_i} * 100 \quad \text{Constante } 0.5 \text{ para capas bases y sub bases}$$

$$Z_i = \frac{\text{const.} \cdot T_{zul,i}}{a_i} * 100 \quad \text{Constante } 0.33 \text{ Para capas de revestimiento}$$

Calculo de la posible cantidad de suministro de asfalto reciclado en M.-%,

$$Z_i = \frac{0.33 \cdot 0.8}{1.14} * 100$$

$$Z_i = 23.15 \%$$

$$Z_i = 23\%$$

$$Z_i = \frac{0.33 \cdot 16}{14.91} * 100$$

$$Z_i = 35.41 \%$$

$$Z_i = 35 \%$$

$$Z_i = \frac{0.33 \cdot 6}{2.32} * 100$$

$$Z_i = 85.34\%$$

$$Z_i = 85\%$$

$$Z_i = \frac{0.33 \cdot 16}{17.23} * 100$$

$$Z_i = 30.64 \%$$

$$Z_i = 31 \%$$

Tabla 3.44 Resultados del cálculo de porcentajes de RAP

Para capas rodamiento (revestimiento)		
Contenido de ligante	23.00	%
Fracción de granulo fino	85.00	%
Fracción de granulo medio	35.00	%
Fracción de granulo grueso	31.00	%

Cantidad máxima de adición	23.00	%
-----------------------------------	-------	---

Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos se escoge el valor más bajo **23%** el cual sería la cantidad máxima de adición de RAP a la nueva mezcla asfáltica del lote del RAP en estudio

3.6 MÉTODO PG – GRADE

3.6.1 Selección del grado asfáltico.

La especificación Superpave para ligantes asfálticos define el grado de desempeño PG con base en registros de temperaturas ambiente de estaciones meteorológicas por un periodo mínimo de 20 años. Se calcula el promedio y la desviación estándar de las temperaturas máximas del aire de los siete días consecutivos más calurosos del año y el promedio y la desviación estándar de la temperatura mínima del aire del día más frío del año. Posteriormente, son calculadas las temperaturas del pavimento.

El grado de desempeño varía en niveles, cada nivel equivale a 6°C, tanto en altas como en bajas temperaturas.

La nueva nomenclatura que define el grado de comportamiento de los asfaltos es PG XX-YY, donde:

PG.- Performance Grade.

XX.- Temperatura Máxima (temperatura máxima a la cual el asfalto debe mantener sus propiedades durante el servicio).

YY.- Temperatura Mínima (temperatura mínima a la cual el asfalto debe mantener sus propiedades durante el servicio).

Tabla 3.45 Rangos para el grado PG a diferentes temperaturas

Clasificación a alta temperatura	Clasificación a baja temperatura
PG 46	-34, -40, -46
PG 52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46
PG 58	-16, -22, -28, -34, -40
PG 64	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG 70	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG 76	-10, -16, -22, -28, -34
PG 82	-10, -16, -22, -28, -34

Fuente: Asphalt Institute. MS-2 Asphalt Mix Design Methods. 7ta Ed. USA, 2014

3.6.2 Recolección de información de temperaturas del departamento de Tarija

La información disponible incluye un total de 38 estaciones climáticas con información de temperaturas extremas diarias del departamento de Tarija tabla 3.46, obtenidas del SENAMHI (Servicio Nacional de meteorología e Hidrología) y AASANA (Administración de Aeropuertos y Servicios Auxiliares de la Navegación Aérea).

Tabla 3.46 Estaciones meteorológicas con información de temperaturas extremas diarias del departamento de Tarija

Estaciones meteorológicas			
N°	Provincia	Estación	Operador
1	Cercado	Tarija - Aeropuerto	AASANA
2		San Andrés	SENAMHI
3		San Jacinto Sud	SENAMHI
4		Yesera Norte	SENAMHI
5		El Tejar Tarija	SENAMHI
6		Yesera Sud	SENAMHI
7		Las Barrancas	SENAMHI
8		Turumayo	SENAMHI
9	Méndez	Campanario	SENAMHI
10		Coimata	SENAMHI
11		Sella Quebrada	SENAMHI
12		El Puente	SENAMHI
13		Trancas	SENAMHI
14		Tomayapo Pueblo	SENAMHI
15		Tucumillas	SENAMHI
16		El Molino Iscayachi	SENAMHI
17		Paicho Centro	SENAMHI
18		Aguaraycito	SENAMHI
19		Palmar Grande	SENAMHI

20	Gran Chaco	Yacuibá - Aeropuerto	AASANA
21		Villa Montes - Aeropuerto	AASANA
22		Palmar Chico	SENAMHI
23		Ibibobo	SENAMHI
24		Itau	SENAMHI
25		Caraparí	SENAMHI
26		Arce	Bermejo - Aeropuerto
27	Cañas		SENAMHI
28	El 9 Bermejo		SENAMHI
29	Emborozú		SENAMHI
30	La Mamora		SENAMHI
31	La Merced		SENAMHI
32	Avilés	CENAVIT	SENAMHI
33		Juntas	SENAMHI
34		La Angostura	SENAMHI
35		Chocloca	SENAMHI
36	O'Connor	Entre Ríos	SENAMHI
37		Saykan Perulas	SENAMHI
38		Tarupayo	SENAMHI

Fuente: Elaboración propia

Para este estudio se seleccionaron las estaciones climatológicas de Trancas Sella Quebradas Coimata Tucumillas de dichas estaciones obtuvimos la información de sus temperaturas extremas máximas y mínimas, también, sus respectivas altitudes y latitudes.

3.6.3 Cálculo de las temperaturas del aire

Para ello necesitamos datos de las condiciones de registro de temperaturas ambiente, necesitamos datos de las temperaturas máximas y mínimas del aire por un periodo mínimo de 20 años, con base en esos datos de temperaturas máximas y mínimas por un período de 20 años nosotros podemos hacer un cálculo de los promedios para el caso de la

temperatura máxima de los siete días consecutivos más calientes del año, es decir de cada año se escoge los siete días consecutivos más calientes del año y con eso podríamos tener el promedio de esos siete días consecutivos más calientes del año, si tenemos 20 años entonces tendríamos 20 datos correctos y lo que hacemos después es a esos 20 datos sacar el promedio sacar la desviación estándar y con base en esa data de condiciones climáticas calcular la temperatura máxima del pavimento o la temperatura máxima a la cual va a llegar el pavimento; por otro lado tenemos la temperatura mínima y la temperatura mínima; la temperatura mínima será pues aquel representado por el día más frío del año; entonces si tenemos datos climatológicos de 20 años, de cada año vamos a escoger el día más frío es decir la temperatura más fría la más extrema y si tenemos 20 años tenemos entonces 20 datos de temperaturas frías verdad; a esos 20 de datos le sacamos el promedio y le sacamos la desviación estándar y con base en este dato empezamos a calcular las temperaturas máximas y mínimas del pavimento en base a modelos establecidos justamente por el programa SUPERPAVE.

Tabla 3.47 Estación meteorológica de Coimata

Estación: Coimata			
N°	Año	Tmed max	Tmed min
1	1994	34.19	-7.8
2	1995	33.37	-5.2
3	1996	32.97	-9.8
4	1997	34.97	-4.8
5	1998	34.51	-4.6
6	1999	32.29	-8
7	2000	34.00	-10.4
8	2001	33.37	-8.6
9	2002	34.17	-6.4
10	2003	34.29	-5.8
11	2004	33.34	-6.4
12	2005	33.31	-7.2
13	2006	32.74	-6.6
14	2007	33.77	-8.4
15	2009	34.00	-6

16	2010	34.89	-10.5
17	2011	33.64	-5
18	2012	33.57	-5
19	2013	34.29	-7
20	2014	33.29	-3
21	2015	33.57	-6
22	2016	34.57	-3
23	2017	33.71	-4
24	2018	33.29	-3
25	2019	34.29	-4
Temperatura media		33.82	-6.26
Desviación estándar		0.67	2.20

Fuente: Elaboración propia

Las demás tablas se muestran en el Anexo 6

El cálculo de la temperatura máxima y mínima del aire depende de la confiabilidad requerida (z) y de la desviación estándar de los datos (σ):

$$T_{MAX\ ar} = T_{media} + z^* \sigma$$

$$T_{MIN\ ar} = T_{media} - z^* \sigma$$

Donde:

$T_{MAX\ ar}$ = Promedio de las temperaturas máximas del aire de 7 días consecutivos (°C)

$T_{MIN\ ar}$ = Temperatura mínima del aire (°C)

$$T_{MAX\ ar} = 33.82 + 2.05 * 0.67$$

$$T_{MAX\ ar} = \mathbf{35.19\ ^\circ C}$$

$$T_{MIN\ ar} = -6.26 - 2.05 * 2.20$$

$$T_{MIN\ ar} = \mathbf{-10.77\ ^\circ C}$$

3.6.4 Cálculo de las temperaturas del pavimento

Las temperaturas máximas y mínima del pavimento son calculadas a partir de las temperaturas del aire y de un coeficiente (Lat.), función de la localización geográfica (latitud).

3.6.4.1 Temperatura máxima del pavimento

Primer modelo, desarrollado por el SHRP para el cálculo de las temperaturas máximas del pavimento a **20 mm** de profundidad propuso la siguiente ecuación (**McGennis et al., 1994**):

Modelo SHRP Original (McGennis et al.,1994)

$$T_{MAX} = 0.9545*(T_{MAX\ ar} - 0.00618*Lat^2 + 0.2289*Lat + 42.2) - 17.78$$

$$T_{MAX} = 0.9545*(35.19 - 0.00618*21.5^2 + 0.2289*21.5 + 42.2) - 17.78$$

$$T_{MAX} = 58.06\text{ °C}$$

Modelo LTPP Bind (Mohseni, 1996) Basado en 30 pistas experimentales

$$T_{MAX} = 54.32 + (0.77585*T_{MAX\ ar}) - (0.002468*Lat^2) - [15.137*\log_{10}(H+25)]$$

$$T_{MAX} = 54.32 + (0.77585*35.19) - (0.002468*21.5^2) - [15.137*\log_{10}(2+25)]$$

$$T_{MAX} = 58.82\text{ °C}$$

Modelo LTPP Bind (Mohseni e Carpenter, 2004) - ICM

ICM basado en datos de aproximación 8000 estaciones meteorológicas

$$T_{MAX} = 32.7 + 0.837*T_{MAX\ ar} - 0.0029*Lat^2 + z * (\sigma^2 + \delta_{modelo}^2)^{1/2}$$

Donde:

$$\delta_{modelo} = \text{Error estándar de modelo} = 2.1\text{ °C}$$

$$T_{MAX} = 32.7 + 0.837*35.19 - 0.0029*21.5^2 + 2.05 * (0.67^2 + 2.1^2)^{1/2}$$

$$T_{MAX} = 65.34\text{ °C}$$

3.6.4.2 Temperatura mínima del pavimento

Para el cálculo de las temperaturas mínimas el SHRP original recomienda considerar la temperatura del pavimento igual a la temperatura mínima del aire que es una

recomendación bastante conservadora, porque generalmente la temperatura del pavimento es superior a la temperatura del aire.

Modelo SHRP original (McGennis et al., 1994)

$$T_{MIN} = T_{MIN\ ar}$$

$$T_{MIN} = -10.77\ ^\circ\text{C}$$

Modelo C- SHRP (Canadá)

Los investigadores del C-SHRP (SHRP Canadiense) recomiendan utilizar la ecuación

$$T_{MIN} = 0.859 * T_{MIN\ ar} + 1.7$$

$$T_{MIN} = 0.859 * (-10.77) + 1.7$$

$$T_{MIN} = -7.55\ ^\circ\text{C}$$

Modelo LTPP Bind (Mohseni, 1996) Basado en 30 pistas experimentales

$$T_{MIN} = -1.56 + (0.71819 * T_{MIN\ ar}) - (0.003966 * Lat^2) + [6.264 * \log_{10}(H+25)]$$

$$T_{MIN} = -1.56 + (0.71819 * (-10.77)) - (0.003966 * 21.5^2) + [6.264 * \log_{10}(2+25)]$$

$$T_{MIN} = -2.16\ ^\circ\text{C}$$

Modelo LTPP Bind (LTPP-FHWA, 1998 e Bosscher, 2000)

$$T_{MIN} = -1.56 + 0.72 * T_{MIN\ ar} - 0.004 * Lat^2 + 6.26 \log(H+25) - z * (4.4 + 0.52 * \sigma^2)^{1/2}$$

$$T_{MIN} = -1.56 + 0.72 * (-10.77) - 0.004 * 21.5^2 + 6.26 \log(2+25) - 2.05 * (4.4 + 0.52 * 2.20^2)^{1/2}$$

$$T_{MIN} = -7.60\ ^\circ\text{C}$$

Tabla 3.48 Grado de desempeño para cada estación meteorológica

N°	Estación meteorológica	Temperatura del pavimento		Grado de desempeño
		Tmax.	Tmin.	PG
1	Coimata	58.06	-7.60	64 - 10
2	Sella Quebradas	59.31	-7.62	64 - 10
3	Trancas	60.37	-6.96	64 - 10
4	Tucumillas	55	-6	58 - 16

Fuente: Elaboración propia

PG seleccionado 64-10

Tabla 3.49 Tabla para definir el aumento del PG para la temperatura máxima del pavimento

Volumen de tránsito ESAL s (millones)	Condiciones de velocidad de vehículo		
	Estacionaria (V = 20km/h)	Lento (V = 20 - 70 Km/h)	Rápida (V > 70 KM /h)
< 0.3	-----	-----	-----
0.3 a < 3	2	1	-----
3 a < 10	2	1	-----
10 a < 30	2	1	-----
≥ 30	2	1	1

Fuente: Instituto del asfalto

Estás condiciones deben ser consideradas para incrementar el PG en particular en la zona de alta temperatura y se encuentran recogidas en el método SUPERPAVE.

Para el caso de las bajas temperaturas no existe un ajuste como tal especificado en el método.

La guía nacional actual para determinar el ajuste del grado del cemento asfáltico en mezclas asfálticas que incorporan RAP tiene tres niveles

Tabla 3.50 Guía de selección de aglutinantes para mezclas con RAP según AASHTO M 323

Grado PG recomendado del cemento asfáltico virgen	Rango de porcentajes de RAP
Ningún cambio en el grado PG solicitado	<15%
Cemento asfáltico virgen un grado más suave de lo normal (por ejemplo, seleccione PG 58 -28 si normalmente se usaría PG 64-22)	15-25%
Seguir las recomendaciones de cálculo de PG del cemento asfáltico de la mezcla	>25%

Fuente: Rationale for Revising AASHTO M 323

Para nuestro caso según tabla 3.50 nuestro grado desempeño PG es 58-16

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

3.7.1 Equipo

Molde de Compactación:

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

Martillo de compactación:

Con base plana circular de apisonado de 98,4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un pisón de 4.54 kg (10 lb.) de peso total, cuya altura de caída es de 457.2 mm (18").

Extractor de Muestras de Asfaltos:

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

Soporte para molde o porta-molde:

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

Mordaza:

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

Medidor de Estabilidad:

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

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

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

Balanza: Para pesar agregado y asfalto con una sensibilidad de un 0.01g, para pesar probetas compactadas de 1200 g.

3.7.2 Granulometría de la mezcla

Tabla 3.51 Pesos de agregados retenidos a diferentes porcentajes

		Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Peso Ret.	Peso Ret.	al	al	al
	(mm)	a 3000 gr	a 3000 gr	a 3000 gr	0.28	0.22	0.50
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.0	412.32	0.00	0.00	115.45	0.00	0.00
1/2"	12.5	1732.02	5.58	0.00	484.97	1.23	0.00
3/8"	9.50	529.74	330.48	0.00	148.33	72.71	0.00
N°4	4.75	313.32	2336.88	76.50	87.73	514.11	38.25
N°8	2.36	0.60	296.82	420.10	0.17	65.30	210.05
N°16	1.18	1.14	13.38	292.30	0.32	2.94	146.15
N°30	0.60	1.38	1.66	335.10	0.39	0.36	167.55
N°50	0.30	0.54	1.32	1143.30	0.15	0.29	571.65
N°100	0.15	0.42	2.10	378.40	0.12	0.46	189.20
N°200	0.075	6.17	7.74	231.20	1.73	1.70	115.60
BASE	-	2.22	3.96	123.10	0.62	0.87	61.55
	Suma	2999.9	2999.9	3000.0	839.96	659.98	1500.00

Fuente: Elaboración propia

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

Para el diseño de dicha faja se utilizó los materiales que se disponía, tanto para el agregado grueso, intermedio y fino; con lo cual se estableció que la mezcla de agregados estará

compuesta por el 28 % de agregado grueso de 3/4” , 22% de agregado intermedio de 3/8 ” , y 50% de agregado fino.

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

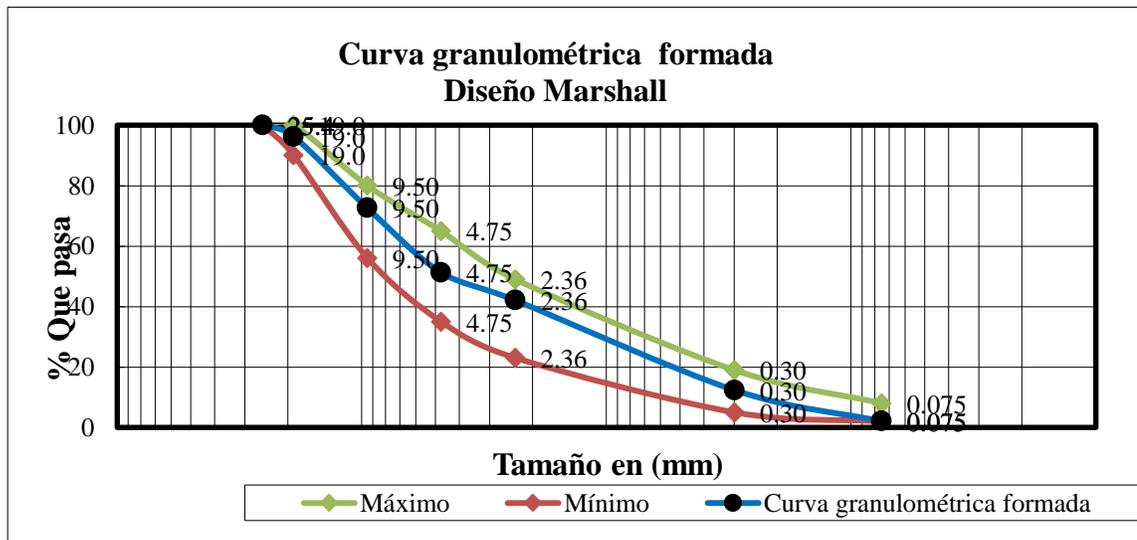
Tabla 3.52 Granulometría formada y especificaciones

Tamices	Tamaño (mm)	Total				Especificaciones	
		Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
		1.00					
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	19.0	115.45	115.45	3.85	96.15	90	100
1/2"	12.5	486.19	601.64	20.06	79.94	-	-
3/8"	9.50	221.03	822.68	27.42	72.58	56	80
Nº4	4.75	640.09	1462.77	48.76	51.24	0.26	65
Nº8	2.36	275.52	1738.29	57.94	42.06	23	49
Nº16	1.18	149.41	1887.70	62.92	37.08	-	-
Nº30	0.60	168.30	2056.00	68.53	31.47	-	-
Nº50	0.30	572.09	2628.09	87.60	12.40	5	19
Nº100	0.15	189.78	2817.87	93.93	6.07	-	-
Nº200	0.075	119.03	2936.90	97.90	2.10	2	8
BASE	-	63.04	2999.95	100.00	0.00	-	-

Fuente: Elaboración propia

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

Gráfico 3.8 Granulometría formada



3.7.3 Determinación del contenido de cemento asfáltico

Corresponde a la cantidad de cemento asfáltico mínimo y óptimo que debe considerarse en la mezcla de acuerdo a los requerimientos de cada proyecto.

Contenido Mínimo

Es la cantidad de cemento asfáltico como mínimo que debe utilizarse en una mezcla asfáltica.

Contenido Óptimo

Es la cantidad óptima de cemento asfáltico cuya consecuencia es obtener las mejores características y propiedades de la mezcla asfáltica.

Contenido Mínimo de cemento Asfáltico

Para determinar el contenido mínimo de cemento asfáltico tenemos dos métodos que son los más utilizados.

- Método por procedimiento del área superficial
- Método por procedimiento basado en la distribución de tamaño de las partículas

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se procede a realizar el diseño de 18 briquetas mediante el método Marshall, con porcentajes diferentes de cemento asfáltico para conocer el porcentaje óptimo a utilizar.

Determinación de la cantidad aproximada de asfalto

$$\%A = 0.035*a + 0.045*b + K*c + F$$

Donde:

$\%A$ = % de asfalto en la mezcla

a = % Retenido tamiz N°8

b = % Pasante tamiz N°8

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

$K = 0.15$, si el % que retiene el tamiz $\frac{3}{4}$ está entre 11% y 15% 0.18 , si el % que retiene está entre 6% y 10 %, 0.20 , si el % que retiene es el 5% o menos

F = de 0 a 2 % que según la absorción del material (se puede asumir 0.7)

Proceso de cálculo:

$$\%A = 0.035*57.94 + 0.045*42.06 + 0.2*2.10 + 0.7$$

$$\%A = 5.04$$

Los porcentajes para los que se trabajarán en las briquetas son los siguientes 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, es decir realizaremos 3 briquetas por cada punto

Preparación de las probetas

Para la dosificación se utilizó la granulometría ya calculada anteriormente. Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico se va a preparar 6 grupos de briquetas para la mezcla de agregados, de forma que las curvas que representen los resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido, cada grupo con diferentes contenidos de cemento asfáltico.

Tabla 3.53 Grupo de briquetas para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico

Grupo de contenido de cemento Asfáltico (%)	N° de muestras
4	3
4.5	3
5	3
5.5	3
6	3
6.5	3
Total	18

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.54 Pesos de los agregados y cemento asfáltico para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Porcentaje de total agregado (%)	96.0%	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%
Peso del cemento asfáltico (gr)	48.00	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de grava (gr)	322.56	320.88	319.20	317.52	315.84	314.16
Peso de gravilla (gr)	253.44	252.12	250.80	249.48	248.16	246.84
Peso de arena (gr)	576.00	573.00	570.00	567.00	564.00	561.00
Peso total de la briketa (gr)	1200.0	1200.0	1200.0	1200.0	1200.0	1200.0

Fuente: Elaboración propia

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

3.7.4 Desarrollo de las briquetas

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

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

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

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

Para el diseño de la mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briketa, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 18 briketas, con las dosificaciones indicadas en la tabla 3.54.

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

Imagen 3.57 Proceso de elaboración de briketas



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.58 Extracción de las muestras



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.59 Briquetas finalizadas



Fuente: Elaboración propia

3.7.5 Ensayos para determinar la densidad de la mezcla

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

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

Procedimiento.

Dejar secar las muestras a temperatura ambiente, pesar y registrar este valor como "A". Sumergir en baño de agua a $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ por 5 minutos, secar superficialmente, pesar y llamar este valor como "B". Sumergir la muestra y el peso registrar con "C".

Imagen 3.60 Ensayos para determinar la densidad de la mezcla



Fuente: Elaboración propia

Tablas de resultados

Tabla 3.55 Densidades promedio de las mezclas asfálticas a diferentes porcentajes de cemento asfáltico

% de Asfalto	Peso Briqueta			Densidad Briqueta		
	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica
%	grs.	grs.	grs.	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³
4.00	1201.0	1220.1	671	2.19	2.21	2.36
	1173.8	1180.2	650	2.21		
	1186.8	1191.6	658	2.22		
4.50	1170.2	1175.9	647	2.21	2.22	2.35
	1184.4	1184.5	660	2.26		
	1176.6	1180.0	640	2.18		
5.00	1177.7	1181.5	658	2.25	2.22	2.33
	1186.5	1190.3	643	2.17		
	1183.8	1188.8	664	2.26		
5.50	1186.1	1200.2	668	2.23	2.23	2.31

	1179.6	1184.2	644	2.18		
	1176.8	1181.3	665	2.28		
6.00	1196.6	1198.9	670	2.26	2.23	2.29
	1190.5	1193.7	656	2.21		
	1176.5	1180.5	650	2.22		
6.50	1183.7	1194.2	674	2.28	2.22	2.27
	1180.0	1188.9	646	2.17		
	1182.4	1187.0	655	2.22		

Fuente: Elaboración propia

3.7.6 Ensayos de estabilidad y fluencia

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

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

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

Se coloca la briqueta en las mordazas y se aplica la carga a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto, hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60°C se anota como el valor de "Estabilidad Marshall", el cual después se anotará como kilogramo fuerza, para el sistema que se maneja en el medio.

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

Imagen 3.61 Ensayo de Marshall



Fuente: Elaboración propia

Tablas de resultados

Tabla 3.56 Resultados del ensayo de estabilidad y fluencia para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico

Contenido de cemento asfáltico	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
(%)	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
4	784	2092.93	0.93	1941.20	1960.76	8	8.00
	800	2136.02	0.92	1959.80		9	
	790	2109.09	0.94	1981.28		7	
	900	2405.3	0.96	2304.52	2444.7	9	8.33

4.5	1000	2674.58	0.94	2507.69		8	
	990	2647.65	0.95	2521.89		8	
5	1010	2701.51	0.95	2568.32	2634.59	9	9.00
	1100	2943.86	0.95	2798.73		10	
	990	2647.65	0.96	2536.71		8	
5.5	1100	2943.86	0.95	2809.62	2741.8	10	9.67
	1100	2943.86	0.97	2848.18		9	
	1000	2674.58	0.96	2567.60		10	
6	1061	2838.84	0.96	2732.38	2680.23	10	10.67
	1041	2784.98	0.96	2680.55		11	
	1000	2674.58	0.98	2627.77		11	
6.5	800	2136.02	0.97	2071.94	2152.09	11	11.67
	900	2405.3	0.98	2363.21		13	
	763	2036.39	0.99	2021.11		11	

Fuente: Elaboración propia

3.7.7 Contenido óptimo de cemento asfáltico

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

Tablas de Resultados

Tabla 3.57 Resultados de porcentaje de vacíos y relación betunen vacíos.

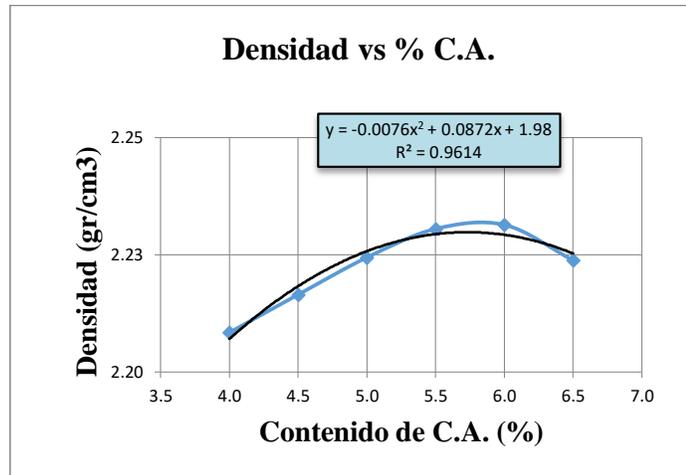
Contenido de cemento asfáltico	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betunen vacíos)
(%)	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%
4	2.19	2.21	2.36	6.55	15.35	57.32
	2.21					
	2.22					
4.5	2.21	2.22	2.35	5.48	15.42	64.43
	2.26					
	2.18					
5	2.25	2.22	2.33	4.41	15.49	71.51
	2.17					
	2.26					
5.5	2.23	2.23	2.31	3.41	15.63	78.18
	2.18					

	2.28					
6	2.26	2.23	2.29	2.62	15.96	83.57
	2.21					
	2.22					
6.5	2.28	2.22	2.27	2.19	16.59	86.77
	2.17					
	2.22					

Fuente: Elaboración propia

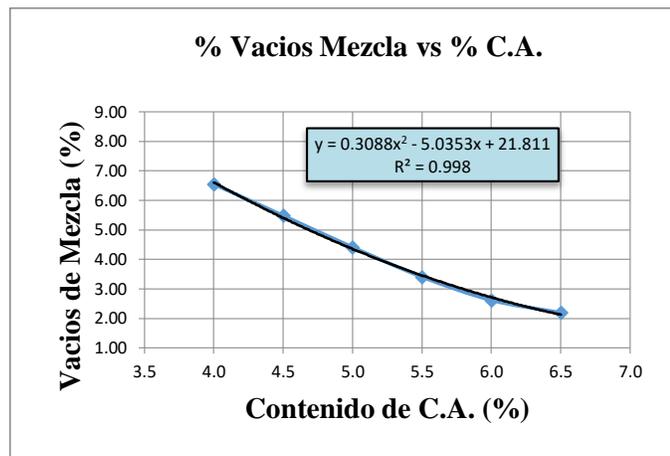
Gráficos de curvas de diseño de la mezcla asfáltica método Marshall, para encontrar el contenido óptimo.

Gráfico 3.9 Contenido de cemento asfáltico vs densidad de las briquetas



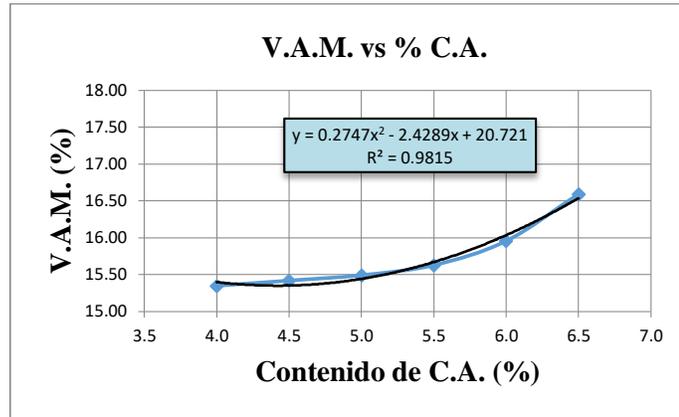
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.10 Contenido de cemento asfáltico vs porcentaje de vacíos de la mezcla



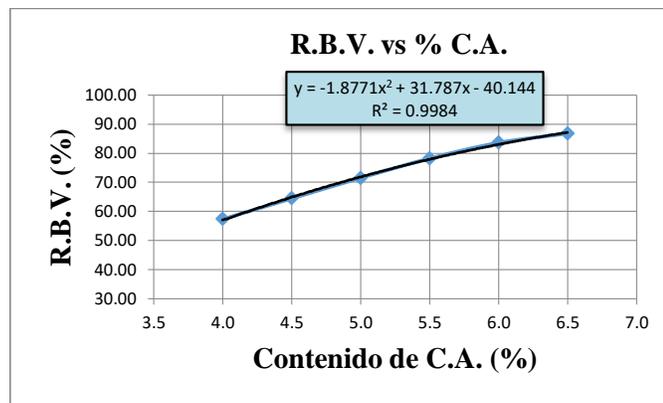
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.11 Contenido de cemento asfáltico vs porcentaje de vacíos de agregado mineral



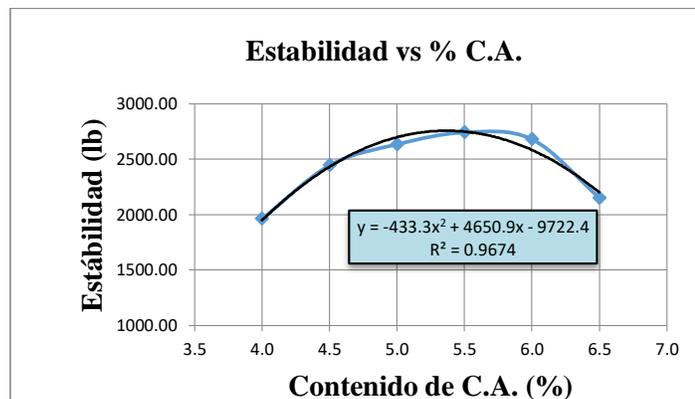
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.12 Contenido de cemento asfáltico vs relación betumen vacíos



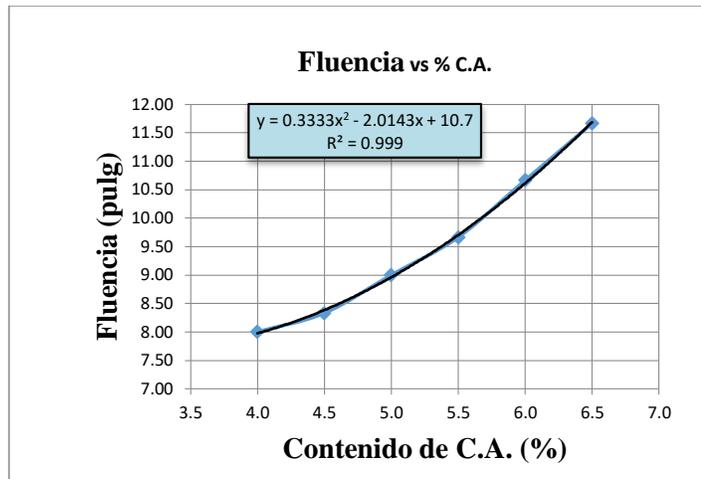
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.13 Contenido de cemento asfáltico vs estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.14 Contenido de cemento asfáltico vs fluencia



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.58 Resultados de los ensayos para encontrar el contenido óptimo

Contenido de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% De vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4.0	2.21	1960.76	8.00	6.55	57.32	15.35
4.5	2.22	2444.70	8.33	5.48	64.43	15.42
5.0	2.22	2634.59	9.00	4.41	71.51	15.49
5.5	2.23	2741.80	9.67	3.41	78.18	15.63
6.0	2.23	2680.23	10.67	2.62	83.57	15.96
6.5	2.22	2152.09	11.67	2.19	86.77	16.59
X	5.74	5.38		5.17	5.9	4.9
Ymax	2.23	2757.91		4	75	15.5

Fuente: Elaboración propia

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

$$C.O. \text{ de C.A.} = \frac{C.O. \cdot Dens.max. + C.O. \cdot Est..max. + C.O. \cdot \% \text{ Vacios } 4\% + C.O. \cdot R.B.V.75\% + VAM}{5}$$

Donde:

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

$C.O_{Dens.max.}$ = Contenido óptimo para una densidad máxima.

$C.O_{Est.max.}$ = Contenido óptimo para la estabilidad máxima.

$C.O_{\% vacios 4\%}$ = Contenido óptimo al 4% de vacíos

$C.O_{R.B.V.75\%}$ = Contenido óptimo para una relación betumen vacíos de 75%.

$$C.O. de C.A. = \frac{5.74+5.38+5.17+5.9+4.9}{5}$$

$$C.O. de C.A. = 5.42 \%$$

3.8 DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON RAP.

El equipo es el mismo usado para encontrar el contenido óptimo de la mezcla asfáltica. En cuanto a los materiales se le agregará RAP a 2%, 4%, 8%, 15%, 18%, y 23% de peso del total de la briqueta de 1200 g, el porcentaje de cemento asfáltico a usar será el encontrado en el anterior cálculo de 5.42%, para la mezcla convencional corresponderá 0% de RAP.

3.8.1 Porcentajes de agregados y porcentaje de RAP a usar

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

Tabla 3.59 Pesos de los agregados de la mezcla asfáltica convencional y modificada

Contenido óptimo C.A.(%)	5.42%	5.42%	5.42%	5.42%	5.42%	5.42%	5.42%
Porcentaje de RAP (%)	0.00%	2.00%	4.00%	8.00%	15.00%	18.00%	23.00%
Porcentaje Total Agregado (%)	94.58%	92.58%	90.58%	86.58%	79.58%	76.58%	71.58%
Peso de Cemento asfáltico (gr)	65.04	65.04	65.04	65.04	65.04	65.04	65.04
Peso RAP (gr)	0.00	24.00	48.00	96.00	180.00	216.00	276.00
Peso de grava (gr)	317.79	311.07	304.35	290.91	267.39	257.31	240.51
Peso de gravilla (gr)	249.69	244.41	239.13	228.57	210.09	202.17	188.97
Peso de arena (gr)	567.48	555.48	543.48	519.48	477.48	459.48	429.48
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.8.2 Ensayos de densidad, porcentaje de vacíos y relación betumen vacíos de la mezcla asfáltica convencional y modificada con RAP.

El procedimiento para encontrar la densidad % de vacíos es el mismo que se usó para el cálculo de una mezcla convencional con la única diferencia que en las siguientes tablas se trabajan con el contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla encontrada cuyo valor es de 5.42%.

Con las cantidades para la dosificación de la tabla 3.59. se elabora 3 briquetas para cada grupo, de análisis, el primer grupo corresponden a la mezcla convencional y los demás grupos corresponden a la mezcla modificada con RAP al 2%,4%,8%,15%,18% y 23%.

Tabla 3.60 Resultados de porcentaje de vacíos y relación betumen vacíos de la mezcla convencional y modificada

Porcentaje de RAP	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
(%)	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%
0	2.30	2.25	2.31	2.55	14.71	82.69
	2.23					
	2.23					
2	2.29	2.27	2.31	1.69	13.96	87.92
	2.27					
	2.26					
4	2.24	2.28	2.31	1.20	13.53	91.16
	2.34					
	2.27					
8	2.29	2.30	2.31	0.46	12.88	96.44
	2.33					
	2.29					
15	2.34	2.31	2.31	0.20	12.66	98.41
	2.29					
	2.29					
18	2.35	2.31	2.31	0.21	12.66	98.36
	2.28					
	2.29					
23	2.30	2.31	2.31	0.21	12.67	98.32
	2.28					
	2.34					

Fuente: Elaboración propia

3.8.3. Ensayos de estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica convencional y modificada con RAP.

El procedimiento para encontrar la estabilidad es el mismo que se usó para el cálculo de una mezcla convencional

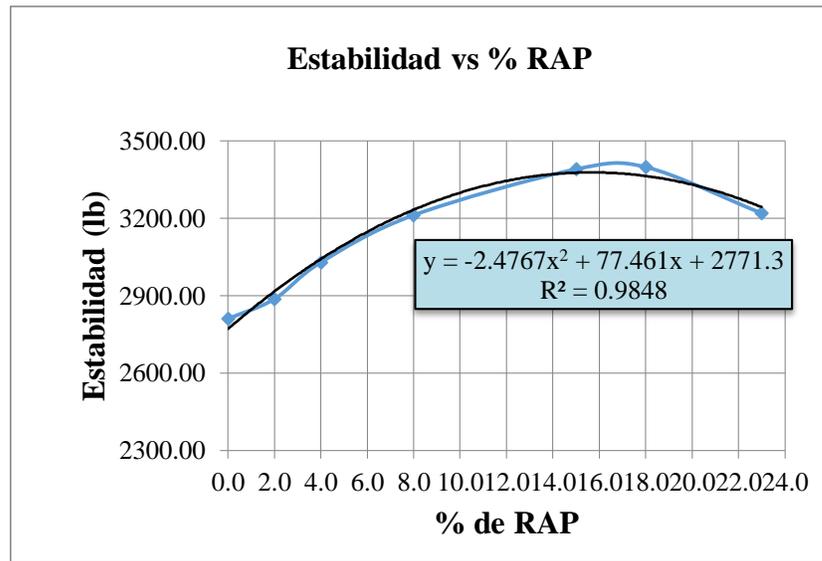
La mezcla asfáltica convencional y modificada está diseñada con el contenido óptimo de cemento asfáltico de 5.42%.

Tabla 3.61 Estabilidad y fluencia de la mezcla convencional y modificada con RAP

Porcentaje de RAP	Lectura del dial	Carga	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
(%)	mm	libras	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
0	1100	2943.86	2936.50	2810.28	12	10.00
	1140	3051.57	2855.35		10	
	1050	2809.22	2638.98		8	
2	1140	3051.57	2872.44	2886.8	9	10.67
	1200	3213.14	3000.43		12	
	1100	2943.86	2787.54		11	
4	1190	3186.21	3082.66	3028.61	10	11.00
	1110	2970.79	3154.98		13	
	1100	2943.86	2848.18		10	
8	1320	3536.27	3335.41	3211.46	13	11.67
	1460	3913.27	3776.30		12	
	1000	2674.58	2522.66		10	
15	1663	4459.91	4531.26	3389.37	12	12.67
	1069	2860.38	2796.02		11	
	1100	2943.86	2840.82		15	
18	1220	3266.99	3283.33	3397.74	12	13.33
	1302	3487.8	3409.33		12	
	1310	3509.35	3500.57		16	
23	1190	3186.21	3202.14	3218.87	15	15.00
	1180	3159.28	3088.20		16	
	1260	3374.71	3366.27		14	

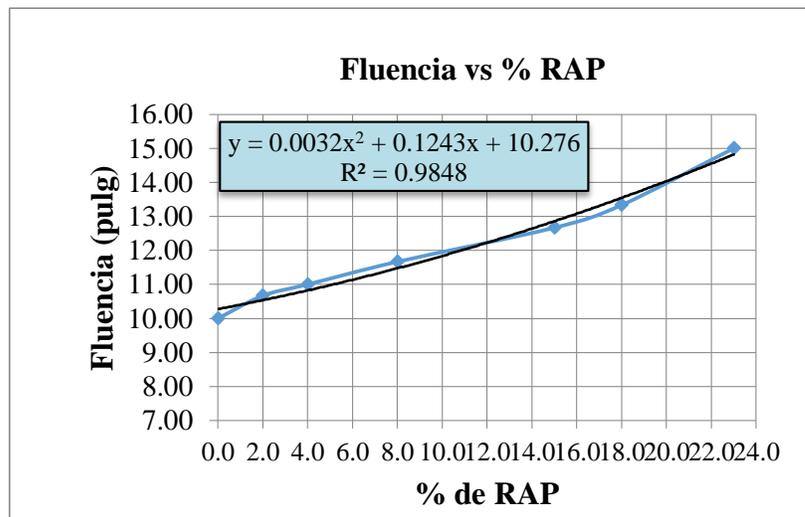
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.15 % de RAP vs estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.16 % de RAP vs fluencia



Fuente: Elaboración propia

3.8.4 Ensayos de estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica convencional y modificada con RAP con variaciones del PG.

El procedimiento para encontrar la estabilidad es el mismo que se usó para el cálculo de una mezcla convencional con la única diferencia que se hizo variar el grado de desempeño

En los cálculos de PG realizados anteriormente se obtuvieron PG 64 -10 eso me está queriendo decir que con ese PG de 64 – 10 voy a poder atender las condiciones climáticas de mi proyecto hasta 64 grados a la temperatura máxima del pavimento y hasta menos 10 a la temperatura mínima del pavimento.

Se escogió tres temperaturas de simulación 25 que es la promedio, 60°C y -4°C que son las extremas

La mezcla asfáltica convencional y modificada con RAP está diseñada con el contenido óptimo de cemento asfáltico de 5.42%.

Comportamiento de briquetas a – 4 °C

Para simular esa temperatura lo que se hizo fue sumergir las briquetas en agua con hielo

Imagen 3.62 Briquetas sumergidas en hielo



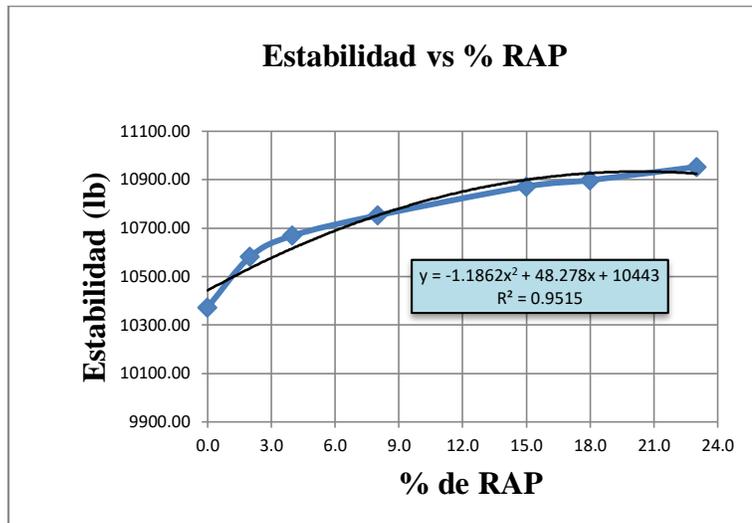
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.62 Estabilidad y fluencia de la mezcla convencional y modificada con RAP a –
4°C

Porcentaje de RAP	Estabilidad Marshall			Fluencia		
	Lectura del dial	Carga	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	mm	libras	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
0	3700	9945.14	8950.62	10372.7	12	10.67
	4402	11835.5	11207.02		10	
	4255	11439.6	10960.32		10	
2	4300	11560.8	10607.05	10581.4	9	11.00
	3800	10214.4	9882.45		13	
	4250	11426.2	11254.79		11	
4	4000	10753	10182.00	10669.3	10	11.33
	4300	11560.8	10773.53		13	
	4260	11453.1	11052.25		11	
8	4150	11156.9	10543.27	10753.1	14	12.00
	4400	11830.1	11024.47		12	
	4250	11426.2	10691.48		10	
15	4200	11291.5	10734.87	10872.1	13	13.00
	4250	11426.2	11083.39		11	
	4200	11291.5	10798.10		15	
18	4250	11426.2	10841.16	10898.5	11	13.33
	4100	11022.3	10540.59		13	
	4240	11399.3	11313.76		16	
23	4200	11291.5	11065.71	10953.3	15	15.00
	4000	10753	11097.07		16	
	4050	10887.6	10697.09		14	

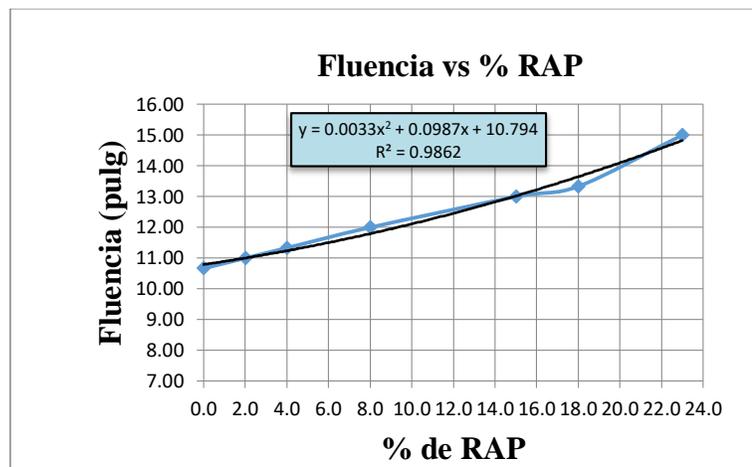
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.17 Contenido de RAP vs estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.18 Contenido de RAP vs Fluencia



Fuente: Elaboración propia

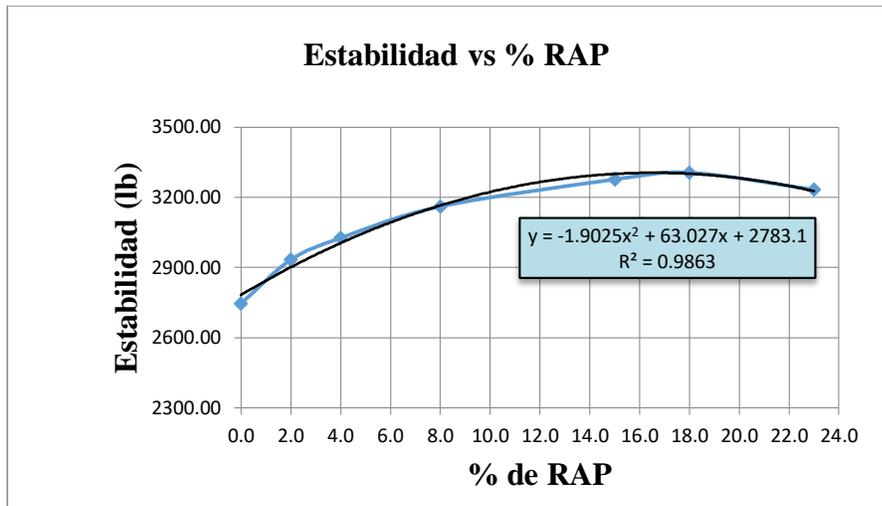
Comportamiento de briquetas a temperatura media 25 °C

Tabla 3.53. Estabilidad y fluencia de la mezcla convencional y modificada con RAP a 25°C

Porcentaje de RAP	Estabilidad Marshall				Fluencia	
	Lectura del dial	Carga	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
%	mm	libras	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
0	1050	2809.22	2528.30	2746.52	13	10.67
	1100	2943.86	2787.54		9	
	1140	3051.57	2923.71		10	
2	1200	3213.14	2948.05	2933.38	9	11.00
	1140	3051.57	2952.39		13	
	1100	2943.86	2899.70		11	
4	1190	3186.21	3082.66	3026.15	10	11.33
	1110	2970.79	3154.98		13	
	1100	2943.86	2840.82		11	
8	1000	2674.58	2527.48	3161.05	13	12.00
	1460	3913.27	3646.77		12	
	1320	3536.27	3308.89		11	
15	1663	4459.91	4240.03	3276.60	12	12.67
	1069	2860.38	2774.57		11	
	1100	2943.86	2815.21		15	
18	1220	3266.99	3099.72	3306.05	12	14.00
	1302	3487.80	3335.39		14	
	1310	3509.35	3483.03		16	
23	1260	3374.71	3307.21	3233.13	15	15.00
	1190	3186.21	3288.17		16	
	1180	3159.28	3104.00		14	

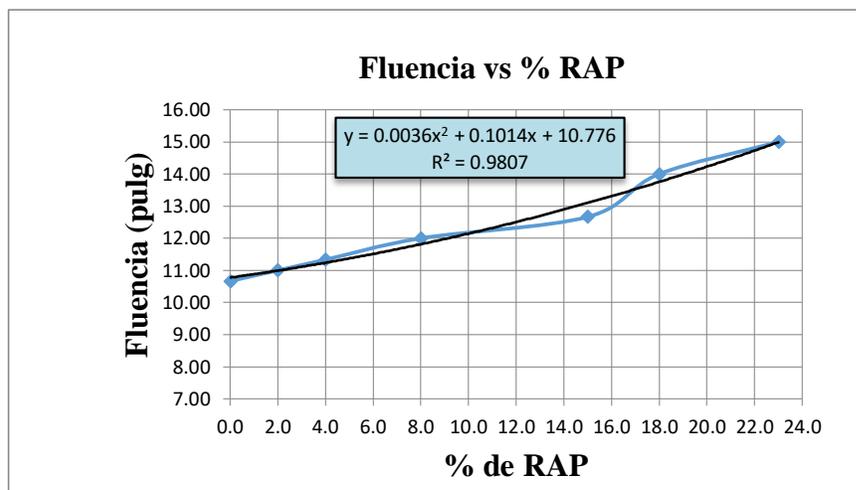
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.19 Contenido de RAP vs estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.20 Contenido de RAP vs Fluencia



Fuente: Elaboración propia

Comportamiento de briquetas a 60 °C

Para simular esa temperatura lo que se hizo fue colocar las briquetas en horno

Imagen 3.63 Horno que se utilizó para simular temperatura máxima



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.64 Briquetas colocadas en horno



Fuente: Elaboración propia

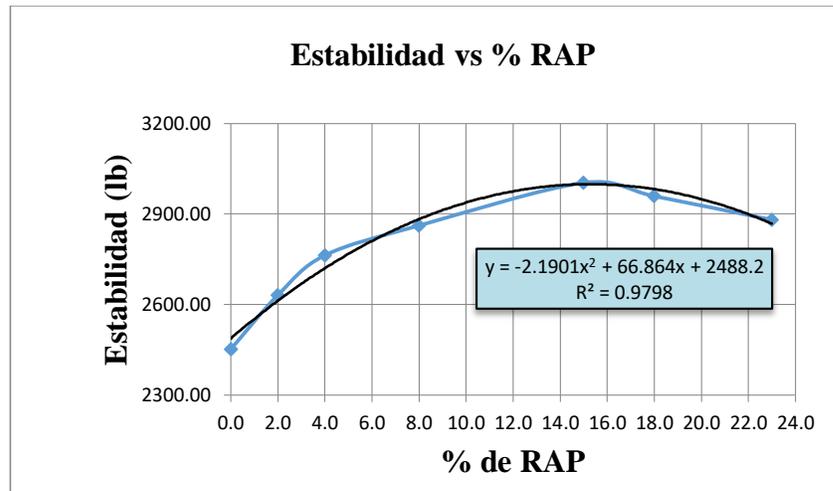
Tabla 3.64 Estabilidad y fluencia de la mezcla convencional y modificada con RAP a 60

°C

Porcentaje de RAP	Estabilidad Marshall				Fluencia	
	Lectura del dial	Carga	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
(%)	mm	libras	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
0	1100	2943.86	2649.47	2453.02	12	11.33
	950	2539.94	2405.07		12	
	900	2405.3	2304.52		10	
2	1268	3396.25	3116.06	2631.76	12	12.00
	830	2216.8	2144.76		13	
	1000	2674.58	2634.46		11	
4	1180	3159.28	2991.52	2763.3	10	12.33
	1100	2943.86	2743.38		16	
	990	2647.65	2554.98		11	
8	1250	3347.78	3163.65	2861.73	14	13.00
	1180	3159.28	2944.14		12	
	990	2647.65	2477.41		13	
15	1200	3213.14	3054.73	3003.31	16	14.00
	992	2653.04	2573.45		11	
	1320	3536.27	3381.74		15	
18	1200	3213.14	3048.63	2959.07	14	14.33
	1120	2997.71	2866.71		13	
	1115	2984.25	2961.87		16	
23	1100	2943.86	2884.98	2880.66	15	15.33
	990	2647.65	2732.38		16	
	1150	3078.5	3024.62		15	

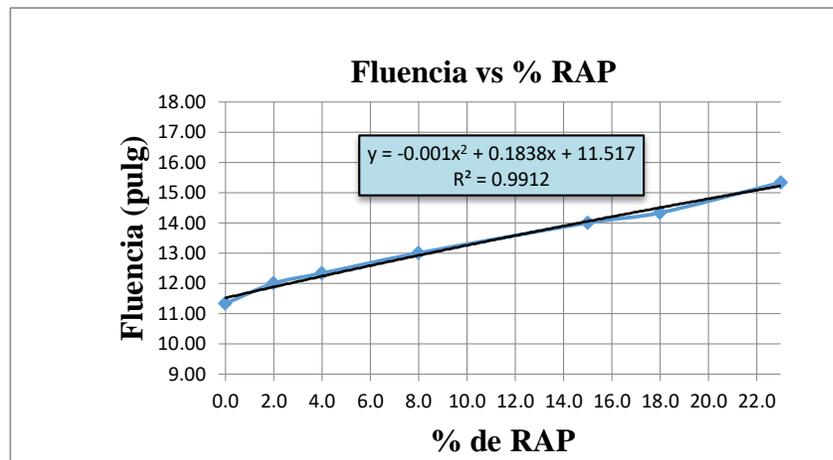
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.21 Contenido de RAP vs estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.22 Briquetas colocadas en horno



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.65 Estabilidad y fluencia máximas de la mezcla con RAP variando P-G

Temperatura	Estabilidad	Fluencia
60	3003.31	14
25	3306.05	14
-5	10953.28	15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.66 Estabilidad y fluencia máximas de la mezcla con RAP

% RAP	Estabilidad	Fluencia
15	3003.31	14
18	3306.05	14
23	10953.28	15

Fuente: Elaboración propia

3.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizará una comparación de una mezcla convencional con las mezclas modificadas con RAP cuyos porcentajes máximo de RAP fueron obtenidos por el método alemán (Homogeneidad).

Luego se comparan mezclas convencionales con mezclas modificadas con RAP con variaciones de su grado de desempeño PG.

Para luego comparar entre las mezclas modificadas con RAP cuyos porcentajes fueron obtenidos por el método alemán (Homogeneidad) versus mezclas con RAP a diferente grado de desempeño PG.

Comparación de una mezcla convencional con una modificada con RAP cuyo porcentaje máximo fue obtenido por método alemán

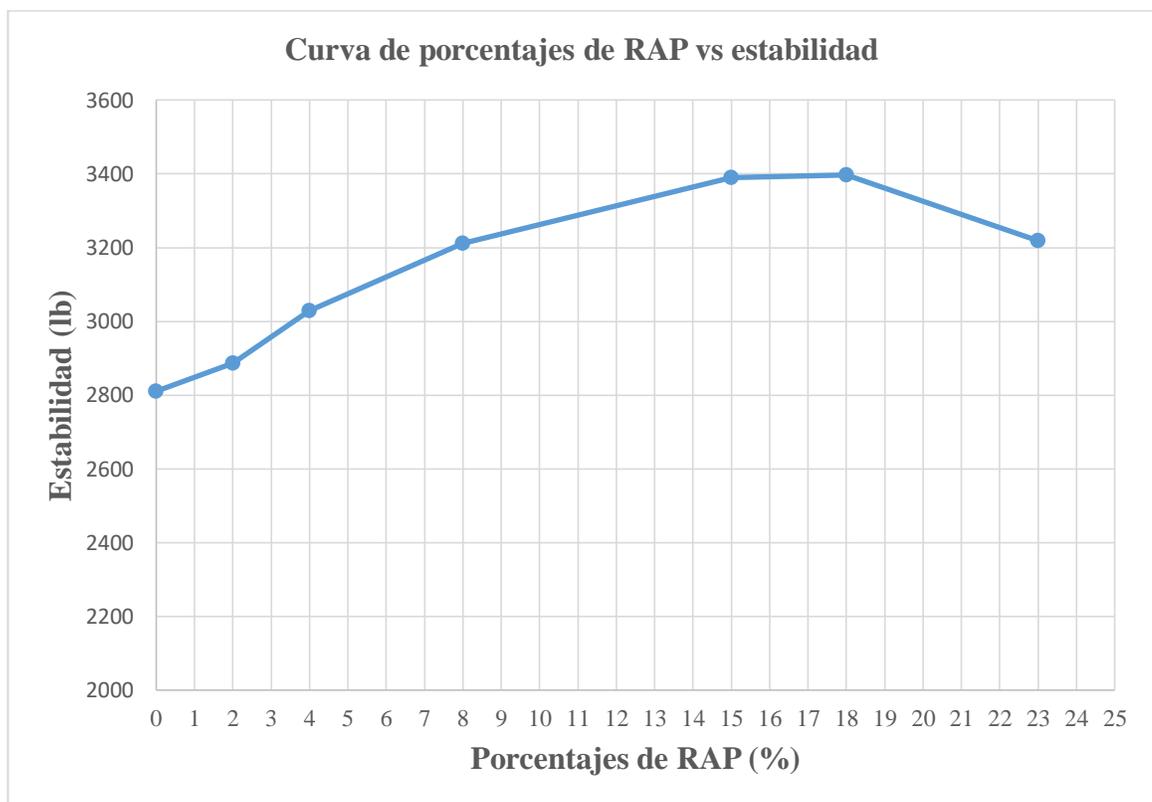
Tabla 3.67 Resultados de la mezcla asfáltica convencional y con RAP

Porcentaje de RAP	% de vacíos mezcla total	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
(%)	(%)	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
0	2.24	2810.28	12 10 8	10.00
2	1.70	2886.8	9 12 11	10.67
4	1.20	3028.61	10 13 10	11.00

8	0.46	3211.46	13 12 10	11.67
15	0.20	3389.37	12 11 15	12.67
18	0.21	3397.74	12 12 16	13.33
23	0.15	3218.87	15 16 14	15.00

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.23 Resultados de la mezcla asfáltica convencional y con RAP



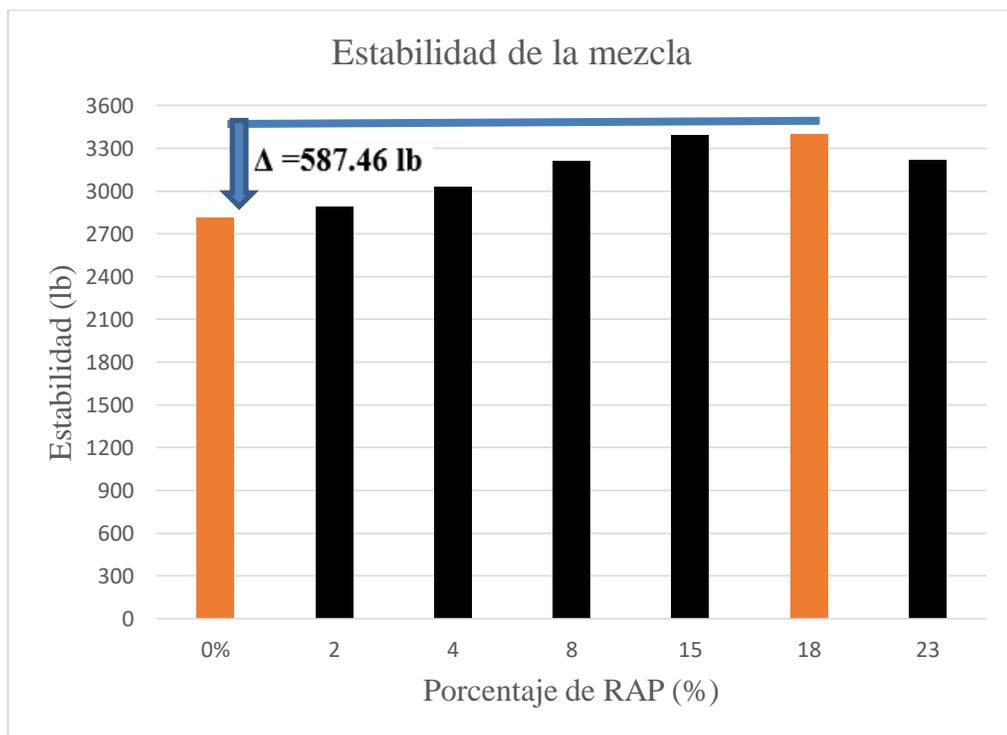
Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

En la curva de contenido de RAP versus estabilidad gráfico 3.23, se puede apreciar que se comporta de forma ascendente hasta un porcentaje de RAP de 18 %; se interpreta que a se contenido de RAP se alcanza la mayor estabilidad de la mezcla además de distinguir que entre el contenido de 15% y 18% se comporta de recta con una pendiente muy baja, pasado el 18% se tiene una curva de descenso pero aun así en el punto final, que corresponde al 23% de RAP, con una estabilidad superior a la que se tiene una mezcla convencional.

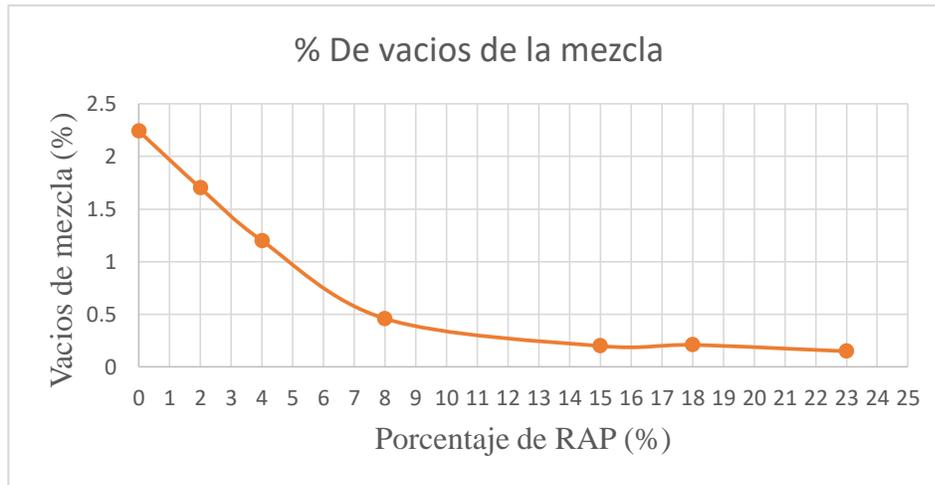
Esto se debe a la adición de RAP que mejora su estabilidad, por lo tanto, se puede obtener un pavimento de mejor calidad.

Gráfico 3.24 Histograma de estabilidad de la mezcla asfáltica convencional y modificada con RAP



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.25 Resultados de % de vacíos de la mezcla asfáltica convencional y con RAP



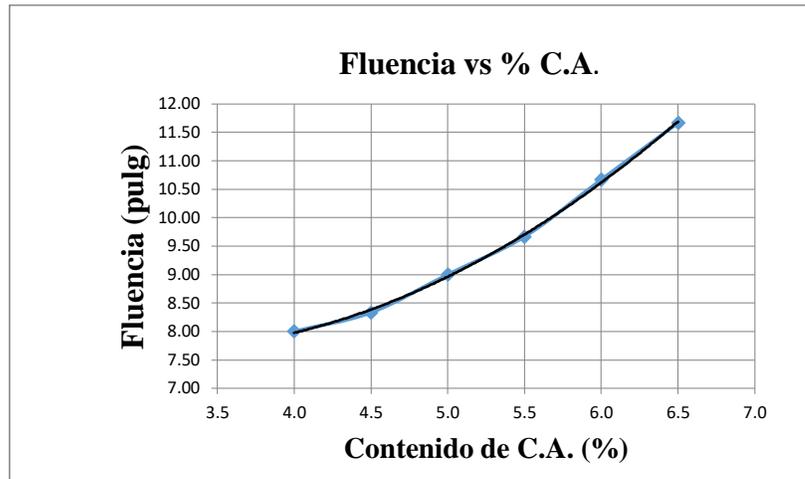
Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

En el gráfico 3.24 se muestra la diferencia entre la mezcla convencional con 0% de RAP y la mezcla modificada con 18 % de RAP el cual es un valor de 587.46 lb e indica que hay un aumento de estabilidad de 21 % en comparación con la mezcla convencional.

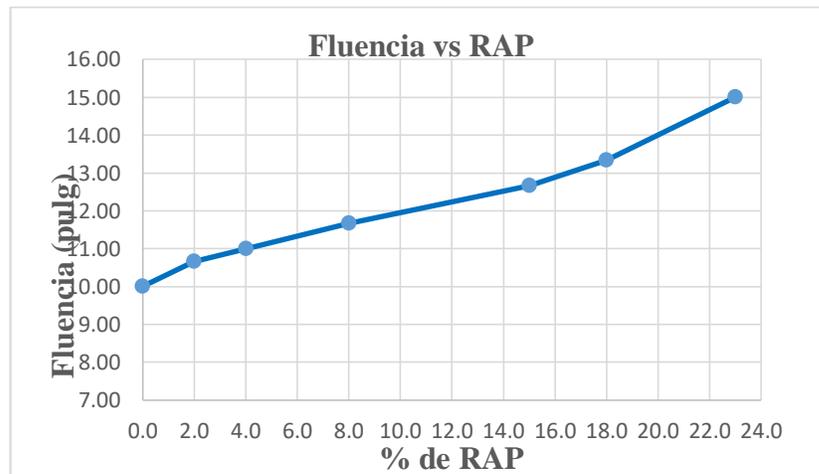
En la curva de contenido de RAP versus % de vacíos de la mezcla se puede apreciar que la curva se comporta de forma descendente, se interpreta que a medida que se van aumentando los porcentajes de RAP los porcentajes de vacíos en la mezcla van disminuyendo esto se debe a que el RAP va cubriendo los vacíos con el cemento asfáltico que tiene.

Gráfico 3.26 Resultados fluencia de la mezcla asfáltica convencional



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.27 Resultados fluencia de la mezcla asfáltica con RAP



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

En el gráfico 3.26 observar que para la mezcla asfáltica convencional la fluencia es directamente proporcional al porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla; es decir, mientras más contenido de cemento asfáltico haya en la mezcla más alto será el valor de la fluencia, por lo que para las mezclas asfálticas convencionales el valor de la fluencia más alto es de 11.67 centésimas de pulgada a un contenido de cemento asfáltico de 6.5 %,

mientras que para las mezclas asfálticas con RAP, de igual manera la fluencia es directamente proporcional al porcentaje de RAP en la mezcla, obteniendo el valor más alto para la mezcla con RAP de 15centésimas de pulgada a un contenido de RAP de 23%, esto se puede ver en la gráfica 3.27.

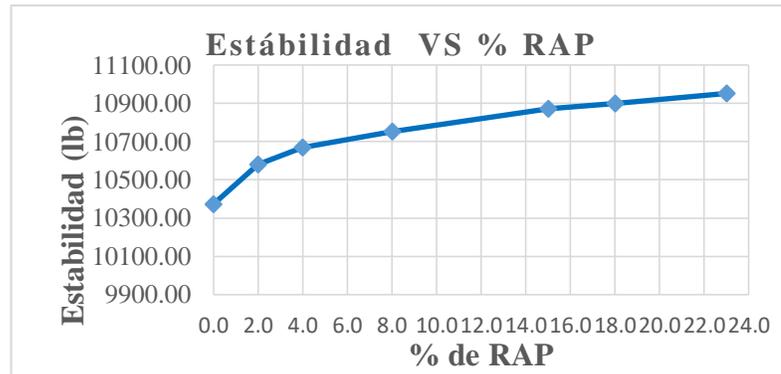
Análisis para la mezcla con RAP con variaciones de PG

Tabla 3.68 Estabilidad y fluencia de la mezcla convencional y modificada con RAP a –
4°C

Porcentaje de RAP	Lectura del dial	Carga	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
%	mm	libras	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
0	3700	9945.14	8950.62	10372.7	12	10.67
	4402	11835.5	11207.02		10	
	4255	11439.6	10960.32		10	
2	4300	11560.8	10607.05	10581.4	9	11.00
	3800	10214.4	9882.45		13	
	4250	11426.2	11254.79		11	
4	4000	10753	10182.00	10669.3	10	11.33
	4300	11560.8	10773.53		13	
	4260	11453.1	11052.25		11	
8	4150	11156.9	10543.27	10753.1	14	12.00
	4400	11830.1	11024.47		12	
	4250	11426.2	10691.48		10	
15	4200	11291.5	10734.87	10872.1	13	13.00
	4250	11426.2	11083.39		11	
	4200	11291.5	10798.10		15	
18	4250	11426.2	10841.16	10898.5	11	13.33
	4100	11022.3	10540.59		13	
	4240	11399.3	11313.76		16	
23	4200	11291.5	11065.71	10953.3	15	15.00
	4000	10753	11097.07		16	
	4050	10887.6	10697.09		14	

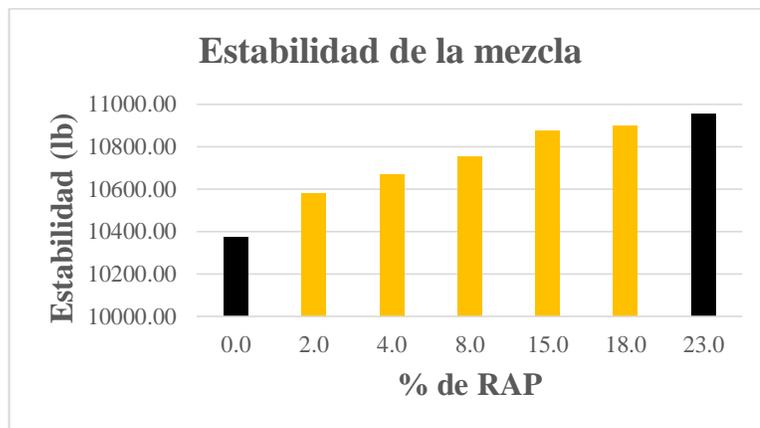
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.28 Resultados de la mezcla asfáltica convencional y con RAP



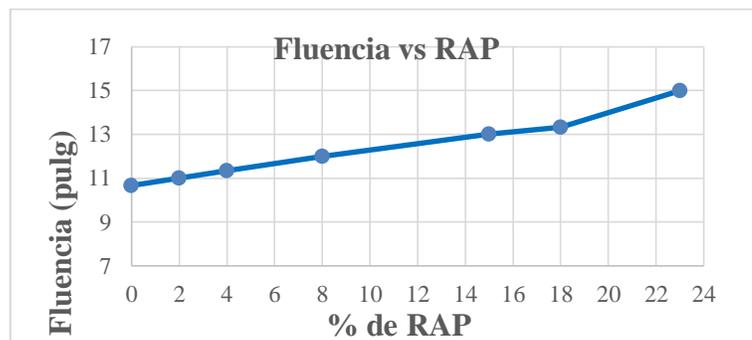
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.29 Histograma de la mezcla asfáltica convencional y con RAP



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.30 Fluencia de la mezcla asfáltica convencional y con RAP



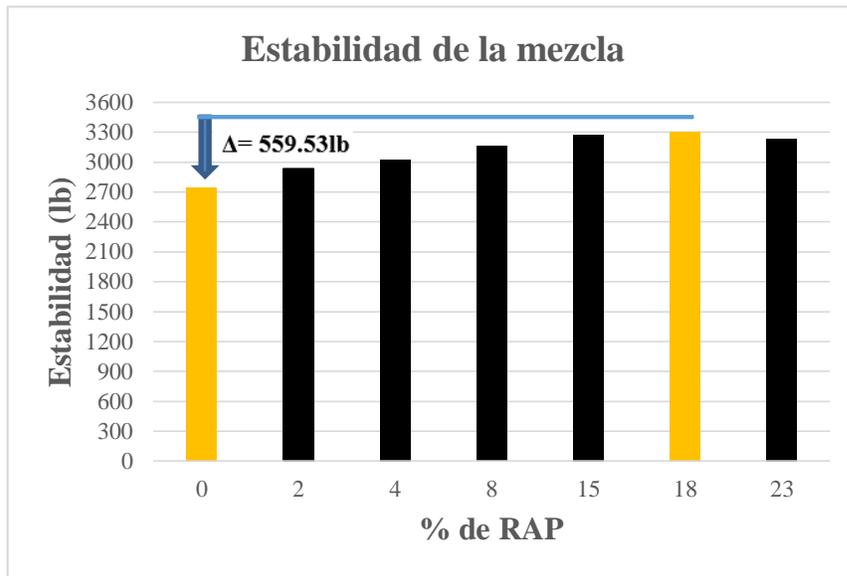
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.69 Estabilidad y fluencia de la mezcla convencional y modificada con RAP a 25°C

Porcentaje de RAP	Lectura del dial	Carga	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
%	mm	libras	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
0	1050	2809.22	2528.30	2746.52	13	10.67
	1100	2943.86	2787.54		9	
	1140	3051.57	2923.71		10	
2	1200	3213.14	2948.05	2933.38	9	11.00
	1140	3051.57	2952.39		13	
	1100	2943.86	2899.70		11	
4	1190	3186.21	3082.66	3026.15	10	11.33
	1110	2970.79	3154.98		13	
	1100	2943.86	2840.82		11	
8	1000	2674.58	2527.48	3161.05	13	12.00
	1460	3913.27	3646.77		12	
	1320	3536.27	3308.89		11	
15	1663	4459.91	4240.03	3276.60	12	13.33
	1069	2860.38	2774.57		13	
	1100	2943.86	2815.21		15	
18	1220	3266.99	3099.72	3306.05	12	14
	1302	3487.80	3335.39		14	
	1310	3509.35	3483.03		16	
23	1260	3374.71	3307.21	3233.13	15	15.00
	1190	3186.21	3288.17		16	
	1180	3159.28	3104.00		14	

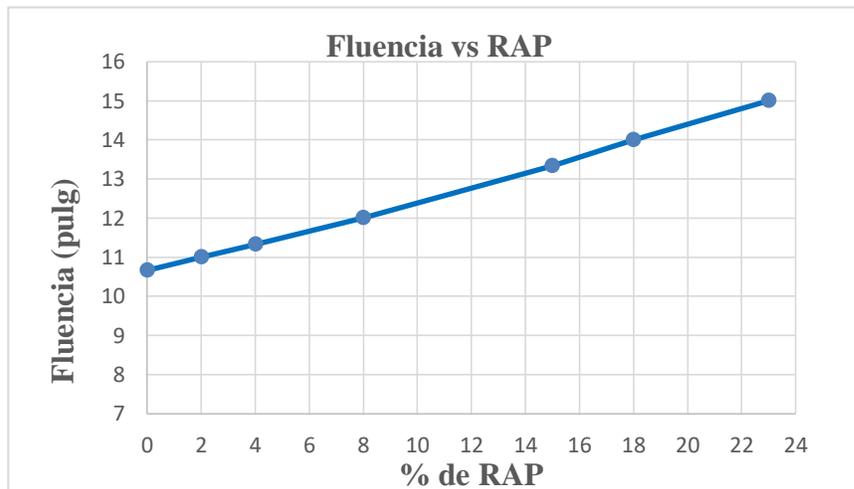
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.31 Histograma de la mezcla asfáltica convencional y con RAP



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.32 Fluencia de la mezcla asfáltica convencional y con RAP



Fuente: Elaboración propia

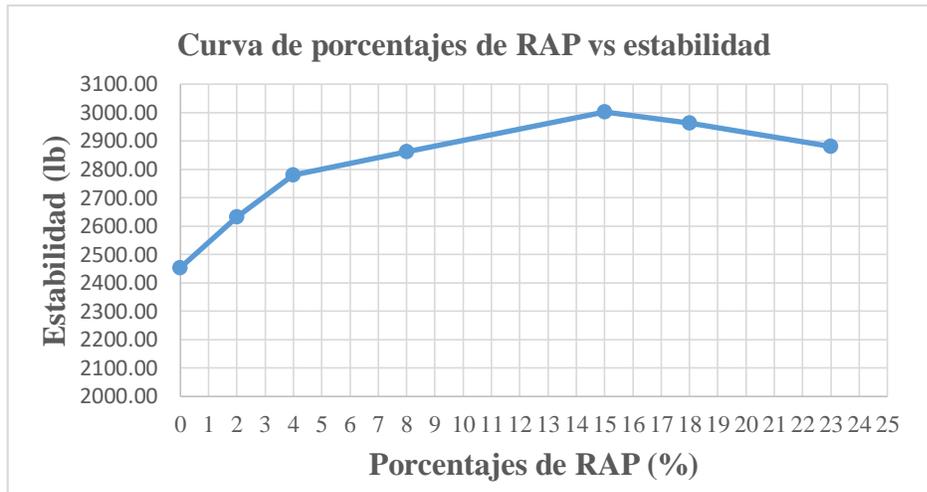
Tabla 3.70 Estabilidad y fluencia de la mezcla convencional y modificada con RAP a 60

°C

Porcentaje de RAP	Lectura del dial	Carga	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
(%)	mm	libras	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
0	1100	2943.86	2649.47	2453.02	12	11.33
	950	2539.94	2405.07		12	
	900	2405.3	2304.52		10	
2	1268	3396.25	3116.06	2631.76	12	12.00
	830	2216.8	2144.76		13	
	1000	2674.58	2634.46		11	
4	1180	3159.28	2991.52	2763.3	10	12.33
	1100	2943.86	2743.38		16	
	990	2647.65	2554.98		11	
8	1250	3347.78	3163.65	2861.73	14	13.00
	1180	3159.28	2944.14		12	
	990	2647.65	2477.41		13	
15	1200	3213.14	3054.73	3003.31	16	14.00
	992	2653.04	2573.45		11	
	1320	3536.27	3381.74		15	
18	1200	3213.14	3048.63	2959.07	14	14.33
	1120	2997.71	2866.71		13	
	1115	2984.25	2961.87		16	
23	1100	2943.86	2884.98	2880.66	15	15.33
	990	2647.65	2732.38		16	
	1150	3078.5	3024.62		15	

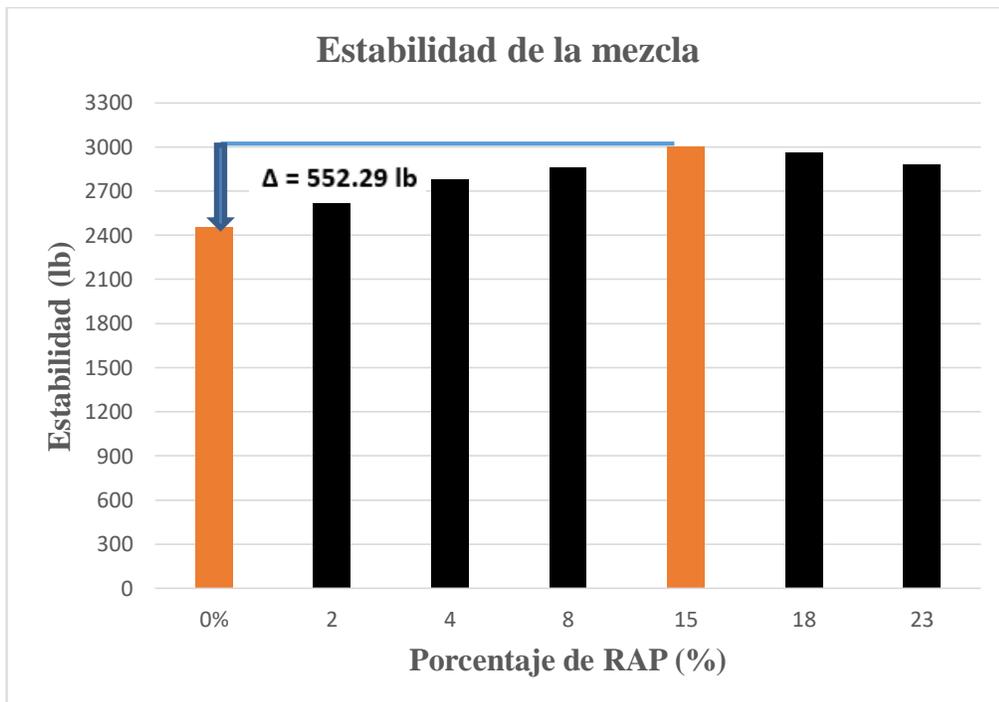
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.33 Resultados de la mezcla asfáltica convencional y con RAP



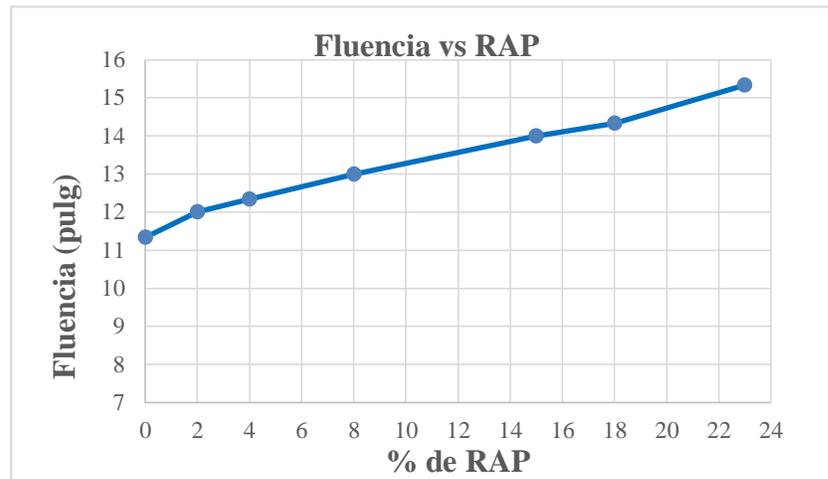
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.34 Histograma de estabilidad de la mezcla asfáltica convencional y modificada



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.35 Fluencia de la mezcla asfáltica convencional y con RAP



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

La temperatura es considerada uno de los agentes ambientales que influyen de manera directa en el comportamiento de los pavimentos, modificando su rigidez, debido a las características termoplásticas del material que constituye las capas asfálticas de los pavimentos flexibles. A medida que aumenta la temperatura, las capas del pavimento asfáltico se vuelven menos rígidas y cuando disminuye se incrementa la rigidez de estas capas.

Este efecto de temperatura se puede apreciar en el gráfico 3.28 contenido de RAP versus estabilidad (-4°C); se puede apreciar que se comporta de forma ascendente esto se debe a que a medida que la temperatura disminuyen las mezclas se vuelven más rígidas y mucho más aun cuando se le agrega RAP. No se puede tener un valor exacto de estabilidad puesto que la prensa Marshall que contamos en laboratorio no lectura más de 4000 mm en la lectura dial y se deja abierto a posteriores investigaciones realizar en equipos que lecturen valores más altos.

En el caso del gráfico 3.31 se puede observar el comportamiento que es parecido al de una mezcla convencional

Para el caso del gráfico 3.33 contenido de RAP versus estabilidad (60°C) se puede apreciar que se comporta de forma ascendente hasta un porcentaje de RAP de 15 %. A medida que los porcentajes de RAP aumentan los pavimentos se vuelven menos rígidos y mucho más a esta temperatura de 60 °C por lo que se podría decir que a elevadas temperaturas no es muy recomendable utilizar altas cantidades de RAP en este caso solo 15 % mientras en temperaturas templadas se puede utilizar 18 %

En el gráfico 3.34 se muestra la diferencia entre la mezcla convencional con 0% de RAP y la mezcla modificada con 15 % pero ensayadas a 60°C de RAP el cual es un valor de 552.29 lb e indica que hay un aumento de estabilidad de 23 % en comparación con la mezcla convencional.

Por tanto haciendo un análisis para una mezcla asfáltica convencional se tiene estabilidad 2810.28 lb y con porcentaje 18% de RAP se obtiene estabilidad de 3397.74 lb y variando el grado desempeño PG se obtiene 3003.31 lb a 15% RAP a la alta temperatura se podría decir que las mezclas con RAP no tienen buen desempeño en temperaturas cálidas, a la temperatura media se comporta como una mezcla convencional.

En cuanto a la fluencia en los gráficos 3.35 se puede observar que para la mezcla asfáltica con RAP la fluencia es directamente proporcional al porcentaje de RAP en la mezcla; es decir, mientras más contenido de RAP haya en la mezcla más alto será el valor de la fluencia.

3.10 ANÁLISIS DE PRECIOS DE PRODUCCION PARA DIFERENTE MEZCLA ASFÁLTICA

Es preciso tener en cuenta que el costo de producción es uno de los indicadores más importantes a considerar en los proyectos de ingeniería. Por lo tanto mientras más eficiente sea la labor de éstas, menos recursos se invertirán en su producción y, por consiguiente, menor será la cuantía de los gastos.

El costo de producción debe establecerse en un medidor del aprovechamiento de los recursos materiales, laborales y financieros en el proceso de producción, porque, además, conjuntamente los indicadores del volumen de realización, determina el nivel de ganancia que obtiene la organización.

En la investigación se realiza el costo de producción de la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica con RAP, para comparar y analizar los mismos.

3.10.1 Cálculo del Rendimiento de los materiales

Se considera un % de esponjamiento = 30% para los agregados y el asfalto.

Se determinara el rendimiento para 1 m³ de mezcla asfáltica para carpeta de rodadura.

a) Rendimiento de los materiales mezcla asfáltica convencional

Tabla 3.71 Dosificación de la mezcla asfáltica optima convencional

Observaciones	Materiales	%
Mezcla bituminosa total	Grava	26.5
	Gravilla	20.8
	Arena	47.3
	% Asfalto optimo	5.4
	Total	100

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Grava} = 26.5\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.344 \text{ m}^3$$

$$\text{Gravilla} = 20.8\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.270 \text{ m}^3$$

$$\text{Arena} = 47.3\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.615 \text{ m}^3$$

$$\text{Asfalto} = 5.4\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.070 \text{ m}^3$$

Peso específico del asfalto = 1004 kg/m^3

Peso del asfalto = $0.070 \text{ m}^3 * 1004 \text{ kg/m}^3 = 70.742\text{kg}$

b) Rendimiento de los materiales mezcla asfáltica con 18 % de RAP

Tabla 3.72 Dosificación de la mezcla asfáltica con 18% de RAP

Observaciones	Materiales	%
Mezcla bituminosa total	Grava	21.4
	Gravilla	16.9
	Arena	38.3
	RAP	18
	% Asfalto	5.4
	Total	100

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Grava} = 21.4\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.279 \text{ m}^3$$

$$\text{Gravilla} = 16.9\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.219 \text{ m}^3$$

$$\text{Arena} = 38.3\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.498 \text{ m}^3$$

$$\text{Asfalto} = 5.4\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.070 \text{ m}^3$$

Peso específico del asfalto = 1004 kg/m^3

Peso del asfalto = $0.070 \text{ m}^3 * 1004 \text{ kg/m}^3 = 70.742\text{kg}$

$$\text{RAP} = 18\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.234 \text{ m}^3$$

c) Rendimiento de los materiales mezcla asfáltica con 15 % de RAP

Tabla 3.73 Dosificación de la mezcla asfáltica con 15% de RAP

Observaciones	Materiales	%
Mezcla bituminosa total	Grava	22.3
	Gravilla	17.5
	Arena	39.8
	RAP	15
	% Asfalto	5.4
	Total	100

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Grava} = 22.3\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.290 \text{ m}^3$$

$$\text{Gravilla} = 17.5\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.228 \text{ m}^3$$

$$\text{Arena} = 39.8\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.517 \text{ m}^3$$

$$\text{Asfalto} = 5.4\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.070 \text{ m}^3$$

Peso específico del asfalto = 1004 kg/m³

Peso del asfalto = 0.070 m³ * 1004 kg/m³ = 70.742kg

$$\text{RAP} = 15\% * \frac{1.3 \text{ m}^3}{100\%} = 0.195 \text{ m}^3$$

Tabla 3.74 Planilla de precios unitarios para la mezcla convencional

Análisis de Precios Unitarios					
Datos Generales					
Proyecto :		Carpeta de concreto asfáltico (mezcla convencional)			
Actividad :		Colocado de carpeta			
Cantidad :		1			
Unidad :		m3			
Moneda :		Bs			
1. Materiales					
Descripción		Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Grava triturada (26.5%)	m ³	0.34	150.00	51.60
2	Gravilla triturada (20.8%)	m ³	0.27	150.00	40.50
3	Arena clasificada (47.3%)	m ³	0.62	145.00	89.18
4	Cemento asfáltico convencional 85 -100	kg	70.74	10.50	742.79
5	Diésel	lt	18.00	3.74	67.32
6	Asfalto Diluido= (ASF. 52%+ Kerosen 48%)	lt	8.66	10.60	91.80
Total materiales					1083.182
2. Mano de Obra					
Descripción		Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Peón	hr	0.03	12.07	0.36
2	Capataz	hr	1.8	22.6	40.68
3	Operador de camión imprimador	hr	0.012	23.28	0.28
4	Chofer de la volqueta 12 m3	hr	0.03	15.37	0.46
5	Operador de planta de asfalto	hr	0.09	23.28	2.10
6	Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0.028	15.14	0.42
7	Operador compactador rodillo liso	hr	0.35	20	7.00

8	Operador compactador neumático	hr	0.82	23.28	19.09
9	Operador terminadora de asfalto	hr	0.82	18.3	15.01
10	Operador cargador frontal	hr	0.001	18	0.02
Sub total mano de obra					85.42
Cargas sociales = (60% del sub. total de mano de obra)					51.25
Impuestos IVA mano de obra = (14.94% de suma de sub total de mano de obra + cargas sociales)					20.42
Total de la mano de obra					157.08
3. Equipo Maquinaria y Herramientas					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Compactador rodillo liso	hr	0.035	304.66	10.6631
2	Distribuidor de agregados autop	hr	0.028	455.03	12.74084
3	Escoba mecánica autop	hr	0.028	71.55	2.0034
4	Planta calentamiento de asfalto	hr	0.01	965.23	9.6523
5	Compactador rodillo neumático tsp 10000	hr	0.084	332.33	27.91572
6	Terminadora de asfalto	hr	0.075	683.06	51.2295
7	Cargador frontal de ruedas >= 950 m3	hr	0.0001	421.29	0.042129
8	Volqueta >= 12m3	hr	0.03	227.87	6.8361
9	Camión imprimador 6000 lt.	hr	0.008	414.41	3.31528
					124.40
Herramientas =(5% del total de mano de obra)					7.85
Total equipo , maquinaria y herramientas					132.25
4 Gastos Generales y Administrativos					
					COSTO TOTAL
Gastos generales = 10% de 1+2+3					137.25
Total de gastos generales y administrativos					137.25
5 Utilidad					
					COSTO TOTAL
Utilidad = 10% de 1+2+3+4					150.98
Total de utilidad					150.98
6 Impuestos					
					COSTO TOTAL
Impuestos IT = 3.09% de 1+2+3+4+5					51.32
Total de impuestos					51.32
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6)					1712.06
Total precio unitario adoptado (con dos (2) decimales)					1712.06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.75 Planilla de precios unitarios de la M.A. con 18% de RAP

Análisis de Precios Unitarios					
Datos generales					
Proyecto :		Carpeta de concreto asfáltico (mezcla con RAP)			
Actividad :		Colocado de carpeta			
Cantidad :		1			
Unidad :		m3			
Moneda :		Bs			
1. Materiales					
Descripción		Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Grava triturada (21.4%)	m ³	0.28	150.00	41.85
2	Gravilla triturada (16.9%)	m ³	0.22	150.00	32.85
3	Arena clasificada (38.3%)	m ³	0.50	145.00	72.21
4	Cemento asfáltico convencional 85 - 100	kg	70.74	10.50	742.79
5	Diésel	lt	18.00	3.74	67.32
6	Asfalto Diluido=(ASF. 52%+ KEROSEN 48%)	lt	8.66	10.60	91.80
Total materiales					1048.817
2 . Mano de obra					
Descripción		Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Peón	hr	0.03	12.07	0.36
2	Capataz	hr	1.8	22.6	40.68
3	Operador de camión imprimador	hr	0.012	23.28	0.28
4	Chofer de la volqueta 12 m3	hr	0.03	15.37	0.46
5	Operador de planta de asfalto	hr	0.09	23.28	2.10
6	Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0.028	15.14	0.42
7	Operador compactador rodillo liso	hr	0.35	20	7.00
8	Operador compactador neumático	hr	0.82	23.28	19.09
9	Operador terminadora de asfalto	hr	0.82	18.3	15.01
10	Operador cargador frontal	hr	0.001	18	0.02
Sub total mano de obra					85.42
Cargas sociales =(60% del sub. total de mano de obra)					51.25
Impuestos IVA mano de obra = (14.94% de suma de sub total de mano de obra + cargas sociales)					20.42
Total de la mano de obra					157.08

3. Equipo Maquinaria y Herramientas					
Descripción		Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Compactador rodillo liso	hr	0.035	304.66	10.6631
2	Distribuidor de agregados autop	hr	0.028	455.03	12.74084
3	Escoba mecánica autop	hr	0.028	71.55	2.0034
4	Planta calentamiento de asfalto	hr	0.01	965.23	9.6523
5	Compactador rodillo neumático tsp 10000	hr	0.084	332.33	27.91572
6	Terminadora de asfalto	hr	0.075	683.06	51.2295
7	Cargador frontal de ruedas >= 950 m3	hr	0.0001	421.29	0.042129
8	Volqueta >= 12m3	hr	0.03	227.87	6.8361
9	Camión imprimador 6000 lt.	hr	0.008	414.41	3.31528
					124.40
Herramientas =(5% del total de mano de obra)					7.85
Total equipo , maquinaria y herramientas					132.25
4 Gastos Generales y Administrativos					
					Costo total
Gastos generales = 10% de 1+2+3					133.82
Total de gastos generales y administrativos					133.82
5 Utilidad					
					Costo total
Utilidad = 10% de 1+2+3+4					147.20
Total de utilidad					147.20
6 Impuestos					
					Costo total
Impuestos IT = 3.09% de 1+2+3+4+5					50.03
Total de impuestos					50.03
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6)					1669.20
Total precio unitario adoptado (con dos (2) decimales)					1669.20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.76 Planilla de precios unitarios de la M.A. con 15% de RAP

Análisis de Precios Unitarios					
Datos Generales					
Proyecto :		Carpeta de concreto asfáltico (mezcla con RAP)			
Actividad :		Colocado de carpeta			
Cantidad :		1			
Unidad :		m3			
Moneda :		Bs			
1. Materiales					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Grava triturada (22.3%)	m ³	0.29	150.00	43.50
2	Gravilla triturada (17.5%)	m ³	0.23	150.00	34.20
3	Arena clasificada (39.8%)	m ³	0.52	145.00	74.97
4	Cemento asfáltico convencional 85 -100	kg	70.74	10.50	742.79
5	Diésel	lt	18.00	3.74	67.32
6	Asfalto Diluido=(ASF. 52%+ KEROSEN 48%)	lt	8.66	10.60	91.80
Total materiales					1054.572
2 . Mano de obra					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Peón	hr	0.03	12.07	0.36
2	Capataz	hr	1.8	22.6	40.68
3	Operador de camión imprimador	hr	0.012	23.28	0.28
4	Chofer de la volqueta 12 m3	hr	0.03	15.37	0.46
5	Operador de planta de asfalto	hr	0.09	23.28	2.10
6	Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0.028	15.14	0.42
7	Operador compactador rodillo liso	hr	0.35	20	7.00
8	Operador compactador neumático	hr	0.82	23.28	19.09
9	Operador terminadora de asfalto	hr	0.82	18.3	15.01
10	Operador cargador frontal	hr	0.001	18	0.02
Sub total mano de obra					85.42
Cargas sociales =(60% del sub. total de mano de obra)					51.25
Impuestos IVA mano de obra = (14.94% de suma de sub total de mano de obra + cargas sociales)					20.42
Total de la mano de obra					157.08

3. Equipo Maquinaria y Herramientas					
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo total
1	Compactador rodillo liso	hr	0.035	304.66	10.6631
2	Distribuidor de agregados autop	hr	0.028	455.03	12.74084
3	Escoba mecánica autop	hr	0.028	71.55	2.0034
4	Planta calentamiento de asfalto	hr	0.01	965.23	9.6523
5	Compactador rodillo neumático tsp 10000	hr	0.084	332.33	27.91572
6	Terminadora de asfalto	hr	0.075	683.06	51.2295
7	Cargador frontal de ruedas >= 950 m3	hr	0.0001	421.29	0.042129
8	Volqueta >= 12m3	hr	0.03	227.87	6.8361
9	Camión imprimador 6000 lt.	hr	0.008	414.41	3.31528
					124.40
Herramientas =(5% del total de mano de obra)					7.85
Total equipo , maquinaria y herramientas					132.25
4 Gastos Generales y Administrativos					
					Costo total
Gastos generales = 10% de 1+2+3					134.39
Total de gastos generales y administrativos					134.39
5 Utilidad					
					Costo total
Utilidad = 10% de 1+2+3+4					147.83
Total de utilidad					147.83
6 Impuestos					
					Costo total
Impuestos IT = 3.09% de 1+2+3+4+5					50.25
Total de impuestos					50.25
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6)					1676.37
Total precio unitario adoptado (con dos (2) decimales)					1676.37

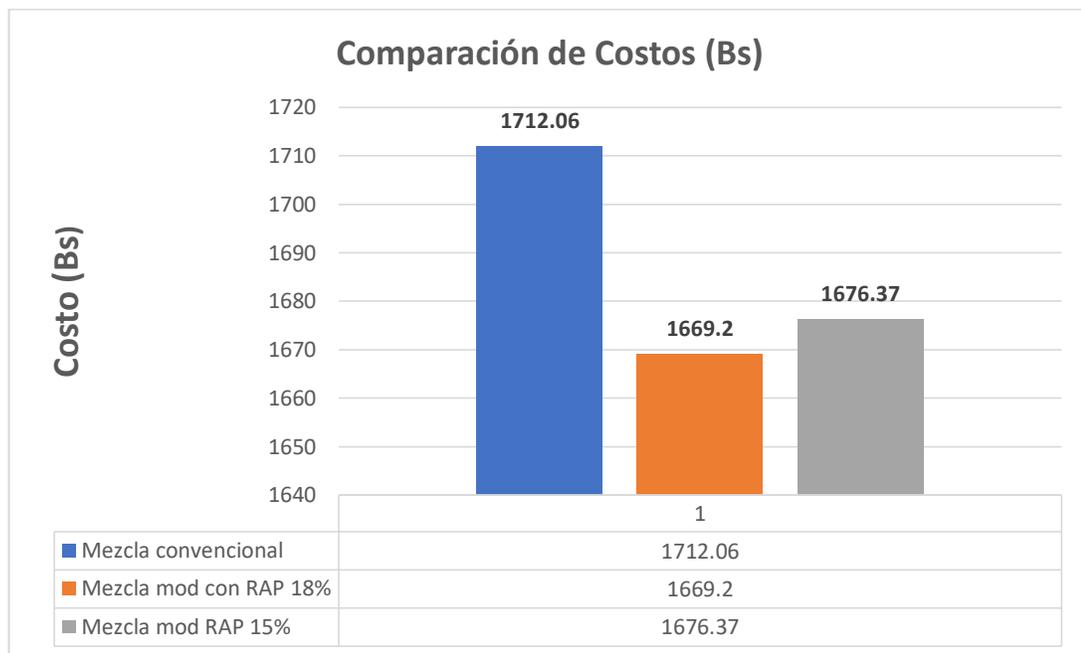
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.77 Comparación de costos de las mezclas

Costo por metro cubico (Bs)			
Descripción	Costo en (Bs)	Diferencia (Bs)	Diferencia (%)
Mezcla asfáltica convencional	1712.06	42.86	2.5
Mezcla asfáltica con 18 % de RAP	1669.20		
Mezcla asfáltica convencional	1712.06	35.69	2.1
Mezcla asfáltica con 15 % de RAP	1676.37		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.36 Diagrama de costos de las tres mezclas



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 3.36 y tabla 3.77 se puede observar los costos para la producción de la mezcla asfáltica con RAP es más económica que la convencional con 42.86 Bs por metro cúbico, en grandes volúmenes significa una optimización económica para su construcción.

Por ejemplo a continuación se muestra el cálculo del volumen de mezcla asfáltica por metro cúbico para una carretera primaria con un tránsito inicial anual esperado de 10×10^6 ESALs, con una capa de rodadura de 10 cm de espesor bidireccional con un ancho de carril de 3.65 m para analizar mejor la diferencia de costos.

1) Determinación del volumen de mezcla asfáltica por metro cúbico

Vol. De mezcla asfáltica para 1 m de carretera = $2 \times 3.65 \times 1 \times 0.10 \text{ m} = 0.73 \text{ m}^3$

Considerando una pérdida por esponjamiento de 30%

$$\text{Vol.} = 0.73 \text{ m}^3 \cdot 1.3 = 0.95 \frac{\text{m}^3}{\text{m}}$$

$$\text{Vol. Por 1 km} = 0.95 \frac{\text{m}^3}{\text{m}} * 1000 \frac{\text{m}}{\text{km}} = 950 \frac{\text{m}^3}{\text{km}}$$

2) Análisis de costos

Para obtener mejor la comparación económica entre la M.A convencional y la M.A con RAP, se analiza la comparación de costos por kilómetro.

Tabla 3.78 Comparación de costos de las M.A para un km de pavimento

Costo para 1 km de carretera (Bs)				
Descripción	Costo por m ³	Vol.(m ³) por KM	Total (Bs)	Diferencia (Bs)
Mezcla asfáltica convencional	1712.06	950	1626457.00	40717.00
Mezcla asfáltica con 18 % de RAP	1669.20		1585740.00	
Mezcla asfáltica convencional	1712.06	950	1626457.00	33905.5
Mezcla asfáltica con 15 % de RAP	1676.37		1592551.50	

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la tabla 3.78 que se ahorra con la mezcla con 18 % de RAP 40717.00 Bs, por km de carretera y con 15 % de RAP 33905.50 Bs, factor de mucha importancia ya que se obtiene un mejor pavimento a menor costo, que es lo que se busca en todo estudio al adicionar nuevos materiales.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Se realizó la caracterización de los agregados y cemento asfáltico dando como conclusión que el agregado y el cemento asfáltico cumplen con las especificaciones técnicas.
- Se realizó la dosificación y compactación de las briquetas para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico cuyo valor es 5.42%, para una mezcla convencional y también fue el que se usó en la mezcla modificada.
- Con el método Alemán Homogeneidad se determinó la máxima cantidad posible de adición de RAP en nuevas mezclas asfálticas que al realizar dicho método nos dio 23%.
- Se elaboraron briquetas de mezcla asfáltica convencional, que se sometieron a ensayos Marshall para determinar sus propiedades físicas y mecánicas con los siguientes resultados de estabilidad de 2757.91 libras (1250.97 kg) para un contenido óptimo de cemento asfáltico de 5.42 % y se realizó el mismo procedimiento con briquetas agregando porcentajes (0%, 2%, 4%, 8%, 15%, 18%, y 23%) de RAP a las mezclas asfálticas.
- En el ensayo de Marshall se comprobó que se mejora la calidad de la mezcla asfáltica alcanzando un valor máximo de 3397.74 lb de estabilidad, siendo éste el óptimo a 18% de RAP en la mezcla.
- Para la variable fluencia en las mezclas asfálticas en cada uno de los diseños se incrementa de forma lineal cada vez que se va incorporando porcentajes de RAP.
- Luego de realizar una revisión bibliográfica del método SUPERPAVE en la selección del grado de desempeño del cemento asfáltico de trabajos realizados en otros países, nos ayudó a aplicar la metodología de diseño en nuestra investigación.
- Se aplicó el modelo SHRP del método SUPERPAVE en la conversión de las estaciones meteorológicas a temperaturas del pavimento las cuales están en función a la latitud, y las temperaturas extremas de la zona. Determinando el grado

de desempeño de 64 - 10 para las estaciones meteorológica seleccionadas en nuestra investigación.

- Se elaboró mezclas asfálticas Marshall utilizando el cemento asfáltico por penetración 85-100 el cual equivale a un cemento asfáltico por grado de desempeño de PG 58-16 para luego proceder a romper las probetas elaboradas a diferentes porcentajes de RAP en la prensa Marshall tanto a la máxima como a la mínima temperatura de grado de desempeño.
- En el ensayo de Marshall se comprobó que las mezclas asfálticas con RAP simuladas a temperaturas extremas tanto a las altas como a las bajas no tienen muy buen desempeño.
- En análisis de costo se verifica que existe un ahorro económico del 42.86 Bs por metro cúbico con respecto a una mezcla convencional utilizando un 18% de RAP, en grandes volúmenes significa una optimización económica para la construcción por ejemplo, para un kilómetro de pavimento se ahorraría 40717.00 Bs, utilizando 15% de RAP para un kilómetro se ahorraría 33905.50 Bs, como también la reducción de residuos tóxicos y de volúmenes de carpetas asfálticas deterioradas, lo cual conlleva a una menor contaminación ambiental y así menor explotación de los bancos de áridos
- Haciendo una comparación entre ambos métodos es que el método Alemán (Homogeneidad) en el tema de adicción de RAP en capas de rodadura lo máximo que se puede agregar a la nueva mezcla es 40% pero siempre y cuando el RAP sea de buena calidad y el asfalto recuperado cumpla con las normas DIN para utilizar en porcentajes altos, mientras tanto que en el método Americano (PG – GRADE) no hay esa restricción de porcentaje máximo a utilizar pero eso si se debe cumplir lo que dice el apéndice de AASTHO M323 que consiste en determinar el grado PG del aglutinante asfáltico y saber la cantidad de ese reciclado que se puede juntar a la nueva mezcla, respetando el grado PG especificado para la nueva mezcla, los métodos europeos y estadounidenses para utilizar porcentajes altos de RAP arriba del 25% los dos se basan en procedimientos de pruebas muy elaborados que requieren equipos muy caros y sofisticados y mucho tiempo de laboratorio pero

con la ventaja de una gran reducción en los costos posteriores de materiales, emisiones CO₂ y mayor beneficio a largo plazo.

- Se podría concluir diciendo que el método alemán Homogeneidad es una metodología muy buena para el tema de reciclaje; mediante esta metodología se puede saber de manera más exacta los porcentajes máximos a reciclar tanto en capas bases, capas sub bases, capas binder y capas de rodadura que para este último se aplicó.

4.2 RECOMENDACIONES

- En la elaboración de mezclas asfálticas y caracterización del cemento asfáltico tener cuidado en no sobrecalentar varias veces el cemento asfáltico debido a que éste perderá sus propiedades.
- Cuidar la temperatura y realizar una mezcla homogénea para evitar que se quemé el asfalto y pierda sus propiedades físicas y mecánicas.
- Tener mucho cuidado en la ruptura por Marshall para evitar lecturas erróneas.
- Es necesario tener mucho cuidado al utilizar los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos; además de la sensibilidad de los mismos.
- También es importante considerar que al utilizar el martillo Marshall manualmente hacerlo con cuidado con los golpes ya que al no hacerse a la misma intensidad pueden variar los resultados.
- Realizar el mezclado de los agregados con el cemento asfáltico y el RAP de la manera más homogénea posible para evitar la variabilidad de los resultados de la mezcla en los distintos ensayos que se realicen.
- Que el SENAMI Y AASANA u otras instituciones lleven registros de las estaciones meteorológicas con la información diaria que permita en un futuro una determinación más exacta del grado de desempeño del asfalto PG.
- Se recomienda ser muy cuidadosos al momento de trabajar con mezclas asfálticas, ya que se trabaja a altas temperaturas, se debe utilizar el equipo de seguridad necesario para la manipulación de los materiales.

- Que en nuestro medio se clasifique el cemento asfáltico por grado de desempeño para dar así el primer pasó en nuestro departamento y en nuestro país hacia la implementación el método SUPERPAVE.
- Se recomienda profundizar el estudio de la investigación más a detalle sobre el comportamiento de las propiedades de la mezcla asfáltica utilizando RAP, ya que está técnica del utilizado de RAP para la producción de nuevas mezclas asfálticas aún no es aplicado en nuestro departamento ni país, lo cual debe ser factible y sobre todo con el fin de proteger el medio ambiente.
- La reutilización del RAP y las leyes circulares de residuos utilizadas en Alemania deberían ser implementadas en nuestro país Bolivia con el objetivo de proteger los recursos naturales y el medio ambiente.