

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Durante los últimos años, se ha tomado conciencia sobre la importancia de alargar el ciclo de vida de los materiales que forman las carpetas asfálticas.

La producción de nuevas mezclas asfálticas, requiere la explotación de nuevas canteras o la sobreexplotación de las existentes, así como el consumo de grandes cantidades de betún, lo que supone un enorme y negativo impacto ambiental. Por otra parte, cada día es más común la remoción de carpetas deterioradas para una reposición con nuevas mezclas, esta técnica da lugar a la generación de materiales con un alto potencial de reutilización de los áridos y ligantes contenidos en ellos, pero que en muchos casos son llevados a vertederos con el problema de impacto ambiental que esto supone. Parece claro, que desde el punto de vista ambiental y de aprovechamiento de materiales, las técnicas de reciclado son altamente interesantes y beneficiosas.

Se entiende por “Reciclado de carpetas Asfálticas” al proceso mediante el cual los materiales recuperados de carpetas asfálticas deteriorados, son mezclados con árido virgen, betún nuevo y/o agentes rejuvenecedores, en las proporciones adecuadas, para producir nuevas mezclas en caliente, que es colocada y compactada en obra como si se tratara de una mezcla convencional.

Estas mezclas deben cumplir con los requerimientos de calidad, resistencia y durabilidad exigidos para el tipo de vía en el que serán utilizados según especificaciones técnicas, la utilización de mezclas recicladas está enfocada a la rehabilitación de carpetas existentes, sin embargo, pueden formar parte de la construcción de nuevas carpetas asfálticas, sin que esto signifique un problema de calidad, resistencia o durabilidad.

El autor propone evaluar una mezcla reciclada para rehabilitación de vías urbanas, acorde a las posibilidades de nuestra ciudad, de tal manera se pueda determinar la funcionalidad de las nuevas mezclas; para ello se trabajará en apego a las especificaciones técnicas de carreteras de Bolivia.

## **1.2 SITUACIÓN PROBLÉMICA**

El reciclaje implica dar una nueva vida al material en cuestión, aplicando un proceso sobre el mismo para que pueda volver a utilizarse. El reciclado es una técnica que se va difundiendo en la actualidad a fin de minimizar las afectaciones al medio ambiente, provocadas por los componentes de los residuos de los pavimentos viejos.

Los materiales eliminados de las carpetas asfálticas viejas no son empleados en la construcción convencional, estos son desechados en lugares no adecuados provocando una grave contaminación, no se aplican en estado reciclado por desconocimiento de sus propiedades activas y aparentar poca competitividad con los materiales vírgenes extraídas de las canteras y productos asfálticos de las plantas petroquímicas.

La presente investigación propone evaluar las alternativas de solución, mediante un proceso mecánico de reutilización de carpeta asfáltica, a fin de obtener una nueva mezcla, ya que se busca sustentar la utilización de los materiales recuperados como materias primas, a fin de colaborar a la preservación y uso razonable de los recursos a emplear en nuevas aplicaciones y usos.

### **1.2.1 Problema**

¿La mezcla asfáltica con aportación de material de carpetas asfálticas deterioradas (RAP) cumple con las especificaciones técnicas de una mezcla convencional en caliente?

### **1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema**

El reciclado de carpetas asfálticas es de suma importancia para el medio ambiente, para evitar la sobre explotación de canteras. Los materiales de las carpetas deterioradas pueden ser reutilizados mediante una técnica adecuada de forma que son nuevamente válidos para la construcción.

Esta investigación es factible y viable, al obtener material de carpetas asfálticas deterioradas, que en nuestra ciudad son desechadas, con la colaboración de ingenieros de la Alcaldía Municipal de Tarija interesados en esta investigación que contribuye a un bien social y ambiental, permitió realizar ensayos para esta investigación con los materiales necesarios en las instalaciones de laboratorio de la misma institución.

### **1.2.3 Delimitación temporal y espacial de la investigación**

Las carpetas deterioradas son demolidas y extraídas para ser desechadas, ocasionando problemas al medio ambiente, se pretende reutilizar estos desechos para nuevas mezclas asfálticas. El tiempo para la realización de este trabajo se limitará al calendario académico de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

De acuerdo al presente proyecto se hará un caracterizado del material reciclado obtenido de los desechos de las vías urbanas de la ciudad de Tarija.

El proceso de reutilización de carpeta asfáltica tendrá un proceso mecánico, tiene un área de trabajo en la rehabilitación de carpetas asfálticas, su base de operaciones en el laboratorio de asfaltos.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Al emplear la combinación adecuada de material nuevo con material de carpetas deterioradas, para obtener una nueva mezcla asfáltica reciclada, y determinar la estabilidad y flujo como parámetros de calidad para una mezcla flexible, que cumpla con las expectativas de servicio para beneficio de los usuarios.

El método empleado nos permitirá lograr resultados positivos en la investigación, que demostrarán; que los residuos de carpetas flexibles sean utilizados en reemplazo de cierto porcentaje de material nuevo y obtener una mezcla asfáltica reciclada adecuada que cumplan con los aspectos técnicos y parámetros de calidad.

La presente investigación permitirá tener énfasis en el cuidado ambiental, nos permitirá dar a conocer y tener presente la responsabilidad del uso de la materia prima (agregados) y evitar la degradación de las canteras, que son usadas de manera informal e irresponsable.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con aportación de RAP

(carpeta asfáltica reciclada); de tal manera se pueda establecer el cumplimiento de las especificaciones técnicas de la mezcla asfáltica convencional en caliente.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

Al establecer el objetivo general, se listan las acciones que ayudara a complementar la investigación los cuales deben ser teóricos, prácticos y concluyentes.

- Implementar como parámetros de estudio y comparación las especificaciones técnicas de la ABC para mezclas asfálticas convencionales en caliente.
- Determinar los ensayos pertinentes para los componentes para una mezcla asfáltica convencional en caliente.
- Obtener residuos de carpetas asfálticas deterioradas en situación de desecho para su reciclaje.
- Realizar los ensayos pertinentes del material a reciclar.
- Proponer un método en el procesado de las carpetas asfálticas deterioradas para obtener el RAP.
- Determinar el comportamiento de mezclas asfálticas recicladas con variación de aportación de carpetas deterioradas.
- Determinar los porcentajes óptimo de cemento asfáltico para una mezcla reciclada.
- Realizar análisis de resultados.

#### **1.5 HIPÓTESIS**

Si, se evalúa la implementación de material de carpetas deterioradas en nuevas mezclas asfálticas, estas podrán lograr el cumplimiento de las especificaciones técnicas con la misma eficiencia que una mezcla convencional, en función a sus propiedades mecánicas como ser fluencia y estabilidad. Asimismo, se contribuye de manera efectiva al medio ambiente en cuanto a la explotación de áridos y la acumulación de desechos de carpetas deterioradas.

## 1.6 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

### 1.6.1 Variable independiente

Variable Independiente (X)

Cantidad de aportación de material a reciclar para la dosificación de una nueva mezcla.

*Tabla 1.1 Variable independiente*

| <b>Variable independiente</b>  | <b>Concepto</b>  | <b>Dimensión</b>   | <b>Indicador</b>                   | <b>Valor/Acción</b>    |
|--|--|--------------------|------------------------------------|------------------------|
| Cantidad de aportación de material a reciclar (RAP) para la dosificación de una nueva mezcla | Estas mezclas se basan en nuevas mezclas con aportaciones de material bituminoso reciclado | Tipo de evaluación | Experimental dentro de laboratorio | Realización de ensayos |

*Fuente: Elaboración propia.*

### 1.6.2 Variable dependiente

Variable Dependiente (Y)

El cumplimiento de especificaciones técnicas de carpetas asfálticas convencionales.

- Estabilidad
- Fluencia
- Peso volumétrico

Tabla 1.2 Variables dependientes.

| Variable dependiente                          | Concepto                                     | Dimensión           | Indicador   | Valor/Acción                          |
|---|--|---------------------|-------------|---------------------------------------|
| El cumplimiento de especificaciones técnicas. | Propiedades mecánicas de mezclas asfálticas. | Tipo de propiedades | Estabilidad | Determinado por el equipo de Marshall |
|   |  |                     | Fluencia    | Determinado por el equipo de Marshall |

*Fuente: Elaboración propia.*

## 1.7 IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es experimental descriptiva, el desarrollo metodológico describirá el comportamiento de la nueva mezcla asfáltica con aportación de material a reutilizar de carpetas deterioradas.

## 1.8 UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL

### 1.8.1 Unidad de estudio

La presente investigación comprende el estudio de las mezclas asfálticas recicladas en caliente, que se realiza con ensayos en laboratorios a través de un proceso que involucra elevadas temperaturas de trabajo, tanto para los agregados como el asfalto y un proceso de triturado mecánico.

### 1.8.2 Población

La población son los ensayos de laboratorio, un número de entrada de estimación preliminar, adoptando cualquier método en sus etapas y ensayos, donde N=157 ensayos.

### **1.8.3 Muestra**

El comportamiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con aportación de material reciclado de carpetas asfálticas deterioradas.

Los ensayos seleccionados en la población deben ser repetidos en la muestra, sea justa a una afijación de sus medias o proporciones generando un muestreo por conglomerado. Se puede asumir que la muestra será:  $n=78$  ensayos para la investigación.

### **1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo**

Para obtener el tamaño de la muestra se debe definir cuál será el error estándar para obtener a partir de allí la varianza, posteriormente aplicar los siguientes dos pasos para determinar el tamaño de la muestra.

## **1.9 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

La técnica seleccionada es muestreo por conglomerado.

De cada conglomerado, se selecciona una muestra aleatoria simple; los elementos de la población que son los conglomerados en donde debe existir características comunes que buscan la homogeneidad.

### **1.9.1 Métodos**

El trabajo de investigación consiste en realizar la caracterización de los agregados y cemento asfáltico al igual que la carpeta asfáltica deterioradas a reciclar, además de llevar acabo los ensayos de laboratorio necesarios para saber la resistencia y el comportamiento de las propiedades mecánicas de las Mezclas Asfálticas con aportación de material a reciclar, los métodos y las fórmulas para determinar los aspectos recién mencionados tiene que ver con parámetros y metodologías ya establecidas, elaboradas y realizadas en mezclas asfálticas convencionales, donde los resultados nos ayudaran a saber si las propiedades mecánicas especialmente estabilidad y la fluencia pueden alcanzar las mismas características al utilizar material reciclado sin el uso de aditivos, de esta forma llegar a la obtención de las conclusiones del trabajo de investigación; utilizando métodos



teóricos y empíricos.

### **1.9.2 Técnicas**

Se empleará la técnica experimental, debido a que reúne los medios necesarios de instrumentación y mecanismos adecuados a nuestro medio para desarrollar la investigación en laboratorio y obtener los resultados necesarios donde se busca variar los parámetros normales para tal elemento; donde experimento siempre supone la práctica de prueba y contra prueba con el fin de obtener nuevas soluciones, posibilidades y elementos que puedan aplicarse a determinadas situaciones. De tal modo, que esta técnica experimental será todo aquello que se crea en modo de búsqueda.

La investigación también utilizará la técnica bibliográfica, para obtener información correcta y así comparar resultados con especificaciones técnicas establecidas, o proceder de manera correcta con los distintos ensayos de laboratorio.

Para la realización del presente trabajo de investigación, se realizara en laboratorio los ensayos de granulometría de los agregados nuevos y de los agregados obtenidos de la carpeta asfáltica a reciclar, equivalente de arena, desgaste por medio de la máquina de los Ángeles, peso específico y absorción del agregado grueso y del agregado fino, y para el cemento asfáltico los ensayos de viscosidad, ductilidad, ensayo de penetración, y ensayos de verificación con el método del extractor centrifugo, que son técnicas conocidas.

## **1.10 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información será de forma descriptiva.

Se asume que es descriptivo el estudio de un conjunto de datos, cuando simplemente se describen o analizan a 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  $n$ .

Donde:

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

### **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  $Ase$  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 de 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  $\sigma^2$  (sigma cuadrada), 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:

Varianza poblacional:

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

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 la media aritmética de una población y de una muestra respectivamente son  $\mu, \bar{X}$  (su modo de cálculo es el mismo), se toma en cuenta que el total de datos se representa por  $N, n$  para una población o muestra respectivamente.

### 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  $\sigma$  (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:

Desviación estándar poblacional:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum (X - \mu)^2}{N}}; N = \sum_{j=1}^k f_j$$

Desviación estándar muestral:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}}; n = \sum_{j=1}^k f_j$$

Donde  $\mu, \bar{X}$  son la media aritmética de una población o de una muestra (poseen el mismo

valor).

### **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:

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

Este coeficiente se expresa en porcentaje al multiplicarse por 100. Se considera que un coeficiente de variación menor a 50% significa baja dispersión, es decir que la media aritmética es una buena representación de un conjunto de datos. Si es mayor al 50% significa alta dispersión, la media aritmética en tal caso no es una buena representación

## **1.11 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

El proyecto de investigación considera realizar un estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas recicladas, utilizando desecho de carpetas asfálticas deterioradas como aportación y una mezcla asfáltica nueva convencional.

El cemento asfáltico utilizado será el 85/100 de procedencia colombiana.

Los agregados pétreos serán utilizados de la central de acopio de la Alcaldía Municipal de Tarija (Pintada) el cual es requerido con especificaciones desde las distintas canteras de la ciudad de Tarija.

El material de las carpetas asfálticas deterioradas será obtenido de la copio de desechos de la posta municipal (Alcaldía Municipal de Cercado) este material a reciclar será triturado en chancadora mecánica; una vez triturado se procederá al caracterizado de su material pétreo y contenido de cemento asfáltico.

Una vez obtenidos los datos característicos de los agregados y haber realizado los ensayos pertinentes del cemento asfáltico, se realizará un diseño de mezcla convencional para

obtener el porcentaje de cemento asfáltico óptimo.

Según especificaciones técnicas en países como Perú, Colombia y España los porcentajes de aportación de carpetas deterioradas a nuevas mezclas pueden ser desde un 1% hasta un 30% sin necesidad de utilizar aditivos o rejuvenecedores, para fines de investigación se realizará con 10,15 20 25 30 y 35% para observar el comportamiento de las propiedades mecánicas de una mezcla reciclada, este proceso de dosificación se realizará como una mezcla convencional en caliente. Luego se realizará seis grupos de briquetas con el valor de contenido óptimo de cemento asfáltico y donde se le adicionará el triturado del material a reciclar RAP en distintos porcentajes, posterior a esto después de obtener los datos de Marshall se realizará la extracción de cemento asfáltico por el método de la centrifuga para analizar y verificar el contenido de asfalto y granulometría de cada grupo de briquetas.

Una vez realizado estos procesos se escogerá un porcentaje de material reciclado y se realizará un nuevo grupo de briquetas haciendo variar los porcentajes de cemento asfáltico en pequeñas fracciones.

Al realizar los cálculos de esta etapa del proyecto los cuales serán plasmados más adelante nos demostrará que la utilización de los materiales de las carpetas asfálticas deterioradas podrá lograr las características mecánicas de una mezcla convencional y que estos materiales son altamente reutilizables para la realización de mezclas asfálticas en caliente. Luego se establecen las conclusiones y recomendaciones del proyecto, y por último la bibliografía, donde se utilizaron especificaciones técnicas de Carreteras de Bolivia, libros, tesis y manuales para la realización de ensayos de laboratorio para el proyecto.

**CAPÍTULO II**  
**ASPECTOS GENERALES DE LAS MEZCLAS**  
**ASFÁLTICAS**

## CAPÍTULO II

### ASPECTOS GENERALES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

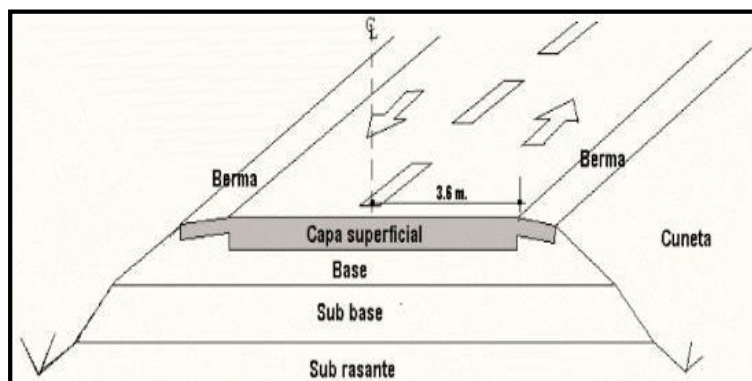
#### 2.1 PAVIMENTO FLEXIBLE

##### Definición

Se denomina pavimento flexible a aquel cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre el pavimento. El uso de pavimentos se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como pueden ser vías, aceras o parkings. Los pavimentos asfálticos o flexibles son aquellos construidos con materiales asfálticos y materiales granulares.

Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub-base. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas dependencias de las necesidades particulares de cada obra. (Escobar, 2012).

*Figura 2.1 Estructura típica de un pavimento asfáltico flexible.*



*Fuente: (Escobar, 2012).*

##### 2.1.1 Componentes de un pavimento

El pavimento está formado por varias capas, como se observará en la figura 2, dentro de las cuales se encuentra la sub-rasante, la sub-base, la base, estas dos últimas son elementos estructurales que, al estar ligados con la superficie, tienen por objetivo distribuir las cargas de tránsito a la sub-rasante.

Figura 2.2 Sección de corte de las capas del pavimento flexible



Fuente: (Rafael, 2007).

Dentro de las propiedades funciones en conjunto de las capas del firme flexible tenemos: Tener la impermeabilidad necesaria para que impida la filtración del agua, afectando principalmente la capacidad de soporte del suelo.

Resistir de la mejor manera las cargas generadas por el tránsito, sin que estas produzcan deformaciones de ningún tipo en la estructura, considerando el espesor como factor fundamental.

Soportar los diferentes agentes atmosféricos, esperando que no se generen problemas como la meteorización y alteración de los materiales que forman el pavimento, por lo que se debe poner atención en los materiales para que resistan lo agentes físicos y químicos.

Debe contar con una superficie de rodadura adecuada, que permita fluidez y confort durante el tránsito de vehículos, siendo esta de aspecto agradable y entregarles seguridad a los usuarios.

Poseer flexibilidad para adaptarse a las posibles fallas que se pueden presentar durante su vida de servicio.

### **Sub base**

Esta capa juega un rol meramente económico en los pavimentos flexibles, buscando obtener el espesor necesario utilizando el material más barato posible, lo que trae un aumento en el espesor total del pavimento. La sub-base también aporta sirviendo de transición entre la base y la sub-rasante; siendo ocupada como un tipo de filtro para evitar



que el material de la base se incruste en la sub-rasante, a su vez apoya en la absorción de las deformaciones que provienen de la sub-rasante. En general los espesores de las sub-base, son muy variables y dependen de cada proyecto específico, pero suelen de 10 a 15 cm dimensión mínima.

### **Base**

La función principal de esta capa, es proporcionar un elemento resistente que pueda transmitir los esfuerzos producidos por el tránsito, hacia la sub-base y la sub-rasante, con una intensidad adecuada, sirviendo así a reducir el espesor de la carpeta de rodado, que es la más costosa. Un factor fundamental en la base, es el material que la constituye, este debe ser friccionante y provisto de vacíos, para poder garantizar la resistencia correcta y permanecía de esta en el tiempo, bajo las condiciones externas, como puede ser el contenido del agua.

Los espesores de las bases dependen del proyecto que se trate, pero suele considerarse que entre 10 a 15cm, es el espesor mínimo para poder construir. Por ende, de forma global en todo proyecto la base en la capa encargada de proporcionar una superficie de rodadura adecuada, con textura y color conveniente, además de resistir los efectos abrasivos del tránsito.

### **Superficie capa de rodadura**

Esta capa se coloca sobre la base. Siendo su objetivo principal proteger la estructura del pavimento, impermeabilizando la superficie, para evitar las filtraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores, evitando que afecte directamente a las otras capas del pavimento. Esta capa también contribuye en la capacidad de soporte del pavimento, absorbiendo cargas esto considerando un espesor mayor a 4 centímetros. Así mismo el pavimento debe ofrecer una superficie buena y resistente, con una rugosidad mínima para poder garantizar la fricción con las llantas de los vehículos, como también debe de contar con un color adecuado para evitar deslumbramientos y/o reflejos. (Rafael,2007).

#### **2.1.2 Características de carpeta de rodadura**

Las carpetas flexibles se caracterizan por estar conformados principalmente de una capa bituminosa, que se apoya de otras capas inferiores llamadas base y sub-base; sin embargo,

es posible prescindir de estas capas dependiendo de la calidad de la sub-rasante y de las necesidades de cada obra. Cada capa recibe las cargas por encima de la capa, se extiende en ella, entonces pasa estas cargas a la siguiente capa inferior.

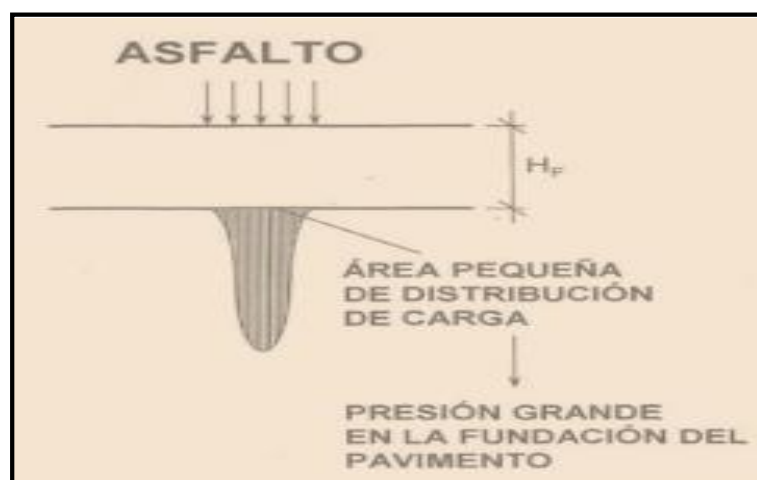
Por lo tanto, la capa de más abajo en la estructura del pavimento, recibe menos carga. Con el fin de aprovechar al máximo esta propiedad, las capas son generalmente dispuestas en orden descendente de capacidad de carga, por lo tanto, la capa superior será la que posee la mayor capacidad de carga de material (y la más cara) y la de más baja capacidad de carga de material (y más barata) ira en la parte inferior.

En este tipo de pavimentos la calidad de los materiales utilizados en cada una de las capas aumenta conforme nos acercamos a la superficie, de modo de lograr una estructura competente ante las cargas esperadas y que a la vez resulte lo más económica posible.

Su estabilidad depende del entrelazamiento de los agregados, de la fricción entre las partículas y de la cohesión de las mismas.

La superficie de rodadura de los pavimentos flexibles al tener una menor rigidez que las losas de concreto hidráulico, se deforma más y se producen mayores tensiones en la sub-rasante. En la figura 3 se presenta la distribución de esfuerzos que se genera en un pavimento flexible:

*Figura 2.3 Distribución de cargas en un pavimento asfáltico.*



*Fuente: (Rafael, 2007).*

## 2.2 MEZCLA ASFÁLTICA

### Definición

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráficos pesados intensos.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico.

Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total. (Instituto del asfalto).

### 2.2.1 Clasificación de mezclas asfálticas

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

- Por la temperatura de puesta en obra.
- Por las fracciones de agregado pétreo empleado.
- Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.
- Por el tamaño máximo del agregado pétreo.
- Por la estructura del agregado pétreo.
- Por la granulometría.

Por la temperatura de puesta en obra

La primera de estas clasificaciones se basa en los diferentes rangos de temperatura a la

que se produce la mezcla. Así pues, recogiendo la amplia gama de mezclas que puedan producirse, la clasificación tendría la forma siguiente:

**Mezclas asfálticas en frío:** Se trata de aquellas mezclas asfálticas producidas a temperatura ambiente (hasta los 60°C), y que para conseguir la trabajabilidad adecuada utilizan bien emulsiones, o bien betún espumado.

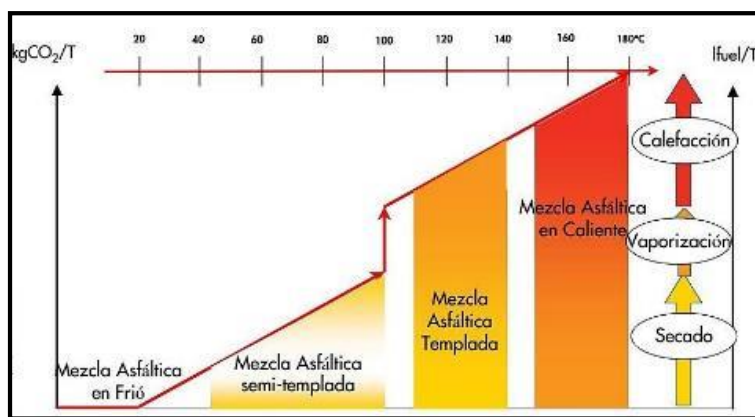
**Mezclas asfálticas semi-templadas:** Este tipo de mezclas se caracteriza porque su temperatura de producción no supera en ningún momento la temperatura de ebullición del agua (100°C), usando para ello en la mayoría de los casos la humedad de los áridos.

**Mezclas asfálticas en caliente:** Las más extendidas por tradición, son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los 140°C. Como se ha comentado anteriormente, son necesarias estas elevadas temperaturas de modo que se consiga la manejabilidad adecuada de las mezclas, así como la mejor envuelta en los áridos.

**Mezclas asfálticas en caliente:** Las más extendidas por tradición, son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los 140°C. Como se comentado anteriormente, son necesarias estas elevadas temperaturas de modo que se consiga la manejabilidad adecuada de las mezclas, así como la mejor envuelta de los áridos.

En la figura 4 que se incorpora a continuación es posible visualizar los rangos anteriormente mencionados, con su correspondiente gasto de combustible (aproximado) por tonelada de producción.

Figura 2.4 Clasificación de las mezclas asfálticas por su temperatura de fabricación



Fuente: (Porot, 2008)

**Por fracciones de agregado pétreo empleado**

Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante. Mortero asfáltico: Agregado grueso más mortero.

Concreto asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico. Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

**Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica**

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

Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos esta entre 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%.

**Por el tamaño máximo del agregado pétreo**

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

Mezclas finas: Son mezclas formadas básicamente por un agregado fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico.

**Por la estructura del agregado pétreo**

Mezclas con esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al razonamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos.

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

**Por la granulometría**

Mezclas continuas: Se presenta una granulometría con una distribución adecuada de cada

uno de los tamaños de los agregados pétreos.

Mezclas discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en la banda granulométrica. (Porot, 2008).

### **2.2.2 Componentes de una mezcla asfáltica**

Son los siguientes:

#### **Asfalto**

El asfalto es un material negro, cementante que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido, a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla caliente.

El asfalto, según la American Society for Testing and Materials (ASTM), es un material cementante color café oscuro a negro, en el cual los constituyentes predominantes son los bitúmenes los cuales existen en la naturaleza o son obtenidos por el procesamiento del petróleo.

#### **Agregados**

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en las capas de las carreteras, con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.

El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y el 85 por ciento, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento.

### **2.2.3 Características de las mezclas asfálticas**

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

- Densidad.

- Vacíos de aire.
- Vacíos en el agregado Mineral (VMA).
- Contenido de asfalto
- Vacíos Llenos de Asfalto (VFA).

### **Densidad**

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable.

### **Vacíos de aire**

Están presente entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre 3% y 5%.

La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico. A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Por otra parte, un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

### **Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)**

Son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir, el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla.

Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VMA establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

### **Contenido de asfalto**

El contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas. Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (No. 200)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Caso contrario al efectuar pequeñas disminuciones de filler nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado



en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Técnicamente se habla de dos tipos de asfalto al referirse al asfalto absorbido y el no-absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto: Es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla.

El contenido efectivo de asfalto: Es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados.

El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto. La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla.

#### **Vacíos llenos de asfalto (VFA)**

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

### **2.3 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Para obtener una mezcla de calidad, esta debe poseer las propiedades siguientes:

- Estabilidad.
- Durabilidad.
- Flexibilidad.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia al deslizamiento.
- Impermeabilidad.
- Trabajabilidad.

**Estabilidad**

La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos, ondulaciones y otros efectos que indican cambios en la mezcla. Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

**Durabilidad**

Es la habilidad de una carpeta de asfalto, para resistir factores como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y la separación de las películas de asfalto. Esta propiedad se mejora de tres formas: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una gradación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

**Flexibilidad**

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamiento, soportando los movimientos graduales y asentamientos de la base y sub-base. Los asentamientos en el pavimento pueden ocurrir debido a que falle cualquiera de sus componentes. Provocando daños visibles en la carpeta de rodadura.

**Resistencia a la fatiga**

Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se conoce por medio de los estudios realizados a diferentes carpetas asfálticas, que los vacíos y la viscosidad del asfalto, tienen un efecto considerable en la resistencia a la fatiga.

**Resistencia al deslizamiento**

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar

el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada.

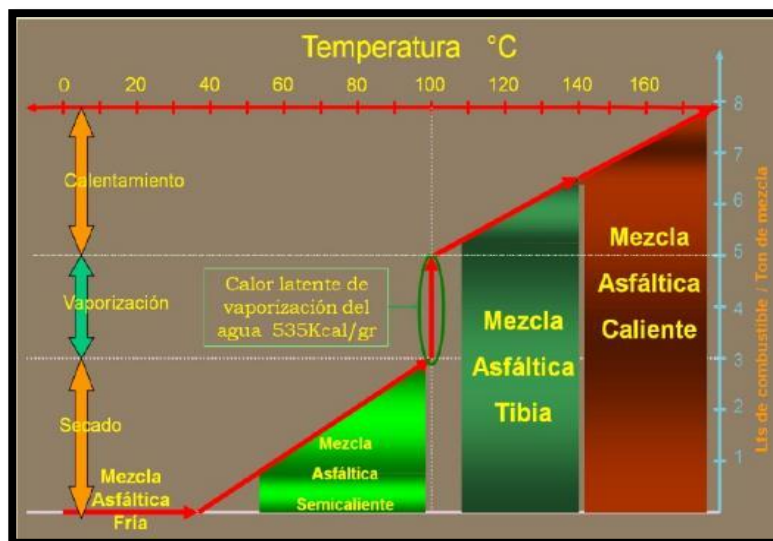
### Impermeabilidad

Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento o a través de él. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos. Cierta grado de permeabilidad es aceptable, siempre y cuando, este dentro de los límites especificados.

### Trabajabilidad

Es la facilidad con la cual una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. El asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad. (Porot, 2008).

Figura 2.5 Clasificación de mezclas según las temperaturas de mezclado



Fuente: Comisión permanente del asfalto, 2008.

Tabla 2.1 Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura

| Nombre de la Mezcla         | Temperatura         | Objetivo  | Logro  |
|-----------------------------|---------------------|---|--|
| <b>Mezcla en Frío</b>       | Frío de 25°C a 60°C | Permitir la incorporación en la mezcla de una alta proporción, de material reciclado.                         | Las mezclas en Frío con emulsiones asfálticas donde los agregados se revisten a temperaturas bajas en una emulsión de asfalto en agua, pueden utilizarse como capas intermedias, capas de refuerzo e incluso, capas de rodadura.   |
| <b>Mezcla Semi templada</b> | 60°C a 100°C        | Maximizar los ahorros energéticos y las emisiones aprovechando parte de la humedad presente en los agregados. | Se están desarrollando varios productos y procesos para producir mezclas semi- templadas, a partir de emulsiones en planta, que resulten convencionales a los procesos de mezcla en caliente. Aunque los procesos más ambiciosos de reducción de temperatura hacen uso de las propiedades de espumado del asfalto, cuando entra en contacto con el aire y la humedad bajo presión; así, a medida que se expande el volumen del asfalto, su viscosidad disminuye y se hace posible el revestimiento completo de los agregados. (Hassan, 2009) |

| Nombre de la Mezcla | Temperatura  | Objetivo   | Logro  |
|---------------------|--------------|--|--|
| Mezclas Tibias WMA  | 100°C a 135° | Reducir los requerimientos térmicos de las mezclas en caliente | Se mantienen o mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, para ello se requiere una tecnología para reducir la viscosidad del ligante durante las fases de mezcla y tendido, sin tener un efecto negativo a las temperaturas de uso. (Transportation Research Board of the National Academies, 2009) |

*Fuente: Comisión permanente del asfalto, 2008.*

## 2.4 GRANULOMETRÍA EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

La aparición de nuevos criterios para la evaluación de la graduación de agregados es debido al surgimiento de la metodología de diseño Superpave, la cual forma parte del programa estratégico de investigación en carreteras (Strategic Highway Research Program, SRHP), el cual está dirigido a mejorar el desempeño y vida útil de las carreteras.

### 2.4.1 Origen de la gráfica de Fuller

La curva de distribución granulométrica de un material grueso, no uniforme, o gráfica de Fuller tiene su origen en la ecuación de Fuller, la cual representa condiciones de máxima densidad y mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA). La ecuación se describe a continuación:

$$p_i = \left( \frac{D_i}{D_{m\acute{a}x}} \right)^n$$

Donde:

$p_i$  = Acumulado que pasa, en decimal, para el diámetro de la partícula  $D_i$

$D_i$  = Diámetro de la partícula (mm)

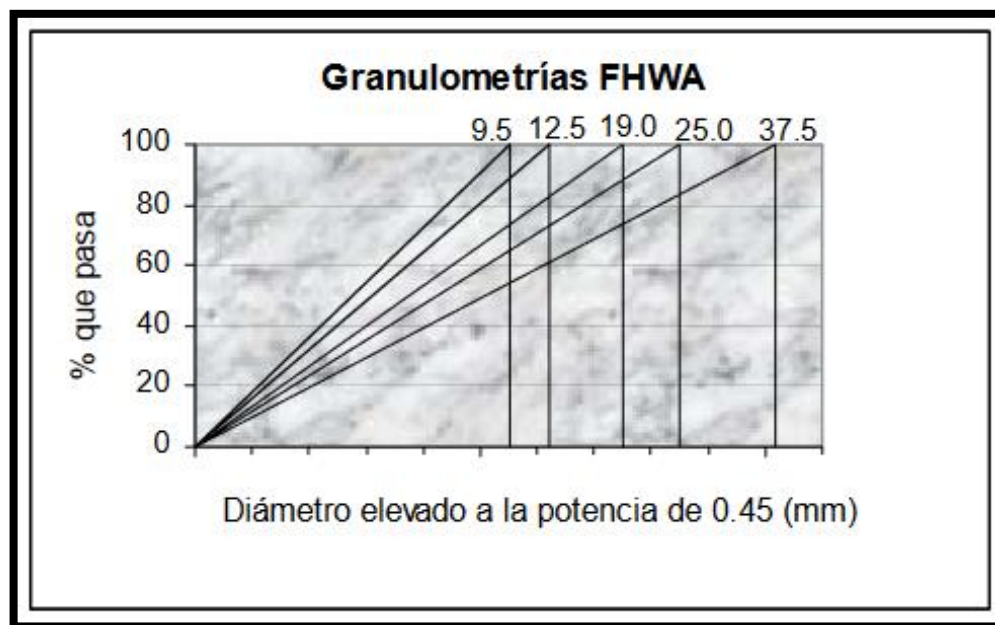
$D_{\text{máx.}}$  = Tamaño máximo del material (mm)

$N$  = Valor asociado a la forma de la curva

Con la expresión de Fuller, la graduación de agregados para una mezcla asfáltica se puede expresar por un par de números, esto es, un coeficiente de forma ( $n$ ) y el tamaño máximo ( $D_{\text{máx.}}$ ). La literatura sugiere que cuando el factor de forma tiene un valor de 0.45 la mezcla es capaz de alcanzar las máximas densidades cuando se compacta. Lo que hay que resaltar aquí es que sólo las curvas con  $n$  igual o cercana a 0.45 producen la máxima densificación; aunque esto se ha desvirtuado en la actualidad.

Esta representación permite visualizar la línea de máxima densificación y evitar que la curva de graduación de diseño caiga encima de ella. En general, la curva de máxima densificación es temida porque produciría inaceptablemente bajos valores de vacíos en el agregado mineral VMA.

Gráfico 2.1 Representación de granulometrías según la FHWA



Fuente: (Alamilla, 2006)

Un rango importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad; corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada

100%, hasta el origen (0%, 0 mm).

#### **2.4.2 Importancia de la gráfica de Fuller**

La importancia de usar la gráfica de Fuller, es que permite expresar la graduación de agregados en una mezcla asfáltica con dos números ( $n_i / D_i$ ). el primero está referido a la forma de la curva y a la estructura y arreglo geométrico de la potencial masa compactada, y el otro al tamaño máximo del agregado. Esto facilita la expresión y manejo de la graduación, de las especificaciones granulométricas y hasta la definición de la buena graduación y el potencial de densificación de la mezcla.

El ajuste de Fuller también puede servir para controlar la variabilidad de la producción diaria de la mezcla en planta. Este método para evaluar la variabilidad de una granulometría aventaja al método tradicional de tolerancias de mallas individuales pues aquel considera a la graduación de manera integral.

#### **2.4.3 Mecanismos de control de la granulometría**

Históricamente las especificaciones de las granulometrías han consistido en bandas maestras (límite superior e inferior) en los cuales se especifica el máximo mínimo porcentaje que pasa para cada malla. Tales especificaciones tienen una característica indeseable inherente. Las mezclas pueden estar diseñadas dentro de las especificaciones y sin embargo tener un desempeño pobre en servicio. Específicamente, estas mezclas tienen una estructura de agregado pobre y son susceptibles a la deformación permanente. De igual forma las mezclas pueden ser diseñadas demasiado densas, lo que reduce el contenido de asfalto y conduce a problemas de durabilidad.

Tabla 2.2 Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (para  $\Sigma L \leq 106$ )

| Malla         |             | Tamaño nominal del material pétreo mm(in) |          |          |          |          |          |
|---------------|-------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|
|               |             | 12,5 (1/2)                                |          | 19 (3/4) |          | 25 (1)   |          |
| Abertura (mm) | Designación | Porcentaje que pasa                       |          |          |          |          |          |
|               |             | Limites                                   |          | Limites  |          | Limites  |          |
|               |             | inferior                                  | superior | inferior | superior | inferior | superior |
| 37,50         | 1 1/2"      |   |          |          |          |          |          |
| 25,00         | 1"          |   |          |          |          |          | 100      |
| 19,00         | 3/4"        |   |          |          | 100      | 90       | 100      |
| 12,50         | 1/2"        |   | 100      | 90       | 100      | 76       | 89       |
| 9,50          | 3/8"        | 90  | 100      | 79       | 92       | 67       | 82       |
| 6,30          | 1/4"        | 76  | 89       | 66       | 81       | 56       | 71       |
| 4,75          | N° 4        | 68  | 82       | 59       | 79       | 50       | 64       |
| 2,00          | N° 10       | 48  | 64       | 41       | 55       | 36       | 46       |
| 0,85          | N° 20       | 33  | 49       | 28       | 42       | 25       | 35       |
| 0,42          | N° 40       | 23  | 37       | 20       | 32       | 18       | 27       |
| 0,25          | N° 60       | 17  | 29       | 15       | 25       | 13       | 21       |
| 0,15          | N° 100      | 12  | 21       | 11       | 18       | 9        | 16       |
| 0,075         | N° 200      | 7   | 10       | 6        | 9        | 5        | 8        |

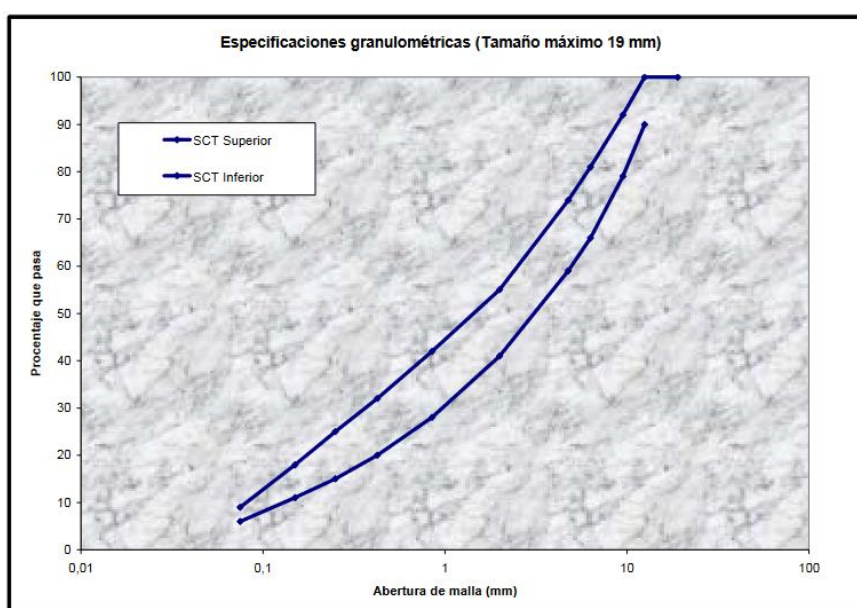
Fuente: (Alamilla, 2006)

Para estas granulometrías, se utilizan gráficas semilogarítmicas para definir las granulometrías permitidas, en las cuales, en las ordenadas se encuentran los porcentajes de material que pasan por las diferentes mallas según el tamaño, nominal del material



pétreo y en las abscisas se encuentran las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño nominal del material y las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. En la figura se presenta la gráfica granulométrica semilogarítmica para un tamaño nominal de 19 mm según SCT, para un número de ejes equivalentes de  $\Sigma L \leq 106$ .

*Gráfico 2.2 Granulométrica SCT para un tamaño nominal de 19 mm y  $\Sigma L \leq 106$*



*Fuente (Hugo Alexander Rondón Quintana, 2019)*

## 2.5 MÉTODO MARSHALL

### 2.5.1 Consideraciones preliminares

El Método de dosificación Marshall desarrollado por el Ing. Bruce Marshall, inicialmente fue utilizado por el cuerpo de ingenieros del ejército norteamericano, actualmente es el método más utilizado para la elaboración de fórmulas de mezcla. El criterio para conseguir una mezcla satisfactoria está basado en requisitos mínimos de estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos. Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas preparadas en caliente, utilizando

el equipo Marshall, determina características físicas de las mezclas y analiza los parámetros que definen el contenido de asfalto. La estabilidad se determina empleando el principio de corte en compresión semi-confinada, sometiendo a la muestra a esfuerzos de compresión diametral a una temperatura de 60°C (140°F). La aplicación de esfuerzos y la rotura de las muestras.

Se consiguen con un dispositivo especialmente proyectado para las pruebas de estabilidad.

El valor de estabilidad representa la resistencia estructural de la mezcla compactada y está afectada principalmente por el contenido de asfalto, la composición granulométrica y el tipo de agregado. El valor de estabilidad es un índice de la calidad del agregado. Además, la mezcla debe tener la fluidez necesaria para que pueda compactarse a la densidad exigida y producir una textura superficial adecuada. El valor del Flujo representa la deformación producida en el sentido del diámetro del espécimen antes de que se produzca su fractura. Este valor es un indicador de la tendencia para alcanzar una condición plástica y consecuentemente de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica a deformarse bajo la acción de las cargas que por ella transiten.

El contenido óptimo de asfalto se determina, de acuerdo a recomendación del instituto del asfalto (manual MS-2), a través de la media aritmética de los porcentajes que llevan a:

- La máxima estabilidad.
- La máxima densidad de la mezcla y al volumen de vacíos de aire especificado.

Esta media debe ser verificada en relación al valor de la fluencia y a los vacíos del agregado mineral (VAM), a fin de asegurar que la mezcla contenga un volumen de asfalto (Vb.) suficiente, sin que el volumen de vacíos de aire (VV.) sea reducido a un valor inaceptable. Si no se cumplen las especificaciones, la granulometría del agregado debe ser modificada.

### **2.5.2 Descripción del método Marshall**

El método Marshall usa muestras de prueba normalizadas (briquetas) de 2 y ½” de espesor por 4” de diámetro (64 x 102 mm).

Se selecciona el agregado que cumpla con las especificaciones requeridas. El tipo y grado del asfalto, de acuerdo al tipo de agregado y las condiciones climáticas.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se preparan y compactan una serie de muestras de prueba (briquetas), con distintos porcentajes de asfalto cuyo rango de variación no debe ser mayor a 0,5%. Como mínimo se debe incluir dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo de contenido de asfalto estimado. En la práctica se observa que el contenido óptimo de asfalto se encuentra alrededor del 6%, con referencia al peso de los agregados pétreos. Mayores porcentajes deben conducir a una verificación cuidadosa del diseño de la mezcla. Para verificar la idoneidad de los datos se deben hacer tres muestras (briquetas) por cada contenido de asfalto. Generalmente para un diseño, se deben tomar 6 porcentajes de asfalto diferentes, por lo cual se requerirán 18 briquetas. Adicionalmente se deben incluir 6 briquetas para determinar los efectos del agua en la estabilidad y el flujo. Aproximadamente para cada briqueta, se necesitan 1200g de agregados, por lo cual la cantidad representativa de los agregados, debe tener un peso.

### **Equipo**

Entre los elementos más importantes del equipo necesario para la elaboración de los núcleos de prueba, se pueden citar los siguientes:

- Horno y placa calentadora eléctrica, para calentar los materiales, Horno aireador para el curado de las mezclas.
- Termómetro blindado de vidrio o dial con varilla para lecturas entre 50°F (10°C) y 450°F (232°C).
- Balanza de 2 kg de capacidad, con aproximación a 0,1 g. Balanza de 5 kg con aproximación a 1 g.
- Pedestal para compactación, que consta de un soporte de madera, sobre el cual descansa una placa de acero de 12" x 12" x 1" (305 x 305 x 25 mm).
- Molde de compactación que consta de una base, molde encofrado y collar de extensión. El molde tiene un diámetro interior de 4" (101,6 mm) y una altura aproximadamente 3" (76 mm). La base y el collar están diseñados para intercambiarse ya sea a uno u otro lado del molde.

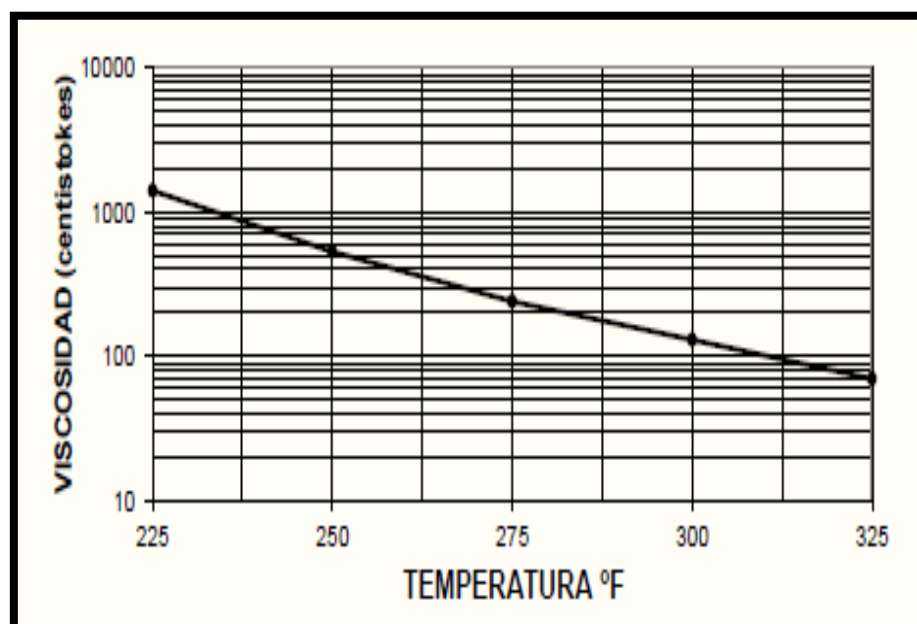
- Martillo de compactación, que consta de una barra achatada que cae deslizándose sobre una guía y un pisón de cara circular de 3 7/8" (98,4 mm). La barra pesa 10 libras (4,5 kg) y tiene una caída (guía) de 18" de altura.
- Soporte del molde, que consta de un dispositivo de tensión elástica, diseñado para acoplar el molde sobre el pedestal de compactación.
- Extractor de muestra o prensa para extraer la muestra (briqueta) ya compactada.
- Accesorios como cucharas, espátula, mezclador mecánico, baño de agua hirviendo, etc.

### **Preparación de las muestras para ensayo**

Número de muestras: Por lo menos 3 para cada contenido de asfalto. Chequeo y preparación de agregados:

- Determinar la gradación de los agregados propuestos, de acuerdo a los métodos de ensayo C-117 y C-136 de la ASTM.
- Determinar el peso específico Bulk y el aparente de los agregados, de acuerdo a los métodos de ensayo C-127 y C-128 de la ASTM.
- Seleccionar la dosificación de agregados que cumpla con la curva de densidad máxima para el tamaño máximo de partículas, además que cumpla el requisito del porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.
- Calcular los pesos específicos Bulk y aparente de la combinación de agregados elegida.
- Determinación de la temperatura de mezclado y de compactación: Sobre la base de la curva viscosidad-temperatura, se elige la temperatura a la cual el asfalto alcanzará una viscosidad cinemática de 170 a 20 centistokes para la temperatura de compactación.

Gráfico 2.3 Curva viscosidad-temperatura para cementos asfálticos



Fuente: (Instituto del asfalto).

### Preparación de las mezclas

Pesar por separado en bandejas, para cada muestra de ensayo, la cantidad adecuada de cada fracción que produzca una bachada que de cómo resultado una muestra compactada de  $2,5 \pm 0,1$ " de espesor ( $63,5 \pm 1,3$  mm). Colocar las bandejas para el mezclado en el horno y calentarlas a una temperatura aproximada de  $25^{\circ}\text{F}$  ( $13,9^{\circ}\text{C}$ ), por encima de la de mezclado. Calentar el asfalto a una temperatura lo suficientemente alta para que fluya fácilmente, pero sin que ésta sea mayor que la de mezclado. Colocar la bandeja de mezclado y su contenido en la balanza y pesar agregando el asfalto necesario. Luego se coloca el palustre en la bandeja y se determina el peso total de los componentes de la mezcla más el equipo de mezclado con aproximación a 0,2 g. Se mezclan los agregados y el asfalto con el palustre hasta obtener una mezcla homogénea.

### Compactación de los núcleos de prueba

Colocar toda la mezcla preparada dentro del molde, emparejando la mezcla con la espátula, unas 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en la parte central. Se quita el collar y se alisa suavemente la superficie, hasta obtener una forma ligeramente redondeada. Inmediatamente antes del proceso de compactación la temperatura de la

mezcla debe estar muy cercana a los límites de la temperatura de compactación establecida. Colocar nuevamente el collar de extensión, y ubicarlo en el pedestal de compactación. Se aplican 75 (35 o 50) golpes con el martillo, según lo especificado para la categoría de tráfico. Se quitan la base y el collar se le da vuelta y se vuelve a armar el conjunto. Se aplica el mismo número de golpes a la cara opuesta de la muestra. Después de la compactación, se quita la base del molde y se expone la muestra a la temperatura ambiente dentro del molde. Se saca la muestra del molde por medio de un extractor

## **2.6 ENSAYO MARSHALL**

El ensayo debe efectuarse después de transcurridas 16 horas de la compactación.

### **2.6.1 Procedimiento de ensayo**

Para complementar el diseño de la mezcla, se deben efectuar los siguientes ensayos y análisis:

En la mezcla sin compactar:

- Peso específico efectivo.
- Peso específico máximo. En la muestra compactada:
- Peso específico Bulk.
- Estabilidad y flujo a 60°C.
- Análisis de densidad y Vacíos.

### **Equipo requerido**

Máquina de ensayo Marshall, con dispositivo eléctrico, diseñada para aplicar las cargas a las muestras por medio de pesas de ensayo semicirculares, está equipada con un calibrador provisto de anillo para determinar la carga de ensayo, de un marco de carga para el ensayo de estabilidad y un medidor de flujo, para establecer la deformación bajo la carga máxima de ensayo. Baño de agua con una profundidad mínima de 15 cm (6”), provisto de un termostato para mantener una temperatura de 60°C a 1°C.

### **Pruebas de estabilidad y fluencia**

Después de obtenido el peso específico Bulk de la mezcla compactada, se procede a la ejecución de los ensayos de estabilidad y fluencia, de la siguiente manera:

- Calibrar el cero del flujómetro, previamente montado sobre uno de los guidores, y luego de insertar la mordaza de 4" debajo del pivote.
- Sumergir la briqueta en baño de agua a 60°C (140°F), durante 30 a 40 minutos.
- Limpiar las guías y la superficie interior del anillo de prueba y lubricar las guías para garantizar que el segmento superior del anillo se deslice libremente sobre ellas. La temperatura de la mordaza debe mantenerse a una temperatura de 21 a 37,8°C (70 a 100°F), utilizando el baño de agua, si fuese necesario.
- Se saca la muestra del baño de agua, se coloca en la parte inferior de la mordaza, luego se inserta la parte superior de la misma. Se centra el conjunto en el dispositivo de carga y se coloca el medidor de flujo sobre el guidor superior de la mordaza.
- Aplicar la carga de ensayo a la muestra a una velocidad de deformación constante de 51 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define como la carga máxima obtenida en el ensayo. El número total de Newton (libras) necesario para producir la falla de la muestra se define como el valor de la estabilidad Marshall. La deformación vertical del espécimen producida por la carga, es el valor del Flujo (fluencia).
- Durante el ensayo de estabilidad, sujétese firmemente el medidor de flujo en su posición sobre el guidor, y retírese en el instante mismo que la carga empieza a decrecer, se anota el valor de flujo en unidades de 0,25 mm (0.01"). Por ejemplo, si la muestra se deforma 3,8 mm (0,15"), su fluencia será 15.
- Se promedian los valores de estabilidad y flujo para todas las muestras con cada contenido de ligante.

Las pruebas de estabilidad y fluencia, a partir de la extracción de los núcleos del baño, no deben durar un tiempo mayor a 30 segundos.

### **Análisis de densidad y vacíos**

Después de la conclusión de los ensayos de estabilidad y fluencia, se realiza el análisis de

densidad y vacíos, para cada grupo de núcleos de prueba, de la siguiente manera:

- Promediar los valores de peso específico Bulk de todas las muestras de ensayo para cada contenido de ligante; los valores que por simple inspección presenten error, no se consideran.
- Determinar el peso unitario promedio para cada contenido de ligante, multiplicando el valor promedio del peso específico Bulk por 1000 para peso unitario en  $\text{kg/m}^3$ , por 62,4 para peso unitario en  $\text{lb/ft}^3$ .
- Dibujar un gráfico de relación de peso unitario vs. Contenido de asfalto, uniendo los puntos mediante una curva intermedia, que proporcione el mejor ajuste para todos los valores.
- Leer directamente en la curva trazada, los valores de peso unitario para cada contenido de asfalto ensayado y obtener el peso específico Bulk equivalente, dividiendo entre 1000  $\text{Kg/m}^3$  (ó entre 62,4  $\text{lb/ft}^3$ ). Los valores de peso específico Bulk así obtenidos, serán usados en el cálculo posterior de vacíos.

### **2.6.2 Presentación de resultados**

Los valores de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos en la mezcla, se procesan como se indica a continuación:

Promediar los valores de flujo y estabilidad para todas las muestras de un porcentaje de asfalto dado. Valores errados en comparación con los otros, no se incluirán en el promedio. Se elaboran gráficos, para presentar las relaciones entre los siguientes valores:

- Estabilidad vs. porcentaje de asfalto.
- Peso unitario vs. porcentaje de asfalto.
- Porcentaje de vacíos en la mezcla vs. porcentaje de asfalto.
- Flujo vs. porcentaje de asfalto.
- Porcentaje de vacíos en el agregado vs. porcentaje de asfalto.

En cada gráfico se debe unir los puntos obtenidos mediante una curva promedio, procurando que todos los valores se ajusten a ella en forma adecuada.



### **2.6.3 Determinación del contenido óptimo de asfalto**

El contenido óptimo de asfalto se determina a partir de los datos obtenidos anteriormente, considerando los resultados de las curvas correspondientes a estabilidad, peso unitario y porcentaje de vacíos, en las cuales se determina el contenido de asfalto para conseguir:

- Estabilidad máxima.
- Peso unitario máximo.
- El valor medio del porcentaje de vacíos según tabla.

El contenido óptimo de asfalto será el promedio numérico de los contenidos de asfalto indicados anteriormente.

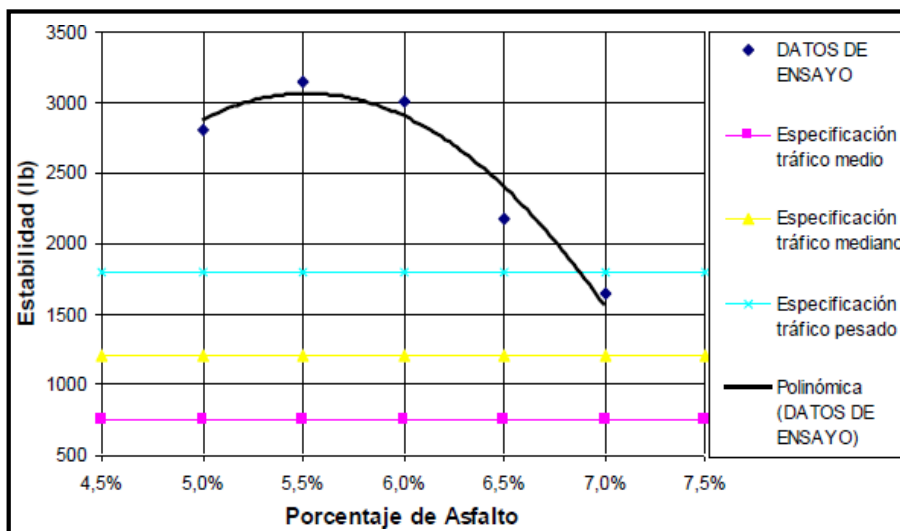
### **2.6.4 Tendencias y relaciones de los resultados de ensayo**

Las curvas de ensayo trazadas como se describió anteriormente, constituyen una norma razonablemente consistente para diseño de mezclas asfálticas de gradación densa. Las tendencias que generalmente se observan se detallan a continuación:

- El valor de la estabilidad aumenta al aumentar el contenido de asfalto hasta un punto máximo, a partir del cual la estabilidad decrece.
- El valor del flujo aumenta al aumentar el contenido de asfalto. En muchos casos el valor mínimo corresponderá a un contenido de asfalto menor que el mínimo usado en las muestras de ensayo.
- La curva de peso unitario de la mezcla total, es similar a la curva de estabilidad, excepto que el máximo peso unitario se consigue normalmente (no siempre), común contenido de asfalto un poco más alto que el correspondiente a la máxima estabilidad.
- El porcentaje de vacíos (de aire) se reduce al aumentar el contenido de asfalto, hasta llegar al final a un contenido mínimo de vacíos.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral, generalmente decrece hasta un valor mínimo, y luego aumenta al incrementarse el contenido de asfalto.

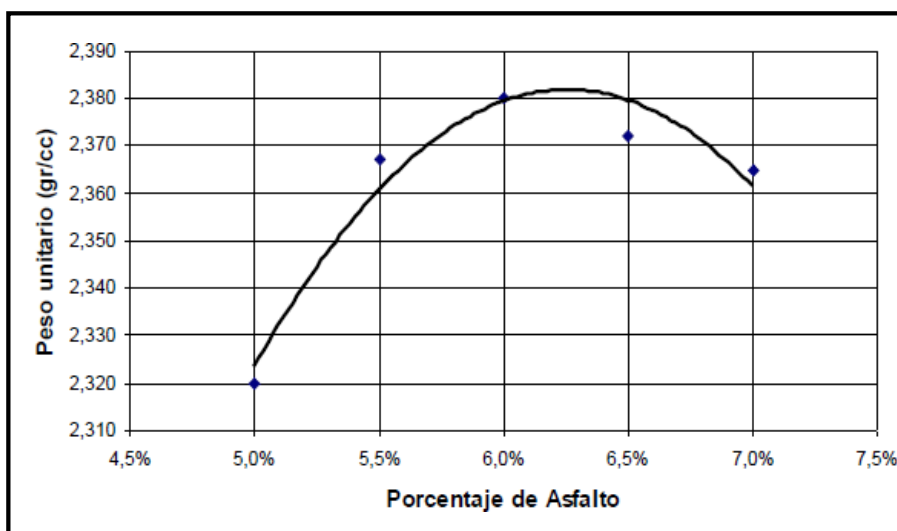
## 2.6.5 Curvas método Marshall

Gráfico 2.4 Curva estabilidad vs. porcentaje de asfalto



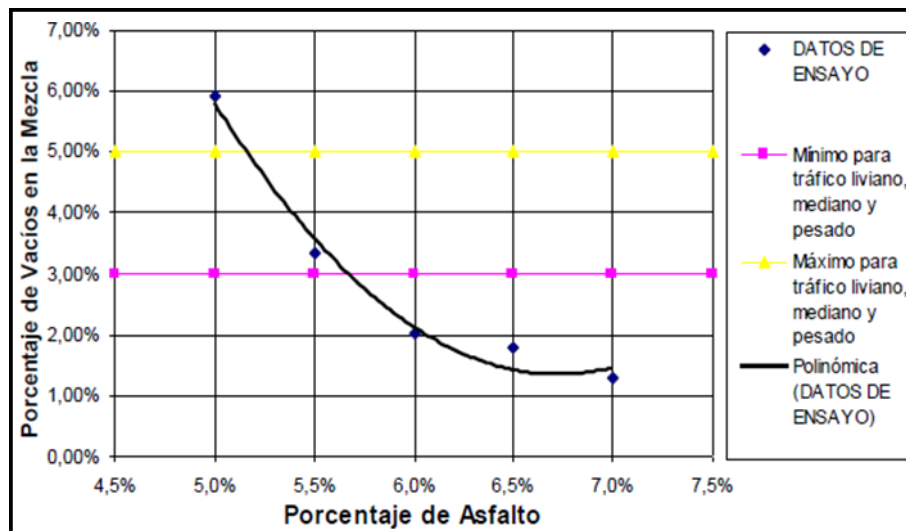
Fuente: (UMSS).

Gráfico 2.5 Curva de peso unitario vs. porcentaje de asfalto



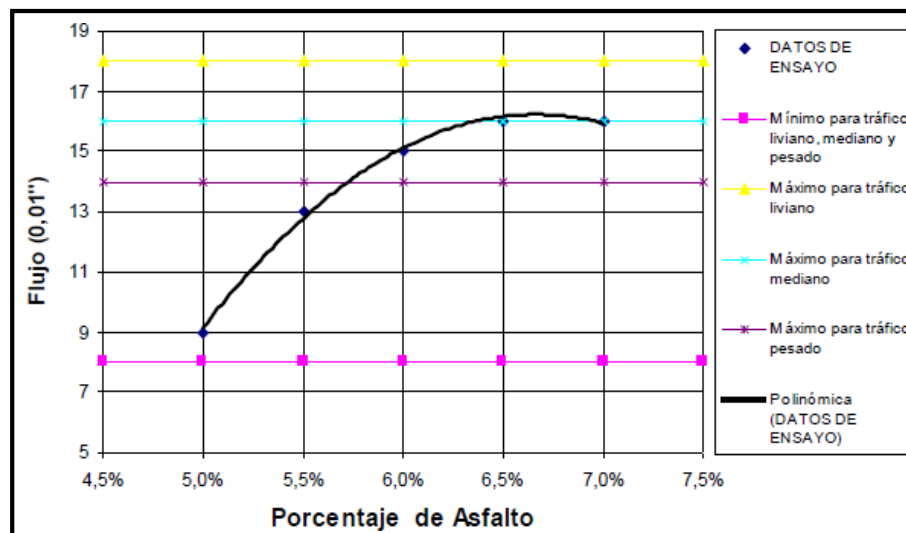
Fuente: (UMSS).

Gráfico 2.6 Curva porcentaje de vacíos en la mezcla vs. porcentaje de asfalto



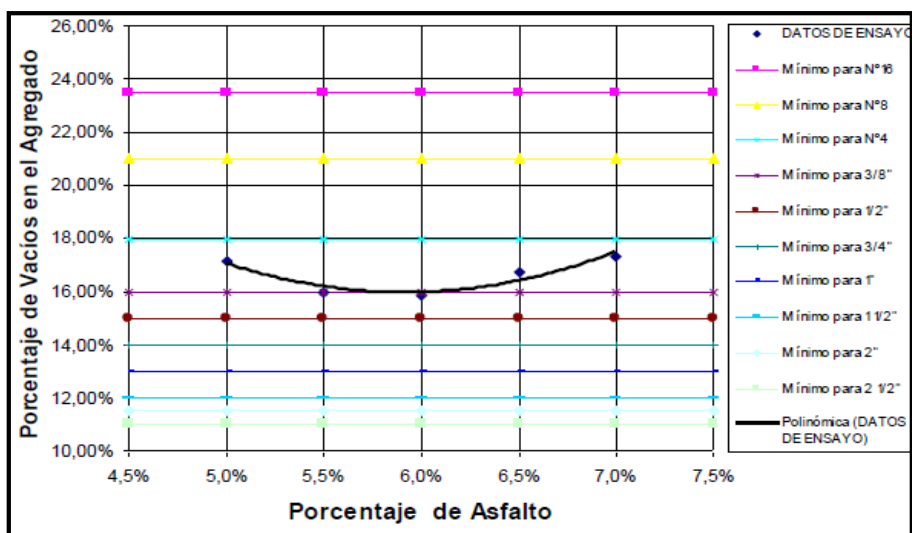
Fuente: (UMSS).

Gráfico 2.7 Curva flujo vs. porcentaje de asfalto



Fuente: (UMSS).

Gráfico 2.8 Curva porcentaje de vacíos en el agregado vs. porcentaje de asfalto



Fuente: (UMSS).

**CAPÍTULO III**

**MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EN**

**CALIENTE**

## CAPÍTULO III

### MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EN CALIENTE

#### 3.1 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Las posibilidades de técnicas actuales para el reciclado de materiales de carpetas asfálticas son muy amplias y variadas por consideraciones ambientales, de seguridad viaria y económicas.

Con la nueva (**orden circular 40/2017 sobre reciclado de firmes y pavimentos bituminosos**) de la secretaria general de infraestructuras y dirección general de carreteras ministerio de fomento España. se actualizan, con los que se año a año los artículos pueden abordar estas técnicas específicas de valorización de materiales deteriorados por el uso. Un aspecto significativo de esta actualización es que se amplían los tipos de actuación de estas unidades de obra, así como se posibilita el aumento de las proporciones de material reciclado a incorporar y se minoran, dentro de lo técnicamente posible, las características iniciales de los productos susceptibles de ser reciclados.

Por la disponibilidad de materiales a reciclar existentes, y en aras a una mayor y mejor valorización, se amplía el espectro de aplicación de estas técnicas a obras de acondicionamiento de trazado, de ensanche y mejora de plataforma o de ampliación de carriles.

La posibilidad de aplicación de las tres técnicas de reciclado especificadas en categorías de tráfico pesado más altas que las indicadas en la O.C. 8/2001. En esta última consideración se ha tenido muy en cuenta no sólo la experiencia acumulada de los últimos quince años, sino también la cantidad y calidad de la maquinaria de reciclado *in situ* disponible y de las centrales de fabricación con equipamiento específico para las diferentes opciones de reciclado en caliente y semi caliente existentes.

Por cuestiones de economía y de sostenibilidad, se incentiva un mayor aprovechamiento de los materiales reciclados de capas bituminosas, posibilitando el empleo de mayores proporciones de materiales reciclados con respecto a la masa total de la mezcla, en relación a la reglamentación vigente.

Se mejoran y se concretan significativamente los coeficientes de equivalencia de los materiales realizados con mezclas recicladas con respecto a las mezclas convencionales, de acuerdo a la experiencia y conocimientos adquiridos en estos años, así como al estado actual de las técnicas de reciclado.

La utilización en los reciclados *in situ* con cemento de equipos con dosificación en forma de lechada y con dosificador-distribuidor volumétrico de la misma con control programable, para obtener un material de mayor calidad, debido al mayor control del reciclado y a la fiabilidad de dosificación, y con menores riesgos ambientales y de seguridad y salud.

Serán de aplicación en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares para obras de carreteras en servicio de los tipos especificados los artículos:

Artículo 20. Reciclado *in situ* con emulsión de capas bituminosas.

Artículo 21. Reciclado *in situ* con cemento de capas de firme.

Artículo 22. Reciclado en caliente y semi caliente en central de capas bituminosas.

(orden circular 40/2017 sobre reciclado de firmes y pavimentos bituminosos)

Las técnicas de reciclado *in situ* en frío, con emulsión o con cemento, no podrán utilizarse en ningún caso en carreteras con categorías de tráfico pesado T00 y T0.

Se seguirán los criterios de aplicación de las técnicas de reciclado, que se recogen en la tabla 2, en función de la categoría de tráfico de las carreteras, así como lo indicado sobre dimensionamiento de la sección de la carpeta asfáltica.

*Tabla 3.1 Criterios de aplicación de las técnicas de reciclado*

| Tipo de reciclado    | Categoría de tráfico pesado |                         |                         |                           |                                      |
|----------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
|                      | T00                         | T0                      | T1                      | T2                        | T3 y T4                              |
| En central           | Reciclado +<br>10 cm (1)    | Reciclado +<br>8 cm (1) | Reciclado +<br>5 cm (2) | Reciclado +<br>5 cm (2,3) | Reciclado +<br>rodadura<br>(3,4 o 5) |
| In situ con emulsión |                             |                         | Reciclado +<br>8 cm (1) | Reciclado +<br>5 cm (2)   | Reciclado +<br>rodadura<br>(3,4 o 5) |
| In situ con cemento  |                             |                         | Reciclado +<br>MBC      | Reciclado +<br>MBC        | Reciclado +<br>MBC                   |

*Fuente. - (Orden circular 40/2017 sobre reciclado de firmes y pavimentos bituminosos)*

#### Rehabilitación de carpetas asfálticas.

- Espesor total mínimo de 8 o 10 cm, en doble capa, siendo 3 o 4 cm el espesor correspondiente a la capa de rodadura, según se trate de una mezcla discontinua o drenante respectivamente.
- Espesor total mínimo de 5 cm en capa única. Para el espesor mínimo se dispondrá una sola capa de mezcla bituminosa en caliente o semi caliente del tipo densa (D) o semi densa (S) de 5cm de espesor. En el caso de ser preceptiva una capa de rodadura drenante o discontinua, el espesor mínimo se elevará a 8 cm y se aplicará lo indicado en (1).
- Mezcla bituminosa en caliente o semi caliente del tipo densa (D) o semi densa (S) reciclada en central.
- Mezcla bituminosa en caliente o semi caliente del tipo densa (D) o semi densa (S).
- Micro aglomerado en frío.



## **3.2 RECICLADO DE CAPAS BITUMINOSAS**

### **Definición**

Se define como material bituminoso a reciclar (RAP), el procedente de la disgregación de capas de mezclas bituminosas (rodadura, intermedia o base), obtenido mediante fresado o demolición, eventual trituración y posterior tratamiento y clasificación. Este material debe estar compuesto por áridos de buena calidad y granulometría continua, cubiertos por betún asfáltico deteriorado.

Se define como reciclado en central de capas bituminosas la técnica de fabricación de mezclas bituminosas consistente en la utilización del RAP con la aportación de un betún asfáltico, áridos, polvo mineral, y eventualmente, aditivos, con los que se obtiene una mezcla bituminosa (caliente y semi caliente).

La fabricación de una mezcla bituminosa reciclada en central incluye las siguientes operaciones previas.

- Acopio del RAP procedente de carpetas bituminosas deterioradas.
- Tratamiento del RAP (eventual trituración, eliminación de elementos metálicos contaminantes y clasificación por capas, tamaño, aplicación, etc.).
- Caracterización y acopio del RAP tratado.
- Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo, con la adaptación de todos los materiales de aportación (áridos, ligante, etc.) a las características del árido y ligante procedente del RAP.

### **3.2.1 Tipos de mezclas bituminosas recicladas**

#### **En función de la temperatura**

En función de la temperatura necesaria para su fabricación y puesta en obra, las mezclas bituminosas recicladas en central se clasifican en calientes y semi calientes.

En estas últimas, el empleo de betunes especiales, aditivos u otros procedimientos, hace posible que la temperatura máxima a la salida del mezclador no sea superior a ciento cuarenta grados Celsius ( $\nless 140$  °C).

### En función de la proporción en masa de RAP

Una mezcla bituminosa reciclada contendrá una proporción en masa de RAP superior al quince por ciento ( $> 15\%$ ) de la masa total de la mezcla. Si dicha proporción es igual o inferior al quince por ciento ( $\leq 15\%$ ) se considerará dicho material como árido y ligante para la fabricación de mezclas tipo hormigón bituminoso especificadas.

Las mezclas bituminosas recicladas en central se clasifican como de tipo 1 (tasa baja), tipo 2 (tasa media) o tipo 3, en función de la proporción de RAP en la masa total de la mezcla, de acuerdo a lo indicado en la tabla 3.

*Tabla 3.2 Clasificación de las mezclas bituminosas recicladas*

| Tipo | Contenido de RAP                     |                 |
|------|--------------------------------------|-----------------|
|      | (% sobre la masa total de la mezcla) |                 |
|      | Límite inferior                      | Límite superior |
| 1    | $>15$                                | $\leq 30$       |
| 2    | $>30$                                | $\leq 60$       |
| 3    | $>60$                                | $\leq 80$       |

*Fuente. - Orden circular sobre reciclado de carpetas asfálticas España/OC402017*

### 3.3 UTILIZACIÓN DEL RAP

Todos los materiales recuperados de mezclas bituminosas podrán ser susceptibles de ser reciclados, incluidos los excedentes de fabricación de cualquier tipo de mezcla bituminosa que, sin presentar problemas de calidad en cuanto a sus componentes y envuelta, no hayan sido colocados en obra (material sobrante, rechazado en la extensión por baja temperatura, etc.), con las excepciones indican a continuación.

No podrán ser reciclados con las técnicas especificadas en este artículo aquellos materiales que procedan de pavimentos con deformaciones plásticas, o que contengan o se encuentren contaminados por sustancias potencialmente peligrosas. Tampoco lo

podrán ser aquellos materiales bituminosos que presenten en su composición sustancias procedentes de la destilación de productos carbonosos, asbesto-amianto, ni ningún otro que esté clasificado como peligroso, o que no cumpla la legislación ambiental y de seguridad y salud vigente.

### **Materiales:**

#### **Ligante hidrocarbonado de aportación**

El ligante de aportación será seleccionado en función de la proporción y las características del ligante deteriorado del RAP, de forma que al combinarse con éste se obtenga un ligante con características similares a las de la capa de rodadura a la que se destine la mezcla bituminosa reciclada, de la zona térmica en que se encuentre y de la categoría de tráfico pesado.

En las mezclas bituminosas recicladas, se realizará un estudio completo tanto del ligante deteriorado procedente del RAP como del ligante final. En este estudio se determinarán, además de la penetración con aguja y de los valores del punto de reblandecimiento.

#### **Áridos de aportación**

Los áridos de aportación a emplear en las mezclas bituminosas recicladas en central deberán cumplir las correspondientes especificaciones técnicas de una mezcla convencional.

#### **3.3.1 Características del RAP y su tratamiento**

A la central de fabricación podrán llegar materiales bituminosos procedentes de capas de rodadura de distintas características, los cuales se acopiarán para su eventual tratamiento y posterior utilización. En todo caso, el RAP acopiado no contendrá más de un veinte por ciento ( $\nless 20\%$ ) de mezclas bituminosas distintas.

Cuando contenga una proporción superior al veinte por ciento ( $>20\%$ ) de micro aglomerados en frío, mezclas bituminosas drenantes y discontinuas, deberá acopiarse de forma independiente y ser objeto de un estudio diferenciado de su aprovechamiento.

En principio, y como se especifica, todos los materiales procedentes de mezclas bituminosas en caliente pueden ser susceptibles de ser reciclados, con las excepciones

que se indican. Sobre los que contengan en su composición original adiciones modificadoras de la reología del ligante bituminoso o del comportamiento resistente de la mezcla bituminosa (fibras, productos elastoméricos, etc.), se hará un estudio especial ante una eventual emisión de contaminantes a la atmósfera durante el proceso de fabricación de la nueva mezcla.

El RAP que se incorpore al proceso de producción será homogéneo, no contendrá partículas de tamaño superior a veintidós milímetros ( $\neq 22$  mm) ni ningún tipo de elemento contaminante potencialmente peligroso, y estará totalmente caracterizado y referenciado. Si fuera necesario se someterá en la central a un tratamiento previo de trituración, eliminación de elementos metálicos contaminantes y homogeneización mediante clasificación, para convertirlo en material apto para su uso en una mezcla bituminosa reciclada. Estos procesos convertirán el producto original acopiado en un RAP tratado

### **Sustancias sólidas contaminantes**

El RAP tratado estará exento de materiales procedentes de residuos de construcción y demolición, y especialmente de aquellos que en la fabricación de la mezcla reciclada pudieran producir merma en sus propiedades o contaminación.

### **Ligante hidrocarbonado**

El ligante hidrocarbonado procedente del RAP tratado, deberá ser susceptible de mezclarse homogéneamente con el de aportación y dar lugar a un producto de características similares a los betunes especificados de una mezcla convencional.

### **Áridos**

Los áridos procedentes del RAP tratado no presentarán signos de meteorización y tendrán las propiedades de dureza y calidad semejantes a las exigidas a los áridos de aportación.

### **Tipo y composición de la mezcla**

La dotación total de ligante hidrocarbonado (el de aportación más el procedente del RAP), expresada en proporción en masa sobre el total de la mezcla, no será inferior en ningún caso al cuatro por ciento ( $\neq 4$  %) en capas intermedias y de base, y al cinco por ciento ( $\neq 5$  %) en capas de rodadura.

### **3.3.2 Instalaciones y tratamiento del RAP original**

Previamente a su acopio en la central de fabricación se procederá al tratamiento del RAP original, realizándose las operaciones que sean necesarias para su homogeneización y adecuada clasificación.

Si el RAP original contiene partículas de tamaño superior a veintidós milímetros ( $\neq 22$  mm) se someterá en la central a un tratamiento previo de trituración y mezclado, para lo que se usarán instalaciones de machaqueo que proporcionen un producto granular uniforme con la menor cantidad posible de elementos finos, entendiéndose como tales a aquellos de tamaño inferior a dos milímetros ( $< 2$  mm).

En el caso de que haya elementos contaminantes de tipo metálico se dotará a la instalación de un dispositivo específico para su detección y eliminación.

### **3.3.3 Consideraciones generales**

El RAP podrá emplearse en la misma obra de la que procede o acopiarse para su posterior utilización en otro lugar. Deberá llevarse un registro de la procedencia del RAP, identificando y acopiando por separado los materiales procedentes de mezclas bituminosas distintas. Se examinará la descarga al acopio desechando los materiales que a simple vista presenten elementos contaminantes.

También se acopiarán de forma independiente los materiales para los que sea necesario realizar un estudio diferenciado de su aprovechamiento, hasta su aceptación o rechazo. El RAP original se tratará y mezclará para su homogeneización y eventual descontaminación.

### **3.3.4 Caracterización de los acopios del RAP tratado**

Una vez tratado, el RAP se dispondrá en acopios homogéneos. Para que un acopio se considere homogéneo deberá quedar identificado y caracterizado. Los materiales que cumplan los criterios de homogeneidad se podrán acopiar juntos y podrán emplearse en la fabricación de mezcla bituminosa reciclada en central con una misma fórmula de trabajo.

Los acopios homogéneos de RAP serán considerados como lotes aislados, evitando que se mezclen y contaminen entre ellos. El volumen de cada uno de estos acopios será el

suficiente para garantizar, al menos, el trabajo de un día o la producción requerida si ésta es menor, con objeto de no cambiar la fórmula de trabajo y poder controlar e identificar adecuadamente la mezcla fabricada.

Los acopios deberán estar formados por tongadas horizontales de espesor no superior a un metro y medio ( $\neq 1,5$  m), en una zona bien drenada y, preferiblemente, pavimentada. Si se dispusieran sobre el terreno natural no se utilizarán sus quince centímetros (15 cm) inferiores. Deberá vigilarse su altura para evitar que el RAP se aglomere, especialmente con temperaturas elevadas, limitándose a tres metros ( $\neq 3$  m) cuando se prevean temperaturas superiores a los treinta grados Celsius ( $> 30^{\circ}\text{C}$ ).

Los acopios deberán estar cubiertos si las condiciones meteorológicas son desfavorables y el tiempo de almacenamiento se reducirá al mínimo posible para evitar que el contenido de humedad aumente en exceso.

### **3.3.5 Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo**

La fórmula de trabajo se fijará, según las características de los agregados y del ligante bituminoso, en cumplimiento de las especificaciones.

Proporción en masa de las fracciones del RAP tratado, referido a la masa total de mezcla bituminosa fabricada.

- Granulometría del árido contenido en las fracciones del RAP tratado y contenido de ligante hidrocarbonado del RAP, referido a la masa total del mismo.
- Granulometría de los áridos de la mezcla bituminosa fabricada.
- Tipo, características y dosificación del ligante hidrocarbonado de aportación, referido a la masa total de la mezcla bituminosa fabricada.
- Densidad mínima a alcanzar.

Además, se indicarán:

- Los tiempos a exigir para la mezcla del RAP y los áridos de aportación, y del conjunto con el ligante de aportación.

- Las temperaturas máxima y mínima y la humedad máxima del RAP en la tolva y en la báscula de dosificación a la entrada del mezclador.
- La temperatura máxima de calentamiento del árido de aportación.
- En el caso de que se empleen aditivos o adiciones, se indicarán las prescripciones sobre su incorporación.

Los tiempos de mezclado del RAP con los áridos y el ligante de aportación (y el eventual producto rejuvenecedor), vendrán determinados por la homogeneidad de la mezcla, la total desaparición de los nódulos del RAP y la integración de todos los ligantes presentes. El tiempo total de permanencia de la mezcla bituminosa reciclada en el mezclador será aquel que garantice un amasado uniforme homogéneo y eficaz (reblandecimiento del ligante deteriorado).

### **Control de procedencia del RAP**

Además de su caracterización en la carretera de la que provenga, el RAP tratado deberá serlo también en los acopios, especialmente cuando proceda de distintos orígenes, para lo que se tomarán muestras con objeto de analizar su homogeneidad y poder caracterizar dichos acopios. Se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se separará por fracciones el RAP tratado para poder garantizar la homogeneidad de la granulometría y del contenido de ligante.

Si a lo largo de la obra la composición o propiedades del RAP tratado o el contenido de ligante varían, dicho material se dispondrá en acopios separados, correctamente identificados y con la trazabilidad que permita identificar su procedencia.

Se determinará:

- Granulometría del material disgregado
- Contenido de ligante soluble.
- Granulometría de los áridos recuperados.
- Coeficiente de Los Ángeles del árido recuperado.
- Densidad y absorción de agua del árido grueso y fino recuperados.

- Penetración con aguja del ligante recuperado.
- Cohesión (fuerza-ductilidad, en el supuesto de que el RAP tuviera ligante modificado).

### **3.4 CARPETAS RECICLADAS REALIZADAS EN BOLIVIA**

#### **3.4.1 Reciclado de pavimentos flexibles in situ con cemento hidráulico en Bolivia**

En Bolivia desde hace pocos años, el Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (IBCH) cumple una labor de investigación.

Algunos proyectos ejecutados en Bolivia con similar metodología son: Tramo Cotoca-Paraíso. Tramo Río Seco-Desaguadero.

Reciclado de pavimentos flexibles con cemento hidráulico. aporta un incremento en la capacidad de soporte de la capa tratada. En Bolivia. Tramo Río Seco-Desaguadero- El tramo se halla ubicado en la RVF-001 (LP 05) del Departamento de La Paz, cruza las Provincias de Murillo, Los Andes e Ingavi. Los municipios de mayor importancia son: La Paz, El Alto, Laja, Tiahuanaco, Guaqui y Desaguadero.

Reciclado de pavimentos flexibles en Bolivia. Tramo Río Seco-Desaguadero- La obra consiste en rehabilitar la carretera que comunica las ciudades de La Paz, en Bolivia, con Desaguadero (ciudad fronteriza con Perú), concretamente el tramo Río Seco-Desaguadero, de 97.41 Km.

El objetivo del proyecto a través del Programa Puesta a Punto de Carreteras (PPP) es el de reponer y mejorar la infraestructura del tramo Río Seco Desaguadero, dejándolo en óptimas condiciones de servicio. Contratista: Saglas Obras y Servicios Cliente: ABC (Administradora Boliviana de Carreteras) Plazo de Ejecución: 22 meses Presupuesto: 19.269.828,13 (25.734.863,28 US\$). (Laura, Reciclado de pavimentos flexibles en Bolivia , 2016)

Tramo: Río Seco - Desaguadero



Expositor: Ing. Roger Flores Laura

### **3.4.2 Revista del instituto de ensayo de materiales**

Se analiza una de las propiedades más importantes de los cementos asfálticos, esta es la viscosidad las propiedades reológicas del asfalto dependen de las proporciones en que están presentes sus componentes, las cuales van variando de acuerdo al origen de los crudos de petróleo, el comportamiento reológico del asfalto tiene una influencia significativa en las propiedades de la mezcla asfalto- agregado (ahuellamiento, fatiga y susceptibilidad térmica),se analizaron cementos asfálticos convencionales de diferentes orígenes utilizados en distintos proyectos viales del país, caracterizándolos por penetración y por viscosidad (mediante el uso de viscosímetros capilares), contrastándolos resultados con diferentes normas vigentes, definiendo a partir de este análisis no solo las temperaturas de mezclado y compactación sino con el fin principal seleccionar el cementos asfáltico adecuado para su uso en el altiplano, de igual forma clasificar los cementos asfálticos estudiados, de acuerdo a su viscosidad, determinando s correspondiente aplicación en determinadas regiones. (Mansilla, 2016)

Carrera de ingeniería civil (Investigacion y desarrollo)

Ingeniero Hugo Mansilla r. 1946-2016

La Paz- Bolivia, noviembre de 2016 N°10

Director :Msc Ing. Oscar Luis Pérez

Instituto de Ensayo de Materiles

E-mail:[iem@umsa.bo](mailto:iem@umsa.bo)

Web:[www.iem.umsa.bo](http://www.iem.umsa.bo)

E-mail: [visiongraficapublicidad@yahoo.es](mailto:visiongraficapublicidad@yahoo.es)

**CAPÍTULO IV**  
**DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

## **CAPÍTULO IV**

### **DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **4.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EN CALIENTE CON APORTE DE RAP**

Este capítulo describe el proceso para realizar una mezcla asfáltica convencional en caliente con aportación de RAP (material bituminoso a reciclar, el procedente de la disgregación de carpetas asfálticas), queriendo demostrar que al adicionar el RAP puede ser una alternativa muy favorable para el medio ambiente ,cuyas propiedades son iguales o mejores que una mezcla asfáltica convencional, entonces, ahora es importante estudiar y evaluar el comportamiento de mezclas recicladas, adecuándolas al alcance real que tiene nuestra ciudad, en este proyecto de investigación no se hará uso de aditivos con el objetivo de no contaminar nuestras mezclas convencionales hasta el punto de no poder reutilizarlas y terminando así con el reciclado limpio.

Las mezclas asfálticas recicladas serán analizadas por el comportamiento y la comparación de las propiedades mecánicas con una mezcla asfáltica convencional.

#### **4.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA**

##### **Ubicación en el contexto nacional**

El departamento de Tarija, se encuentra ubicado al sur de Bolivia, limita al Norte con el departamento de Chuquisaca, al sur con la Republica de Argentina, al Este con la República del Paraguay y al Oeste con los departamentos de Chuquisaca y Potosí

Figura 4.1 Mapa político del Estado Plurinacional de Bolivia.



Fuente: <https://bo.reyqui.com/2012/10/mapa-politico-de-bolivia.html>.

Ubicación en el contexto departamental

La provincia de Cercado, se sitúa al noreste del departamento de Tarija, entre los paralelos de 20°56'; 21°36' de latitud Sur y los 64°05'; 65°13' de longitud Oeste, tiene una extensión de 4861 km<sup>2</sup>.

Figura 4.2 Mapa político del departamento de Tarija.



Fuente: <https://bo.reyqui.com/search/label/Tarija%20Bolivia>.

### Ubicación en el contexto regional

El proyecto de investigación se encuentra ubicado en la ciudad de Tarija en el campus universitario de la U.A.J.M.S.

Figura 4.3 Mapa de la provincia Cercado.



Fuente: <http://www.educa.com.bo/sites/default/files/tarija-provincia-Cercado-0116.jpg>.

## Ubicación del banco de materiales

Figura 4.4 Ubicación de la comunidad de La Pintada -Tarija.



Fuente: <https://www.GoogleEarth.jpg>

Figura 4.5 Ubicación planta asfáltica C.I.B.E.R de la Alcaldía Municipal de Tarija-La Pintada.



Fuente: <https://www.GoogleEarth.jpg>.

### **4.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE LA MEZCLA**

#### **4.3.1 Características del banco de materiales**

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales en los cuales nos proporciona una seguridad para el diseño que se realice, para el trabajo de investigación se utilizara los agregados de la chancadora Garzón cuyo material es procedente de San Mateo, el cual tiene una gran cantidad de áridos que cumplen con las especificaciones para el trabajo de investigación, la comunidad de San Mateo se encuentra a 5 kilómetros de la ciudad de Tarija, esta comunidad se dedica mayormente a la agricultura, a continuación se muestralas imágenes de la chancadora Garzón

*Figura 4.6 Chancadora Garzón.*



*Fuente: Elaboración propia.*

### **4.4 MUESTREO DE LOS MATERIALES PARA UNA MEZCLA ASFÁLTICA**

Para la obtención de los agregados que se utilizara en la mezcla asfáltica en caliente , que serán materiales provenientes de la chancadora Garzón ubicada en San Mateo, en cantidades lo suficientemente necesario para realizar su caracterización y el estudio de las mezclas asfálticas convencional, se realizó la extracción de la muestra de los áridos con la

ayuda de una pala de los tres acopios de grava, gravilla y arena que tiene almacenado la Alcaldía Municipal de Tarija en la zona de la Pintada carretera al Valle, se tomó la muestra, tanto de arriba del centro y de abajo para que este sea homogénea, la muestra y se la puso en bolsas de azúcar, para trasladarlas hasta las instalaciones del laboratorio ubicados en el lugar antes mencionado.

*Figura 4.7 Acopio de grava.*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.8 Acopio de la arena y de gravilla.*



*Fuente: Elaboración propia*



El cemento asfáltico fue proporcionado por la Alcaldía Municipal, de la Planta Asfáltica de la Pintada, es un asfalto 85/100 de procedencia colombiana, que se encuentra almacenado en el mismo lugar.

*Figura 4.9 Cemento asfáltico 85/100 procedencia colombiana.*



*Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.5 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS NUEVOS**

Para la caracterización de los agregados que serán utilizadas en el estudio de mezclas asfálticas convencionales, se realizaron los ensayos según las normas ASTM y AASHTO, en el laboratorio de la Alcaldía Municipal de Tarija.

Se realizará los ensayos para los agregados pétreos:

- Grava de 3/4"
- Grava de 3/8" (gravilla o agregado intermedio)
- Arena triturada

#### **4.5.1 Ensayos de granulometría (ASTM C 33 AASHTO T 27)**

##### **Objetivo método granulométrico**

Este método de ensayo tiene por objetivo determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente.

Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo el procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizará las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra.

Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (granulometría).

Las mallas de prueba que se usan comúnmente para los proyectos de carreteras son aquellas con aberturas de 2 $\frac{1}{2}$ " , 2" , 1 $\frac{1}{2}$ " ,  $\frac{3}{4}$ " ,  $\frac{1}{2}$ " , 3/8" de pulgada cuadrada para las fracciones grandes y con 4, 10, 40, 80, 100 y 200 mallas por pulgada para las fracciones más pequeñas. Estas últimas mallas se designan como N°4, N°10, etc.

A la porción de material agregado que queda retenida en la malla No.10 (esto es, con partículas mayores de 2,00 mm) se le conoce como agregado grueso. Al material que pasa por la malla N°10 pero queda retenido en la malla N°200 (partículas mayores que 0.075 mm) se le conoce como agregado fino. El material que pasa por la malla N°200 se llama fino y corresponde a impurezas, limo y arcilla.

En el manual de la administradora boliviana de carreteras se dan los procedimientos detallados para ejecutar un análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

## Procedimiento

*Figura 4.10 Cuarteo del agregado grueso “grava” y pesaje*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.11 Juego de tamices con la muestra en el vibrador o raptor*



*Fuente: Elaboración propia.*

## Resultados de la práctica

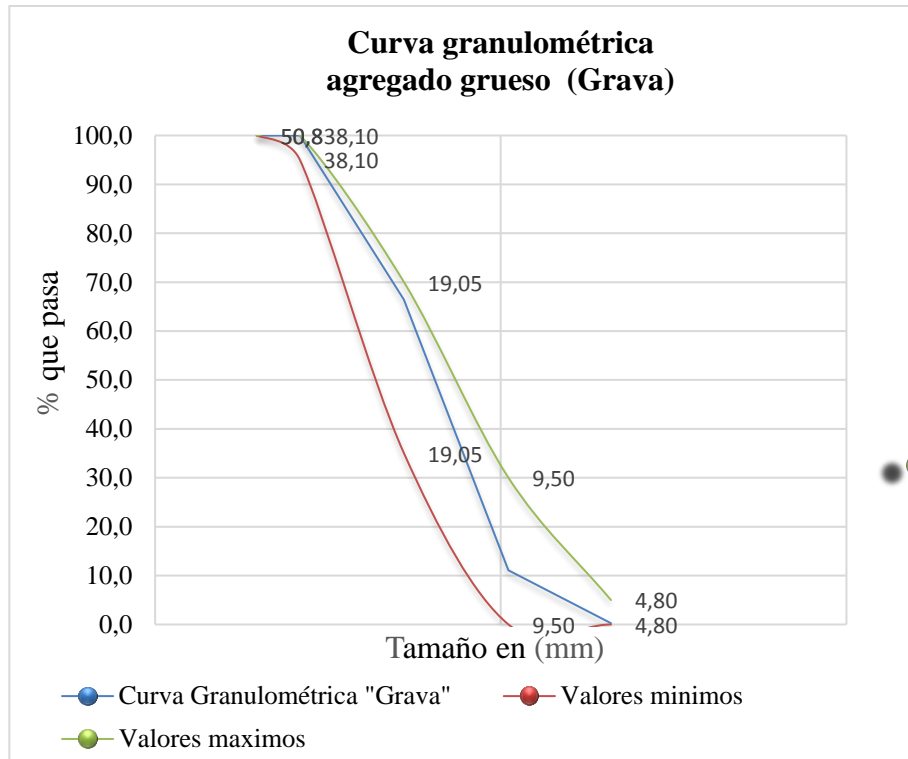
En los resultados de las tablas que se muestran más adelante, solo estará uno de los 3 ensayos realizados para cada agregado, en este caso agregado grueso (grava y gravilla) y agregado fino (arena)

Tabla 4.1 Granulometría del agregado grueso (grava).

| <b>Peso total (gr) 1000</b> |               |                  |                               |                                 |                           |     |     |
|-----------------------------|---------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-----|-----|
| <b>Tamices</b>              | <b>Tamaño</b> | <b>Peso Ret.</b> | <b>Retenido<br/>Acumulado</b> | <b>% Que pasa<br/>del total</b> | <b>% Que pasa s/g</b>     |     |     |
|                             | <b>(mm)</b>   | <b>(gr)</b>      | <b>(gr)</b>                   | <b>(%)</b>                      | <b>Especif. ASTM C-33</b> |     |     |
| 2 1/2"                      | 63,00         | 0,00             | 0,00                          | 0,00                            | <b>100,00</b>             | -   | -   |
| 2"                          | 50,80         | 0,00             | 0,00                          | 0,00                            | <b>100,00</b>             | 100 | 100 |
| 1 1/2"                      | 38,10         | 0,00             | 0,00                          | 0,00                            | <b>100,00</b>             | 95  | 100 |
| 1"                          | 25,40         | 0,00             | 0,00                          | 0,00                            | <b>100,00</b>             | -   | -   |
| 3/4"                        | 19,05         | 3356,80          | 3356,80                       | 33,57                           | <b>66,40</b>              | 35  | 70  |
| 1/2"                        | 12,50         | 3479,20          | 6836,00                       | 68,36                           | <b>31,60</b>              | -   | -   |
| 3/8"                        | 9,50          | 2052,70          | 8888,70                       | 88,89                           | <b>11,10</b>              | 10  | 30  |
| Nº4                         | 4,80          | 1085,10          | 9973,80                       | 99,74                           | <b>0,30</b>               | 0   | 5   |
| Base                        | 0             | 26,20            | 10000,00                      | 100,00                          | <b>0,00</b>               | -   | -   |
| <b>Suma</b>                 |               | 10000,00         |                               |                                 |                           |     |     |
| <b>Pérdida</b>              |               | 0,00             |                               |                                 |                           |     |     |
| <b>Mf</b>                   |               | 7,22             |                               |                                 |                           |     |     |

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1 Curva granulométrica del agregado grueso (grava)



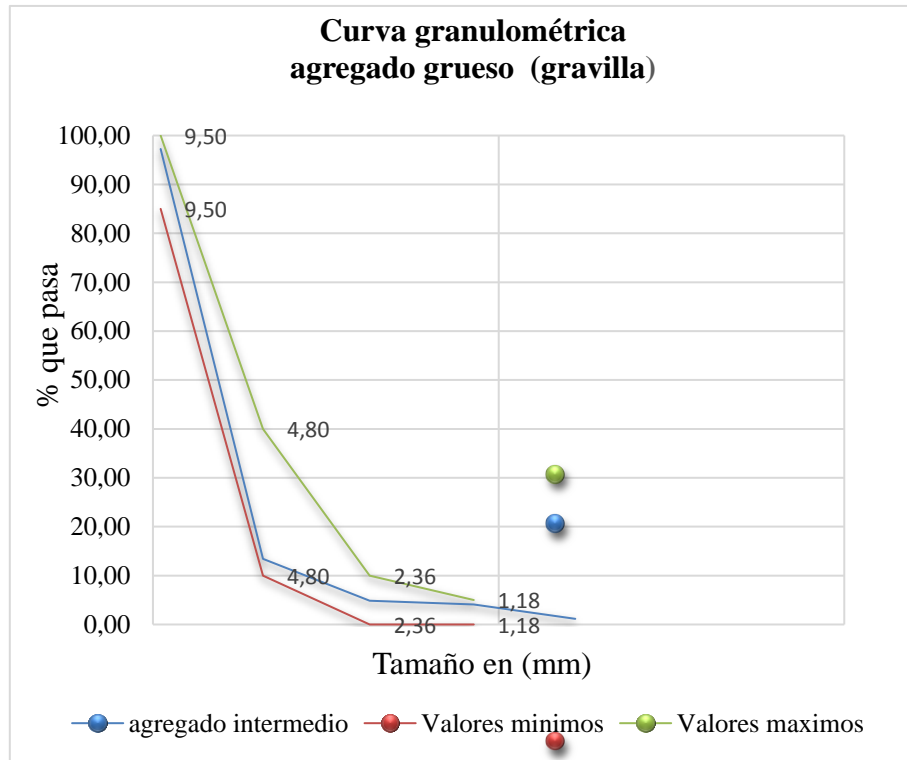
*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 4.2 Granulometría agregado grueso(gravilla)

| <b>Peso Total (gr.) 5000</b> |                 |                  |                           |            |                             |                           |     |
|------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------|------------|-----------------------------|---------------------------|-----|
| <b>Tamices</b>               | <b>Tamaño</b>   | <b>Peso Ret.</b> | <b>Retenido Acumulado</b> |            | <b>% Que pasa del total</b> | <b>% Que pasa s/g</b>     |     |
|                              | <b>(mm)</b>     | <b>(gr)</b>      | <b>(gr)</b>               | <b>(%)</b> |                             | <b>Especif. ASTM C-33</b> |     |
| ½”                           | 12,50           | 0,00             | 0,00                      | 0,00       | <b>100,00</b>               |                           |     |
| 3/8”                         | 9,50            | 137,90           | 137,90                    | 2,76       | <b>97,24</b>                | 0                         | 100 |
| Nº4                          | 4,80            | 4191,70          | 4329,60                   | 86,59      | <b>13,41</b>                | 85                        | 100 |
| Nº8                          | 2,36            | 427,90           | 4757,50                   | 95,15      | <b>4,85</b>                 | 10                        | 40  |
| Nº16                         | 1,18            | 38,90            | 4796,40                   | 95,93      | <b>4,07</b>                 | 0                         | 10  |
| Nº30                         | 0,60            | 145,60           | 4942,00                   | 98,84      | <b>1,16</b>                 | 0                         | 5   |
| Base                         | 0               | 55,80            | 4997,80                   | 99,96      | <b>0,00</b>                 | -                         | -   |
|                              | <b>Suma</b>     | 4997,80          |                           |            |                             |                           |     |
|                              | <b>Pérdidas</b> | 2,20             |                           |            |                             | <b>Tamaño máx. =3/8”</b>  |     |
|                              | <b>Mf</b>       | <b>5,89</b>      |                           |            |                             |                           |     |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.2 Curva granulométrica del agregado grueso (gravilla)



*Fuente: Elaboración propia.*

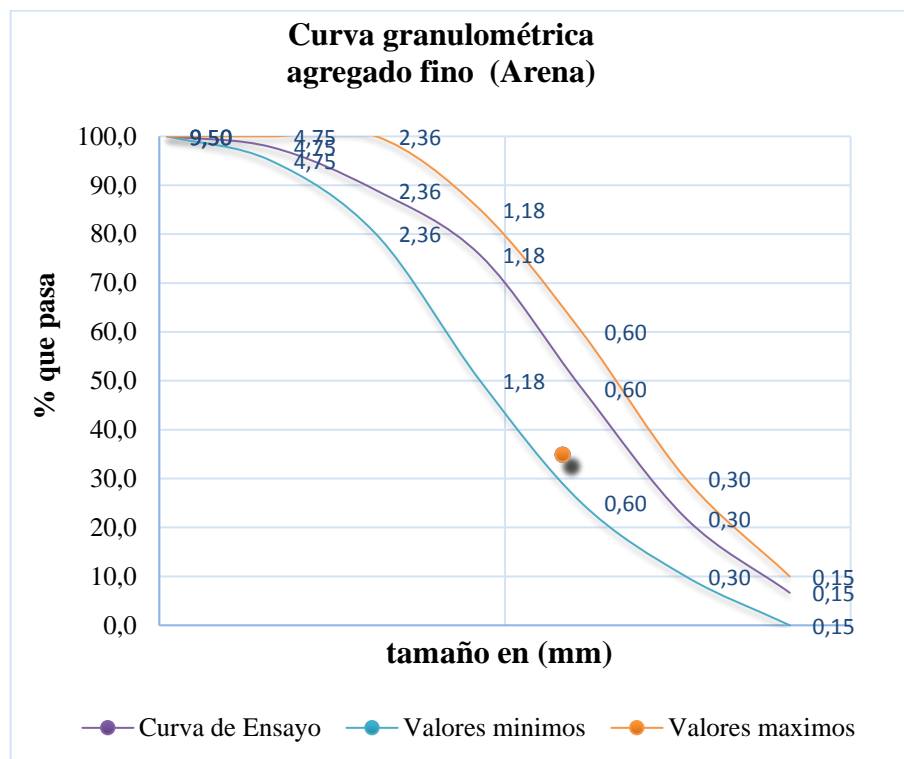
Tabla 4.3 Granulometría agregado fino (arena)

| <b>Peso Total (gr.) 2000</b> |                |                  |                           |            |                             |                           |     |  |
|------------------------------|----------------|------------------|---------------------------|------------|-----------------------------|---------------------------|-----|--|
| <b>Tamices</b>               | <b>Tamaño</b>  | <b>Peso Ret.</b> | <b>Retenido Acumulado</b> |            | <b>% Que pasa del total</b> | <b>% Que pasa s/g</b>     |     |  |
|                              | <b>(mm)</b>    | <b>(gr)</b>      | <b>(gr)</b>               | <b>(%)</b> | <b>(%)</b>                  | <b>Especif. ASTM C-33</b> |     |  |
| 3/8"                         | 9,50           | 0,00             | 0,00                      | 0,00       | <b>100,00</b>               | 100                       | 100 |  |
| N°4                          | 4,75           | 44,00            | 44,00                     | 2,20       | <b>97,80</b>                | 95                        | 100 |  |
| N°8                          | 2,36           | 176,60           | 220,60                    | 11,03      | <b>89,00</b>                | 80                        | 100 |  |
| N°16                         | 1,18           | 265,20           | 485,80                    | 24,29      | <b>75,70</b>                | 50                        | 85  |  |
| N°30                         | 0,60           | 544,40           | 1030,20                   | 51,51      | <b>48,50</b>                | 25                        | 60  |  |
| N°50                         | 0,30           | 531,40           | 1561,60                   | 78,08      | <b>21,90</b>                | 10                        | 30  |  |
| N°100                        | 0,15           | 305,50           | 1867,10                   | 93,36      | <b>6,60</b>                 | 2                         | 10  |  |
| Base                         |                | 132,90           | 2000,00                   | 100,00     | <b>0,0</b>                  | -                         | -   |  |
|                              | <b>Suma</b>    | 2000,0           |                           |            |                             |                           |     |  |
|                              | <b>Pérdida</b> | 0,00             | <b>Tamaño Max =N°4"</b>   |            |                             |                           |     |  |
|                              | <b>Mf</b>      | 2,64             |                           |            |                             |                           |     |  |

Fuente: Elaboración propia.



Gráfico 4.3 Curva granulométrica del agregado fino (arena).



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.2 Ensayo de equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T 176-00)

##### Objetivo

El ensayo de equivalente de arena y agregados finos asigna un valor empírico a la cantidad relativa y características del material fino que está presente en una muestra de ensayo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75MM). El equivalente de arena es una relación de la altura de arena con arena con respecto del material y tamizado por el tamiz N°4 para poder tener la muestra que se utilizara para este ensayo colocarlo en un recipiente. Luego se debe de colocar la muestra que se utilizara de arena en el cilindro, se deberá verter la muestra en el cilindro con la ayuda de un embudo y hacer momento del cilindro para que se puedan perder todas las burbujas que tenga, dejar en reposo durante  $10 \pm 1$  minuto.

Colocar el tubo irrigador en la parte superior del cilindro y lavar el material de las paredes del cilindro.

Dejar el cilindro y el contenido en reposo por  $20 \text{ min} \pm 15\text{s}$ .

Comenzar a medir el tiempo inmediatamente después de retirar el tubo irrigador. Al finalizar los 20 min del periodo de sedimentación, leer y anotar los niveles alcanzados.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el manual de la Administración Boliviana de Carreteras (ABC)

### **Procedimiento**

*Figura 4.12 Probetas y materiales para el ensayo*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.13 Probetas después de la mezcla*



*Fuente: Elaboración propia.*

Figura 4.14 Mezclando de la muestra con agua y el defloculante



Fuente: Elaboración propia.

## Resultados. -

Tabla 4.4 Datos del ensayo de equivalente de arena

| Ensayo                       | Lecturas |       |      |
|------------------------------|----------|-------|------|
| Ensayo N°                    | 1        | 2     | 3    |
| Lectura nivel superior       | 10,40    | 10,20 | 9,90 |
| Lectura nivel inferior       | 9,90     | 9,80  | 9,40 |
| Número de ensayos realizados | 3        |       |      |

Fuente: Elaboración propia.

**Cálculo: -**

Utilizaremos el promedio para realizar los cálculos:

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

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{9,90}{10,40} * 100$$

$$\text{Equivalente de arena} = 95,19\%$$

*Tabla 4.5 Resultados del ensayo equivalente de arena*

| <b>Descripción</b> | <b>Ensayo</b> |          |          |
|--------------------|---------------|----------|----------|
|                    | <b>1</b>      | <b>2</b> | <b>3</b> |
| % de arena         | 95,19         | 96,08    | 94,95    |
| Promedio           | 95,41 %       |          |          |

*Fuente: Elaboración propia.*

### **4.5.3 Ensayo de peso unitario de los agregados (ASTM C 29 AASHTO T 19 M-00)**

#### **Objetivo**

El peso unitario de unos áridos dados puede determinarse sobre volumen suelto o sobre volumen compactado. Para ello se emplea un recipiente cilíndrico de volumen conocido. Los volúmenes empleados son normalmente 0,1-0,5,1,00 pies<sup>3</sup> (2.83-14.16-28.31 litros), según el tamaño de los áridos ensayados. Para medir el peso unitario con áridos sueltos se llena el recipiente por un procedimiento normalizado y se determina el peso de los áridos contenidos en el recipiente lleno. Para medir el peso compactado se llena el recipiente en tres capas aproximadamente iguales, aplicando a cada capa determinados procedimientos de agitación o apisonado según el tamaño de los áridos empleados en el ensayo. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el Manual de la Administración de Carreteras (ABC).

#### **Procedimiento**

Figura 4.15 Materiales para el ensayo, molde de 3 L, varilla y la muestra de arena



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.16 Volumen suelto de arena



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.17 Materiales para el ensayo, molde de 10 L, varilla y la muestra de grava



Fuente: Elaboración propia.

*Figura 4.18 Volumen suelto de la grava*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.19 Volumen compactado de la grava*



*Fuente: Elaboración propia*

*Figura 4.20 Enrazando con la varilla para la obtención del peso*



*Fuente: Elaboración propia*

**Resultados.-***Tabla 4.6 Datos del ensayo de peso unitario de la arena suelta*

| <b>Peso unitario suelto</b> |                        |                           |                                     |                            |                             |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Muestra N°</b>           | <b>Peso recipiente</b> | <b>Volumen recipiente</b> | <b>Peso recip. + muestra suelta</b> | <b>Peso muestra suelta</b> | <b>Peso unitario suelto</b> |
|                             | <b>(gr)</b>            | <b>(cm<sup>3</sup>)</b>   | <b>(gr)</b>                         | <b>(gr)</b>                | <b>(gr/cm<sup>3</sup>)</b>  |
| 1                           | 2605                   | 3000                      | 7010                                | 4405                       | 1,468                       |
| 2                           | 2605                   | 3000                      | 7180                                | 4575                       | 1,525                       |
| 3                           | 2605                   | 3000                      | 7410                                | 4805                       | 1,602                       |
| <b>Promedio</b>             |                        |                           |                                     |                            | <b>1,532</b>                |

*Fuente: Elaboración propia**Tabla 4.7 Datos del ensayo de peso unitario de la arena compactada*

| <b>Peso unitario compactado</b> |                        |                           |                                     |                            |                             |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Muestra N°</b>               | <b>Peso recipiente</b> | <b>Volumen recipiente</b> | <b>Peso recip. + muestra suelta</b> | <b>Peso muestra suelta</b> | <b>Peso unitario suelto</b> |
|                                 | <b>(gr)</b>            | <b>(cm<sup>3</sup>)</b>   | <b>(gr)</b>                         | <b>(gr)</b>                | <b>(gr/cm<sup>3</sup>)</b>  |
| 1                               | 2605                   | 3000                      | 798                                 | 5375                       | 1,792                       |
| 2                               | 2605                   | 3000                      | 7835                                | 5230                       | 1,743                       |
| 3                               | 2605                   | 3000                      | 8050                                | 5445                       | 1,815                       |
| <b>Promedio</b>                 |                        |                           |                                     |                            | <b>1,783</b>                |

*Fuente: Elaboración propia***Proceso de cálculo de peso unitario:**

$$\text{peso unitario} = \frac{\text{peso del agregado grueso}}{\text{volumen del recipiente}}$$

$$\text{peso unitario} = \frac{4405,05}{3000}$$

$$\text{peso unitario} = 1,468 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Para los demás ensayos se realizó los mismos procedimientos de cálculo.

*Tabla 4.8 Datos de peso unitario de la gravilla 3/8".*

| <b>Peso unitario suelto</b> |                            |                               |   |                                    |                                     |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Muestra<br/>N°</b>       | <b>Peso<br/>recipiente</b> | <b>Volumen<br/>recipiente</b> | <b>Peso Recip.<br/>+ muestra<br/>suelta</b> | <b>Peso<br/>muestra<br/>suelta</b> | <b>Peso<br/>unitario<br/>suelto</b> |
|                             | <b>(gr)</b>                | <b>(cm<sup>3</sup>)</b>       | <b>(gr)</b>                                 | <b>(gr)</b>                        | <b>(gr/cm<sup>3</sup>)</b>          |
| 1                           | 5655                       | 10000                         | 19290                                       | 13635                              | 1,364                               |
| 2                           | 5655                       | 10000                         | 19280                                       | 13625                              | 1,363                               |
| 3                           | 5655                       | 10000                         | 19410                                       | 13755                              | 1,376                               |
| <b>Promedio</b>             |                            |                               |   |                                    | <b>1,367</b>                        |

*Fuente: Elaboración propia.*



Tabla 4.9 Resultado del ensayo de gravilla 3/8".

| <b>Peso unitario compactado</b> |                    |                       |                                    |                           |                            |
|---------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Muestra<br>N°                   | Peso<br>recipiente | Volumen<br>recipiente | Peso Recip.<br>+ muestra<br>suelta | Peso<br>muestra<br>suelta | Peso<br>unitario<br>suelto |
|                                 | (gr)               | (cm <sup>3</sup> )    | (gr)                               | (gr)                      | (gr/cm <sup>3</sup> )      |
| 1                               | 5655               | 10000                 | 20425                              | 14770                     | 1,477                      |
| 2                               | 5655               | 10000                 | 20455                              | 14800                     | 1,480                      |
| 3                               | 5655               | 10000                 | 20460                              | 14805                     | 1,481                      |
| <b>Promedio</b>                 |                    |                       |                                    |                           | <b>1,479</b>               |

*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 4.10 Datos del peso unitario de la grava 3/4".

| <b>Peso unitario suelto</b> |                    |                       |                                    |                           |                            |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Muestra N°                  | Peso<br>recipiente | Volumen<br>recipiente | Peso recip.<br>+ muestra<br>suelta | Peso<br>muestra<br>suelta | Peso<br>unitario<br>suelto |
|                             | (gr)               | (cm <sup>3</sup> )    | (gr)                               | (gr)                      | (gr/cm <sup>3</sup> )      |
| 1                           | 5655               | 10000                 | 19927                              | 14272                     | 1,427                      |
| 2                           | 5655               | 10000                 | 19878                              | 14223                     | 1,422                      |
| 3                           | 5655               | 10000                 | 19896                              | 14241                     | 1,424                      |
| <b>Promedio</b>             |                    |                       |                                    |                           | <b>1,425</b>               |

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 4.11 Resultados del ensayo de grava 3/4".

| <b>Peso unitario compactado</b> |                            |                               |   |                                    |                                     |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Muestra N°</b>               | <b>Peso<br/>recipiente</b> | <b>Volumen<br/>recipiente</b> | <b>Peso recip.<br/>+ muestra<br/>suelta</b> | <b>Peso<br/>muestra<br/>suelta</b> | <b>Peso<br/>unitario<br/>suelto</b> |
|                                 | <b>(gr)</b>                | <b>(cm<sup>3</sup>)</b>       | <b>(gr)</b>                                 | <b>(gr)</b>                        | <b>(gr/cm<sup>3</sup>)</b>          |
| 1                               | 5655                       | 10000                         | 21036                                       | 15381                              | 1,538                               |
| 2                               | 5655                       | 10000                         | 21045                                       | 15390                              | 1,539                               |
| 3                               | 5655                       | 10000                         | 20895                                       | 15240                              | 1,524                               |
| <b>Promedio</b>                 |                            |                               |   |                                    | <b>1,534</b>                        |

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.5.4 Ensayo peso específico del agregado fino (ASTM C 128 AASHTO T 84)

##### Objetivo

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 2 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, este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos finos.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el manual de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

##### Procedimiento

*Figura 4.21 Muestra saturada*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.22 Introduciendo la muestra en el cono en 3 capas con 25 golpes y enrasando después del secado*



*Fuente: Elaboración propia*

*Figura 4.23 Verificación que la Muestra de Arena seca*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.24 Vaciado de la muestra en el matraz*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.25 Llenando de agua al matraz con muestra*



*Fuente: Elaboración propia*

*Figura 4.26 Agitando el matraz y vaciando en un plato toda la muestra esté listo para introducir al horno y pesar posteriormente*



*Fuente: Elaboración propia.*

## Resultados

Tabla 4.12 Datos del ensayo peso específico del agregado fino

| Muestra N° | Peso muestra "B" (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                   | 177,50              | 962,80                       | 285,30   | 483,40                       | 500,00                      |
| 2          | 500                   | 177,50              | 968,40                       | 290,90   | 487,30                       | 500,00                      |
| 3          | 500                   | 177,50              | 969,60                       | 292,10   | 485,25                       | 500,00                      |

Fuente: Elaboración propia

### Cálculos:

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{A}{V - W}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{463,40}{500 - 312,80}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = 2,25 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$P.E.A. \text{ saturado superficial seco} = \frac{B}{V - W}$$

$$P.E.A. \text{ saturado superficial seco} = \frac{500}{500 - 285,30}$$

$$P.E.A. \text{ saturado superficial seco} = 2,25 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{((V - W) - (B - A))}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{500}{((500 - 285,3) - (500 - 483,4))}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,25 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

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

$$\% \text{ de absorcion} = \frac{500 - 483,4}{483,4} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorcion} = 3,32\%$$

Para la muestra 2 y 3 se realizará el mismo procedimiento.

*Tabla 4.13 Resultados del ensayo de peso específico del agregado fino*

| Muestra N° | P. E. a granel (gr/cm <sup>3</sup> ) | P. E. saturado con sup. Seca (gr/cm <sup>3</sup> ) | P.E. aparente (gr/cm <sup>3</sup> ) | % de absorción |
|------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|----------------|
| 1          | 2,25                                 | 2,33   | 2,44                                | 3,32           |
| 2          | 2,33                                 | 2,39   | 2,48                                | 2,54           |
| 3          | 2,33                                 | 2,41   | 2,51                                | 2,95           |
| Promedio   | <b>2,31</b>                          | <b>2,38</b>  | <b>2,48</b>                         | <b>2,94</b>    |

*Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.5.5 Ensayo peso específico del agregado grueso (ASTM C 127 AASHTO T 85)**

##### **Objetivos**

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos grueso. Para este ensayo se realizó la medición del peso específico para la gravilla 3/8" y para la grava 3/4". La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas. Se seca a continuación en un horno a 100°C a 110°C. Después se lo sumerge en agua, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño a continuación, se determina el peso de la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergido en agua, a la temperatura de 25°C de temperatura ambiente. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el manual de la Administración de Carreteras (ABC).

## Procedimiento

*Figura 4.27 Muestra saturada*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.28 Introducción la muestra al canastillo para luego obtener el peso de la muestra saturada, peso sumergido y con superficie seca.*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.29 Vaciado de la muestra saturada en un recipiente para secado en horno y proceder al pesaje.*



*Fuente: Elaboración propia.*

## Resultados

Tabla 4.14 Datos del ensayo de peso específico de la grava 3/4".

| Muestra N° | Peso muestra secada "A" (gr) | Peso muestra saturada con sup. seca "B" (gr) | Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr) |
|------------|------------------------------|--|--|
| 1          | 4748,30                      | 4790,80                                      | 2945,87  |
| 2          | 5003,00                      | 5086,70                                      | 3105,60  |
| 3          | 4976,20                      | 5043,40                                      | 3045,00  |

Fuente: Elaboración propia.

### Cálculo de la Grava de 3/4"

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{4748,30}{4790,8 - 2945,87}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = 2,57 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

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

$$\text{P. E. A. saturado superficial seco} = \frac{4748,8}{4748,8 - 2945,87}$$

$$\text{P. E. A. saturado superficial seco} = 2,6 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{4748,30}{4748,30 - 2945,87}$$



$$\text{Peso específico aparente} = 2,63 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

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

$$\% \text{ de absorcion} = \frac{4790,8 - 4748,3}{4748,3} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorcion} = 0,90\%$$

Tabla 4.15 Resultados del ensayo de peso específico de la grava 3/4”.

| MuestraN° | Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> ) | Peso específico saturado consup. Seca (gr/cm <sup>3</sup> ) | Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> ) | Porcentaje de absorción |
|-----------|--|---|--|-------------------------|
| 1         | 2,57   | 2,60  | 2,63   | 0,90                    |
| 2         | 2,53   | 2,57  | 2,64   | 1,67                    |
| 3         | 2,49   | 2,52  | 2,58   | 1,35                    |
|           | <b>2,53</b>                                    | <b>2,56</b>   | <b>2,62</b>                                    | <b>1,31</b>             |

Fuente: Elaboración propia.

El mismo procedimiento de cálculo se realiza para la gravilla de 3/8”.

Tabla 4.16 Datos del ensayo se realiza para la gravilla de 3/8”.

| MuestraN° | Peso muestra secada “A” (gr) | Peso muestra saturada con sup. Seca “B”(gr) | Peso muestra saturada dentro del agua “C” (gr) |
|-----------|------------------------------|---|--|
| 1         | 4868,80                      | 5004,60                                     | 2994,60  |
| 2         | 4860,00                      | 5002,90                                     | 2988,80  |
| 3         | 4865,50                      | 5003,20                                     | 2990,60  |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.17 Resultados del ensayo de peso específico de la gravilla 3/8".

| MuestraN° | Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> ) | Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm <sup>3</sup> ) | Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> ) | % de absorción |
|-----------|--|--|--|----------------|
| 1         | 2,42   | 2,49   | 2,60   | 2,79           |
| 2         | 2,41   | 2,48   | 2,60   | 2,94           |
| 3         | 2,42   | 2,49   | 2,60   | 2,83           |
|           | <b>2,42</b>                                    | <b>2,49</b>  | <b>2,60</b>                                    | <b>2,85</b>    |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.6 Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los Ángeles (ASTM C 131 AASHTO T 96)

##### Objetivos

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 es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la sub-rasante.

Por esta razón los agregados que están en, o cerca de las superficies, como son los materiales de base y carpeta asfáltica, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores, sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de cargas del tránsito. Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas.

El ensayo de desgaste de los ángeles, ASTM C-131 O AASHTO T-96, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a abrasión. Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los

agregados de tamaños de la franja B. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el manual de la administradora Boliviana de Carreteras.

### Procedimiento

*Figura 4.30 Tamizado de muestra por los tamices 1/2" y 3/8" peso retenido de 2500 gr.*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.31 Máquina de los Ángeles donde introducimos las muestras de los 2 recipientes.*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.32 Una vez terminado las 500 revoluciones, hacemos girar la máquina para que salga la muestra desgastada.*



*Fuente: Elaboración propia.*

Figura 4.33 Tamizando la muestra en el tamiz N°12.



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Tabla 4.18 Franjas granulométricas de agregados gruesos y número de esferas para ensayo de desgaste por la máquina de los Ángeles.

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.19 Datos del ensayo de desgaste por la máquina de los Ángeles (grava).

| Pasado                             | Retenido | Cantidad tomada (gr)                      |
|------------------------------------|----------|---|
| 3/4"                               | 1/2"     | 2500                                      |
| 1/2"                               | 3/8"     | 2500                                      |
| Retenido tamiz de corte N°12 (1,7) |          | 3806,90                                   |
| Tipo de gradación "B"              |          |   |
| Diferencia                         |          | 1193,10                                   |
| Número de ensayos realizados       |          | 1   |
| Carga abrasiva                     |          | 11 esferas a 32,5 Rpm<br>500 revoluciones |

Fuente: Elaboración propia.

**Cálculos:**

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{diferencia}}{a} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1193,10gr}{5000gr} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 23,86\%$$

Tabla 4.20 Datos del ensayo de desgaste por la máquina de los Ángeles (Gravilla).

| Pasado                             | Retenido | Cantidad tomada (gr)                     |
|------------------------------------|----------|--|
| 3/8"                               | 1/4"     | 2500                                     |
| 1/4"                               | N°4      | 2500                                     |
| Retenido tamiz de corte N°12 (1,7) |          | 3921                                     |
| Tipo de gradación "C"              |          |  |
| Diferencia                         |          | 1079                                     |
| Número de ensayos realizados       |          | 1  |
| Carga abrasiva                     |          | 8 esferas a 32,5 Rpm 500<br>Revoluciones |

Fuente: Elaboración propia.

#### Cálculos:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{diferencia}}{a} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1079,2gr}{5000gr} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 21,58\%$$

#### 4.5.7 Ensayo determinación de partículas laminares, chatas y alargadas (ASTM D791)

##### Objetivo

Este ensayo describe el procedimiento para la determinación de los porcentajes de los agregados laminares, chatas y alargadas. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el manual de la Administradora de Carreteras.

##### Resultados:

Tabla 4.21 Datos del ensayo partículas laminares

| Material           | Peso total de la muestra | Peso retenido de partículas laminares |
|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 3/4" (grava)       | 1000 gr                  | 35,80 gr                              |
| 3/8"<br>(gravilla) | 1000 gr                  | 60,50 gr                              |

Fuente: Elaboración propia.

**Cálculo:**

$$\% \text{ de partículas laminares} = \frac{\text{peso retenido de partículas laminares}}{\text{peso total de la muestra}} * 100\%$$

$$\% \text{ de partículas laminares} = \frac{35,8}{10000} * 100\%$$

$$\% \text{ de partículas laminares} = 3,58\%$$

Tabla 4.22 Resultados del ensayo para agregados gruesos.

| Material | % Total de partículas laminares |
|----------|---------------------------------|
| 3/4"     | 3,58%                           |
| 3/8"     | 6,05%                           |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.23 Datos del ensayo de partículas alargadas

| Material | Peso total de la muestra | Peso retenido de partículas alargadas |
|----------|--------------------------|---------------------------------------|
| 3/4"     | 1000 gr                  | 43,80 gr                              |
| 3/8"     | 1000 gr                  | 20,70 gr                              |

Fuente: Elaboración propia.

**Cálculo:**

$$\% T. d. P. Chatas Alargadas = \frac{\text{peso retenido}}{\text{peso total de la muestra}} * 100$$

$$\% T. d. P. Chatas Alargadas = \frac{43,8}{1000} * 100\%$$

$$\% T. d. P. Chatas Alargadas = 4,38\%$$

% T.d.P.= Porcentaje total de partículas

*Tabla 4.24 Resultado del ensayo de partículas chatas y alargadas.*

| <b>Material</b> | <b>% Total de partículas laminares</b> |
|-----------------|--|
| 3/4"            | 4,38%                                  |
| 3/8"            | 2,07%                                  |

*Fuente: Elaboración propia.*

## **4.6 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE CEMENTO ASFÁLTICO**

### **4.6.1 Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol (ASTM D 244 AASHTO T-72)**

#### **Objetivo**

Este ensayo se emplea normalmente para cementos asfálticos, emulsiones y aceites y sirve para determinar el tiempo en segundos, necesarios para que pasen 60ml de líquido, a una temperatura determinada, se comienza el ensayo limpiando perfectamente el recipiente con un disolvente, por ejemplo, gasolina, teniendo cuidado de que no quede disolvente en el interior del cilindro sino causara errores en ensayo debido a que la gasolina puede diluirse con el asfalto y modificara su propiedad.

Se coloca la muestra en el tubo dejándolo ahí un tiempo, la temperatura del baño se debe controlar que se mantenga constante de 135°C. Se coloca el frasco calibrado de 60 ml cuidadosamente debajo del orificio del equipo de manera que este centrado con ello, se debe de toar en cuenta que cuando fluya la muestra no deberá chocar con las paredes del



frasco, el ensayo se empieza sacando violentamente el tapón del corcho del tubo, al mismo tiempo se deberá iniciar con el cronometraje hasta que fluya totalmente la muestra en el frasco de vidrio. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el manual de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

### Resultados:

*Tabla 4.25 Datos del ensayo de viscosidad del cemento asfáltico 85/100.*

| Ensayo                           | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 |
|----------------------------------|--------|----------|----------|----------|
| Viscosidad-saybolt-furol a 135°C | Seg.   | 253      | 255      | 248      |
| Número de ensayos realizados     |        | 3        |          |          |
| Viscosidad                       |        | 252 seg. |          |          |

*Fuente: Elaboración propia.*

### Cálculos:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados:

Resultado: **252 segundos**

#### 4.6.2 Ensayo de penetración (ASTM D5 AASHTO T 49-97)

##### Objetivo

La penetración se define como la distancia, expresada en decimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja de 100 gramos, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas. Es evidente que cuando más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración. Se coloca una muestra a calentar que se colocaran en un recipiente hasta que este fluido se lo coloca en 2 moldes. Se lo deja enfriar por una hora a temperatura ambiente y se coloca en el baño María por una hora a 25°C. Una vez transcurridos los tiempos de

inmersión, se aproxima la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente 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 decimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el manual de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

### Procedimiento

*Figura 4.34 Equipo de penetración*



*Fuente: Elaboración propia*

### Resultados:

*Tabla 4.26 Datos del Ensayo de penetración del cemento asfáltico 85/100*

| Descripción   | Unidad         | Ensayo<br>1 | Ensayo<br>2 | Ensayo<br>3 |      |
|---|----------------|-------------|-------------|-------------|------|
| Penetración a 25°C,<br>100g. 5 seg.(0,1mm)<br>AASHTO T-49 | Lectura<br>N°1 | mm          | 88          | 90,0        | 88,0 |
|   | Lectura<br>N°2 | mm          | 87          | 92,0        | 91,0 |
|   | Lectura<br>N°3 | mm          | 89          | 90,0        | 91,0 |
| Promedio  | mm             | 88          | 90,7        | 90,0        |      |
| Número de ensayos   |                |             | 3           |             |      |

*Fuente: Elaboración propia.*

**Cálculos:**

Calculando la media de los ensayos realizados.

Resultado: Se tiene como valor de penetración de 89,6 mm a 25°C, 100 gr. 5 seg.

**4.6.3 Ensayo de ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T 51-00)****Objetivo**

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, confeccionada con una muestra y de la forma descrita en 1 se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de  $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  y a una velocidad de  $5\text{cm/min} \pm 5\%$ . Para otras temperaturas debería especificarse la velocidad.

**Procedimiento**

*Figura 4.35 Llenar de agua el equipo del ductilímetro a una temperatura de 25°C.; armar los moldes y colocar glicerina con maicena*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.36 Colocar cemento asfáltico en los moldes dejando por 30 minutos secando; enrasar y posteriormente dejarlo en el agua por 30 minutos.*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.37 Colocando los moldes en el ductilímetro después de los 30 min en agua.*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla 4.27 Datos del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico 85/100.*

| Descripción               | Molde 1<br>(cm) | Molde 2<br>(cm) | Molde 3<br>(cm) |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ductilidad, 25°C, 5cm/min | 118             | 114             | 115             |
| Promedio (cm)             | 115,67          |                 |                 |
| N° de ensayos             | 3               |                 |                 |

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.6.4 Ensayo para determinar la densidad real o peso específico cemento asfáltico (ASTM D71-94 AASHTO T229-97)

##### Objetivo

Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos, mediante el uso del picnómetro o vaso precipitado a la temperatura requerida de 25°C.

##### Procedimiento

*Figura 4.38 Limpieza de los vasos precipitados y determinación de la masa*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.39 Se debe llenar el vaso precipitado del ligante asfáltico y dejarlo por 30 minutos*



*Fuente: Elaboración propia.*

Figura 4.40 Luego se procede agregar el agua destilada hasta los 50 ml y se deja por 30 minutos en agua y luego se procede al pesaje



Fuente: Elaboración propia.

## Resultados

Tabla 4.28 Datos del ensayo de peso específico o densidad relativa del cemento asfáltico.

| Ensayo                              | Unidad             | Ensayo 1      | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio |
|-------------------------------------|--------------------|---------------|----------|----------|----------|
| Peso picnómetro                     | gr                 | 36,85         | 33,80    | 35,02    |          |
| Peso Picnómetro + Agua<br>(25°C)    | gr                 | 60,33         | 57,95    | 59,55    |          |
| Peso Picnómetro +<br>Muestra        | gr                 | 56,58         | 52,01    | 55,55    |          |
| Peso Picnómetro + Agua<br>+ Muestra | gr                 | 60,45         | 58,15    | 59,70    |          |
| Peso Específico                     | gr/cm <sup>3</sup> | 1,003         | 1,008    | 1,004    | 1,005    |
| Especificaciones                    | Min.<br>1,00       | Max. 1,0<br>5 |          |          |          |

Fuente: Elaboración propia.

## Cálculos:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos Resultado: 1,005 gr/cm<sup>3</sup>

#### 4.6.5 Resultado de la caracterización de los materiales

En esta investigación los agregados utilizados para realizar el estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas calientes con aporte de RAP y tienen las siguientes propiedades:

*Tabla 4.29 Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados*

| <b>Ensayo</b>  | <b>Agregados</b> | <b>Resultados</b>      |
|--|------------------|------------------------|
| Desgaste mediante la máquina de losángeles               | Grava 3/4"       | 23,86%                 |
|  | Gravilla 3/8"    | 21,58%                 |
| Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos | Grava 3/4"       | 2,53gr/cm <sup>3</sup> |
|  | Gravilla 3/8"    | 2,42gr/cm <sup>3</sup> |
| Peso específico y absorción de agua en agregados finos   | Arena            | 2,31gr/cm <sup>3</sup> |
| Peso unitario  | Grava 3/4"       | 1,48gr/cm <sup>3</sup> |
|  | Gravilla 3/8"    | 1,42gr/cm <sup>3</sup> |
|  | Arena            | 1,66gr/cm <sup>3</sup> |
| Equivalente de arena                                     | Arena            | 95.41%                 |
| Porcentaje de agregados chatas yaalargadas               | Grava 3/4"       | 4,38%                  |

*Fuente: Elaboración propia.*

En la presente investigación manipule el cemento asfáltico convencional para realizar el estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas calientes cuyas propiedades son las siguientes.

*Tabla 4.30 Resultados de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico*

| <b>Ensayo</b>                       | <b>Resultado</b>        |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Residuo por destilación             | 68,50%                  |
| Ductilidad                          | 115,67cm                |
| Penetración                         | 89,6mm                  |
| Viscosidad Saybolt-Furol            | 252seg                  |
| Peso específico o densidad relativa | 1,005gr/cm <sup>3</sup> |

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.6.6 Análisis y comparación de resultados de cemento asfáltico de PEN 85/100.

Tabla 4.31 Comparación de resultados de cemento asfáltico de PEN 85/100.

| Ensayo                              | Resultado ensayos de laboratorio | Datos ficha técnica | Exigencias                   |
|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------------|
| Residuo por destilación             | 68,50%                           |                     |                              |
| Ductilidad 25°C                     | 115,67cm                         | 103                 | >100 cm                      |
| Penetración                         | 89,6mm                           | 91                  | 85-100                       |
| Viscosidad Saybolt-Furol            | 252seg                           | >85 seg             | informar                     |
| Peso específico o densidad relativa | 1,005gr/cm <sup>3</sup>          |                     | 1,00-1,05 gr/cm <sup>3</sup> |
| Punto de inflamación                | 294°C                            | 298°C               | >232°C                       |

*Fuente: Elaboración propia.*

Los ensayos realizados en laboratorio en comparación con los datos obtenidos de la ficha técnica del asfalto de procedencia colombiana 85/100; son resultados próximos y dentro de los parámetros de exigencias en las Normas ASTM y AASHTO.

## 4.7 DOSIFICACIÓN DE UNA MEZCLA CONVENCIONAL EN CALIENTE

### 4.7.1 Determinación de proporciones de agregados

Se requiere de ciertos requisitos en la gradación de los agregados, donde se realizó las dosificaciones de los porcentajes de cada agregado de manera que se pueda cumplir con las especificaciones, la banda granulométrica que se utilizó es la del instituto del asfalto, a partir de esas especificaciones se juega con los porcentajes de grava, gravilla y arena hasta entrar en medio de las curvas mínimas y máximas normadas, para la granulometría de la mezcla.



*Tabla 4.32 Graduaciones propuestas para mezclas cerradas o densas.*

| Mezclas cerradas  |                                    |          |          |          |          |          |          |         |         |      |
|---|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|------|
| Abertura de malla   | Tamaño máximo nominal del agregado |          |          |          |          |          |          |         |         |      |
|   | 2 in                               | 1 1/2 in | 1 in     | 3/4 in   | 1/2 in   | 3/8 in   | N° 4     | N°8     | N° 16   |      |
|   | 50mm                               | 37,5 mm  | 25,0 mm  | 19,0 mm  | 12,5 mm  | 9,5 mm   | 4,74 mm  | 2,36 mm | 1,18 mm |      |
| Graduaciones para mezcla de agregados (grueso, fino y filler) |                                    |          |          |          |          |          |          |         |         |      |
| 2 1/2 in  | 63 mm                              | 100      |          |          |          |          |          |         |         |      |
| 2 in  | 60 mm                              | 90 - 100 | 100      |          |          |          |          |         |         |      |
| 1 1/2 in  | 37,5 mm                            |          | 90 - 100 | 100      |          |          |          |         |         |      |
| 1 in  | 25,0 mm                            | 60 - 80  |          | 90 - 100 | 100      |          |          |         |         |      |
| 3/4 in  | 19,0 mm                            |          | 56-80    |          | 90 - 100 | 100      |          |         |         |      |
| 1/2 in  | 12,5 mm                            | 35 - 85  |          | 56-80    |          | 90 - 100 | 100      |         |         |      |
| 3/8 in  | 9,5 mm                             |          |          | 56-80    |          |          | 90 - 100 | 100     |         |      |
| N°4   | 4,75 mm                            | 17 - 47  | 23-53    | 29-59    | 35-65    | 44-74    | 55-85    | 80-100  | 100     |      |
| N°8   | 2,36 mm                            | 10-36    | 15-41    | 19-45    | 23-49    | 28-58    | 32-67    | 65-100  | 95-100  |      |
| N°16  | 1,18 mm                            |          |          |          |          |          |          | 40-80   | 85-100  |      |
| N°30  | 600 μm                             |          |          |          |          |          |          | 25-65   | 70-95   |      |
| N°50  | 300 μm                             | 3-15     | 4-16     | 5-17     | 5-19     | 5-21     | 7-23     | 7-40    | 45-75   |      |
| N°100   | 150 μm                             |          |          |          |          |          |          | 3-20    | 20-40   |      |
| N°200   | 75 μm                              | 0-5      | 0-6      | 1-7      | 2-8      | 2-10     | 2-10     | 2-10    | 9-20    |      |
| Asfalto, porcentaje de acuerdo al peso de la mezcla           |                                    | 2-7      | 3-8      | 3-9      | 4-10     | 4-11     | 5-12     | 6-12    | 7-12    | 8-12 |

*Fuente: Instituto del asfalto (gradación propuesta por ASTM D3515)*

Las especificaciones de granulometría de agregado se adaptaron al tipo de gradación que se puede observar en la figura el cual nos muestra que nuestra mezcla pertenece a una mezcla cerrada.

La metodología Marshall utiliza una gráfica semi logarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, 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.

*Tabla 4.33 Dosificación de acuerdo a la granulometría de agregados*

|                   |               | <b>Dosificación</b>  |                       |                       |              |                 |              |               |
|-------------------|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-----------------|--------------|---------------|
|                   |               | <b>Grava</b>         | <b>Gravilla</b>       | <b>Arena</b>          | <b>Grava</b> | <b>Gravilla</b> | <b>Arena</b> | <b>Filler</b> |
| <b>Tamices</b>    | <b>tamaño</b> | <b>Peso retenido</b> | <b>Peso retenido.</b> | <b>Peso retenido.</b> | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>      | <b>(%)</b>   | <b>(%)</b>    |
|                   | <b>(mm)</b>   | <b>(gr)</b>          | <b>(gr)</b>           | <b>(gr)</b>           | <b>20,17</b> | <b>35,46</b>    | <b>44,37</b> |               |
| 1"                | 25,4          | 0,00                 | 0,00                  | 0,00                  | 0,00         | 0,00            | 0,00         |               |
| 3/4"              | 19,0          | 3356,80              | 0,00                  | 0,00                  | 677,07       | 0,00            | 0,00         |               |
| 1/2"              | 12,5          | 3479,20              | 0,00                  | 0,00                  | 701,75       | 0,00            | 0,00         |               |
| 3/8"              | 9,50          | 2052,70              | 878,20                | 0,00                  | 414,03       | 311,41          | 0,00         |               |
| Nº4               | 4,75          | 1085,10              | 4075,70               | 220,00                | 218,86       | 1445,24         | 97,61        |               |
| Nº8               | 2,36          | 26,20                | 3810,40               | 883,00                | 5,28         | 1351,17         | 391,79       |               |
| Nº16              | 1,18          | 0,00                 | 880,30                | 1326,00               | 0,00         | 312,15          | 588,35       |               |
| Nº30              | 0,60          | 0,00                 | 355,40                | 2722,00               | 0,00         | 126,02          | 1207,75      |               |
| Nº50              | 0,30          | 0,00                 | 0,00                  | 2584,50               | 0,00         | 0,00            | 1146,74      |               |
| Nº100             | 0,15          | 0,00                 | 0,00                  | 1527,50               | 0,00         | 0,00            | 677,75       |               |
| Nº200             | 0,075         | 0,00                 | 0,00                  | 664,50                | 0,00         | 0,00            | 294,84       |               |
| Base              | -             | 0,00                 | 0,00                  | 72,50                 | 0,00         | 0,00            | 32,17        |               |
| <b>Peso total</b> |               | 10000,0              | 10000,0               | 10000,0               | 2017,00      | 3546,00         | 4437,00      |               |

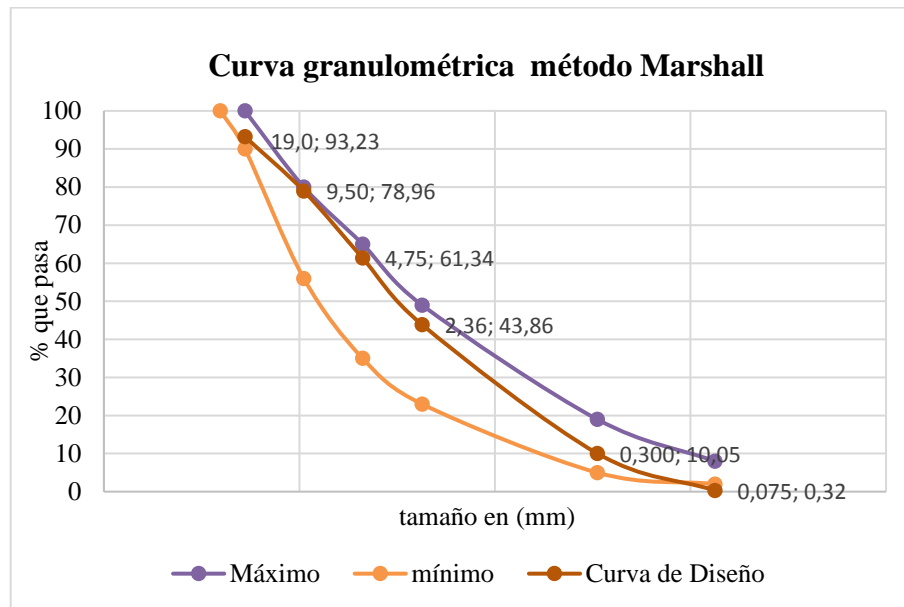
*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 4.34 Granulometría de curva de dosificación

| Curva de dosificación |           |        |                         | Especificaciones |        |
|-----------------------|-----------|--------|-------------------------|------------------|--------|
| Peso Ret.             | Ret. Acum | % Ret  | % que pasa<br>del total | ASTM D3515       |        |
|                       |           |        |                         | Mínimo           | Máximo |
| (gr)                  | (gr)      | %      | %                       |                  |        |
| 0,00                  | 0,00      | 0,00   | <b>100,00</b>           | 100              | 100    |
| 677,07                | 677,07    | 6,77   | <b>93,23</b>            | 90               | 100    |
| 701,75                | 1378,82   | 13,79  | <b>86,21</b>            | 73               | 90     |
| 725,44                | 2104,26   | 21,04  | <b>78,96</b>            | -                | -      |
| 1761,72               | 3865,98   | 38,66  | <b>61,34</b>            | 35               | 65     |
| 1748,24               | 5614,22   | 56,14  | <b>43,86</b>            | -                | -      |
| 900,50                | 6514,72   | 65,15  | <b>34,85</b>            | 14               | 34     |
| 1333,78               | 7848,50   | 78,48  | <b>21,52</b>            | 9                | 26     |
| 1146,74               | 8995,24   | 89,95  | <b>10,05</b>            | 5                | 19     |
| 677,75                | 9672,99   | 96,73  | <b>3,27</b>             | -                | -      |
| 294,84                | 9967,83   | 99,68  | <b>0,32</b>             | 2                | 8      |
| 32,17                 | 10000,00  | 100,00 | <b>0,00</b>             | -                | -      |
| 10000,0               |           |        |                         |                  |        |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.4 Curva de la granulometría formada.



*Fuente: Elaboración propia.*

Por lo que se observa en la tabla y el gráfico de la granulometría formada de la combinación realizada, vemos que la combinación establecida de 20,17% de grava de 3/4", 35,46% de gravilla de 3/8" y 44,37% de agregado fino cumplen con las especificaciones del manual de la Administradora de Carreteras (ABC), por lo que se da por aceptado los factores de combinación.

#### 4.7.2 Determinación de proporción de cemento asfáltico

Ya establecida la combinación granulométrica de los agregados, se procedió a la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico, el valor del contenido óptimo debía estar cercano al valor propuesto por el manual básico de ligantes asfálticos convencionales.

Se optó por realizar pruebas a briquetas que estén por arriba del contenido óptimo y por debajo, para conocer el comportamiento de sus propiedades mecánicas, especialmente Peso volumétrico, estabilidad y fluencia, haciendo variar un 0.5% de cemento asfáltico por cada grupo de briquetas y haciendo 3 briquetas por punto.

Se realizó 6 grupos de briquetas desde un 4,5% hasta un 7% en total para encontrar el contenido óptimo de C.A. (cemento asfáltico)

Determinación de las cantidades de agregados y cemento asfáltico

En la tabla siguiente se muestran los resultados que representan las respectivas cantidades de agregados y C.A. necesarios para realizar la producción de la mezcla asfáltica de cada uno de los contenidos de C.A. que contribuirán para la realización de la mezcla asfáltica reciclada., teniendo como masa para cada briqueta 1200 g.

*Tabla 4.35 Diseño de dosificación Marshall (determinación de contenido óptimo de cemento asfáltico).*

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| Peso Total de Briqueta (gr)     | 1200      |
| Ponderación de Grava (%)        | 20,17     |
| Ponderación de Gravilla (%)     | 35,46     |
| Ponderación de Arena (%)        | 44,37     |
| Ponderación de Filler (%)       | 0         |
| Porcentaje de Briqueta          | 100%      |
| Porcentaje de Cemento Asfáltico | X%        |
| Porcentaje de Agregado          | Y=100 – X |

|                                 | Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla |         |         |         |         |        |
|---------------------------------|--|---------|---------|---------|---------|--------|
|                                 | 4,5%   | 5,0%    | 5,5%    | 6,0%    | 6,5%    | 7,0%   |
| Porcentaje de agregado (%)      | 95,50%                                       | 95,00%  | 94,50%  | 94,00%  | 93,50%  | 93,00% |
| Peso del cemento asfáltico (gr) | 54,00  | 60,00   | 66,00   | 72,00   | 78,00   | 84,00  |
| Peso de grava (gr)              | 231,15                                       | 229,94  | 228,73  | 227,52  | 226,31  | 225,10 |
| Peso de gravilla (gr)           | 406,37                                       | 404,24  | 402,12  | 399,99  | 397,86  | 395,70 |
| Peso de arena (gr)              | 508,48                                       | 505,82  | 503,16  | 500,49  | 497,83  | 495,20 |
| Peso de filler (gr)             | 0,00   | 0,00    | 0,00    | 0,00    | 0,00    | 0,00   |
| Peso total de la briqueta (gr)  | 1200,00                                      | 1200,00 | 1200,00 | 1200,00 | 1200,00 | 1200,0 |

*Fuente: Elaboración propia.*

## **Procedimiento**

Equipo y materiales utilizados para ensayo Marshall:

- Balanza  $A \pm 0.1$  gr.
- Hornos.
- Frascos.
- Moldes para la preparación de briquetas.
- Papel filtro.
- Brocha.
- Bandeja metálica para la mezcla.
- Cuchara para la mezcla.
- Termómetro.
- Espátula.
- Equipo de compactación, martillo.
- Extractor de briqueta.
- Canastillo metálico.
- Prensa Marshall.
- Vernier.

### **Se describe un breve procedimiento practico para el ensayo Marshall**

1.-Con los porcentajes calculados del agregado y los porcentajes variables de cemento asfáltico se procede al pesaje, y seguidamente del secado del material en horno o en hornalla.

2.-En una cocina a gas se procedió con la mezcla de los agregados y el C.A, hasta lograr una mezcla homogénea y a la temperatura adecuada entre 150 y 160°C.

3.-Una vez lista la mezcla se realiza el vaciado al molde de la briqueta en tres capas con 25 apinzonamientos por cada capa, seguido a esto se colocan láminas de papel en la parte

superior e inferior para evitar adherencia en el uso del martillo mecánico, que está programado para realizar 25 golpes por lado.

4.- Terminados los golpes, se extrae la muestra con ayuda de una prensa hidráulica, estas muestras deben estar en reposo más de 18 horas.

5.- Las briquetas serán sometidas a pesajes en seco, superficialmente mojado y peso sumergido, después de esto serán sumergidas en agua a 60°C entre 30 y 45min para su inmediata ruptura en la prensa Marshall; donde obtenemos valores de estabilidad y fluencia.

*Figura 4.41 Procedimiento del ensayo de Marshall para la determinación del óptimo de cemento asfáltico*



*Fuente: Elaboración propia.*

### 4.7.3 Cálculos y resultados ensayo Marshall de una mezcla convencional

Las briquetas 1, 2 y 3 serán las que analizaremos para la demostración de cálculos.

#### Altura de la briqueta

Tabla 4.36 Lecturas de altura de briquetas de mezcla convencional

| Altura de briquetas     |             |             |             |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 4,5% CA.                |             |             |             |
|                         | M-1         | M-2         | M-3         |
|                         | 63,54       | 64,84       | 64,77       |
|                         | 63,72       | 65,42       | 64,74       |
|                         | 63,52       | 65,05       | 64,59       |
|                         | 63,80       | 65,39       | 65,00       |
| Altura promedio<br>(mm) | 63,65       | 65,18       | 64,78       |
| Altura promedio<br>(cm) | <b>6,36</b> | <b>6,52</b> | <b>6,48</b> |

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

P.A.= Peso seco al aire de la briqueta (gr).

S.S.S.= Peso saturado superficialmente seco (gr).

P.S = Peso sumergido (gr).



Tabla 4.37 Lectura de pesos de briquetas de mezcla convencional

|                         | P.A. (gr) | S.S.S. (gr) | P.S. (gr) |
|-------------------------|-----------|-------------|-----------|
| Briqueta 1              | 1171,1    | 1173,3      | 632       |
| 4.5% de C.A. Briqueta 2 | 1137,4    | 1145,2      | 630       |
| Briqueta 3              | 1150,7    | 1152,2      | 618       |

Fuente: Elaboración propia.

### Volumen de la briqueta

#### Cálculo realizado para la briqueta 1:

$$\text{Vol. Briqueta} = \text{peso S.S.S.} - \text{peso sumergido}$$

$$\text{Vol. Briqueta 1} = 1173,3 - 632$$

$$\text{Vol. Briqueta 1} = 541,3 \text{ cm}^3$$

#### Densidad de la briqueta.

- Densidad real

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

$$\text{Densidad real} = \frac{1171,1}{541,3}$$

$$\text{Densidad real} = 2,163 \text{ gr/cm}^3$$

- Densidad máxima teórica

$$D_{\text{maxTeorica}} = \frac{100}{\left(\frac{\% \text{asfalto}}{\text{peso esp. asfalto}}\right) + \left(\frac{100 - \% \text{asf.}}{\text{peso esp. agr. grueso}}\right)}$$

$$D_{\text{maxTeorica}} = \frac{100}{\left(\frac{4,71}{1,005}\right) + \left(\frac{100 - 4,71}{2,54}\right)}$$

$$D_{maxTeorica} = 2,37 \text{ gr/cm}^3$$

### Porcentaje de vacíos

- Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv.)

$$Vv = \left( \frac{D_{maxTeo} - Dens. prom.}{D_{maxTeo}} \right) * 100$$

$$Vv = \left( \frac{2,37 - 2,18}{2,37} \right) * 100$$

$$Vv = 8,33\%$$

- Porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM)

$$VAM = \left( \frac{\% \text{ de asf.} * Dens. prom.}{Peso \text{ esp. del asfalto}} \right) + Vv$$

$$VAM = \left( \frac{4,5 * 2,18}{1,005} \right) + 8,33$$

$$VAM = 18,06\%$$

- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV)

$$RBV = \left( \frac{VAM - Vv}{VAM} \right) * 100$$

$$RBV = \left( \frac{18,06 - 8,33}{18,06} \right) * 100$$

$$RBV = 53,91\%$$

### Estabilidad y fluencia

#### Lecturas obtenidas del ensayo de Marshall.

Tabla 4.38 Lectura de prensa Marshall de estabilidad y fluencia

| Lectura de carga | Lectura de fluencia |
|------------------|---------------------|
| kN               | mm                  |
| 17               | 475                 |
| 10               | 480                 |
| 18               | 474                 |

Fuente: Elaboración propia.

### Corrección de fluencia

$$\text{Fluencia corregida} = \frac{(\text{lectura de fluencia})}{25,4}$$

$$\text{Fluencia corregida} = \frac{(475)}{25,4}$$

$$\text{Fluencia corregida} = 18,7\text{plg}$$

Tabla 4.39 Características de los componentes de una mezcla asfáltica

| Agregado | P.E. | %     |
|----------|------|-------|
| Grava    | 2,62 | 20,17 |
| Gravilla | 2,60 | 35,46 |
| Arena    | 2,48 | 44,37 |
| Filler   |      |       |

| <b>Granulometría formada</b>                                   | <b>P. específico</b> | <b>% agregado</b> |
|--|----------------------|-------------------|
| Mat. retenido tamiz N° 4                                       | 2,61                 | 51,37             |
| Mat. pasa tamiz N° 4   | 2,48                 | 48,63             |
| Peso específico total  | 2,54                 | 100               |
|  |                      |                   |
| Tipo de cemento asfáltico: convencional                        |                      | 85/100            |
| Número de golpes por cara                                      |                      | 75                |
| Temperatura de mezclado (°C)                                   |                      | 160               |
| Peso específico del ligante AASHTO T-229 (gr/cm <sup>3</sup> ) |                      | 1,0050            |

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla 4.40 Datos medidos de altura de briquetas, peso seco, peso saturado superficialmente seco y peso sumergido.*

| N° de<br>briqueta | % de Asfalto |                   | Altura<br>promedio<br>de briqueta | Peso Briqueta |                   |                          |
|-------------------|--------------|-------------------|-----------------------------------|---------------|-------------------|--------------------------|
|                   | Base Mezcla  | Base<br>Agregados |                                   | Seco          | Sat. Sup.<br>Seca | Sumergi<br>da en<br>agua |
|                   | %            | %                 |                                   | grs.          | grs.              | grs.                     |
| 1                 |              |                   | 6,36                              | 1171,1        | 1173,3            | 632                      |
| 2                 | 4,50         | 4,71              | 6,52                              | 1137,4        | 1145,2            | 630                      |
| 3                 |              |                   | 6,48                              | 1150,7        | 1152,2            | 618                      |
| 4                 |              |                   | 6,57                              | 1167,7        | 1169,0            | 641                      |
| 5                 | 5,00         | 5,26              | 6,56                              | 1191,4        | 1194,9            | 650                      |
| 6                 |              |                   | 6,58                              | 1149,0        | 1153,2            | 643                      |
| 7                 |              |                   | 6,55                              | 1166,8        | 1169,4            | 658                      |
| 8                 | 5,50         | 5,82              | 6,69                              | 1212,8        | 1214,0            | 663                      |
| 9                 |              |                   | 6,49                              | 1174,8        | 1177,7            | 649                      |
| 10                |              |                   | 6,44                              | 1121,5        | 1126,6            | 630                      |
| 11                | 6,00         | 6,38              | 6,26                              | 1157,4        | 1157,9            | 642                      |
| 12                |              |                   | 6,29                              | 1172,7        | 1171,7            | 645                      |
| 13                |              |                   | 6,16                              | 1155,4        | 1155,9            | 643                      |
| 14                | 6,50         | 6,95              | 6,33                              | 1159,1        | 1163,0            | 642                      |
| 15                |              |                   | 6,18                              | 1178,1        | 1179,5            | 653                      |
| 16                |              |                   | 6,39                              | 1122,3        | 1123,4            | 623                      |
| 17                | 7,00         | 7,53              | 6,16                              | 1131,5        | 1132,4            | 629                      |
| 18                |              |                   | 6,11                              | 1153,3        | 1155,5            | 621                      |

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 4.41 Determinación de volumen, densidad y porcentaje de vacíos de briquetas de mezcla en caliente.

| N° de<br>briqueta | Volumen                     | Densidad Briqueta                      |  |   | % de Vacíos                            |  |  |
|-------------------|-----------------------------|--|--|---|--|--|--|
|                   | briqueta<br>cm <sup>3</sup> | Densidad<br>real<br>gr/cm <sup>3</sup> | Densidad<br>promedio<br>gr/cm <sup>3</sup> | Densidad<br>máxima<br>teórica<br>gr/cm <sup>3</sup> | % de<br>vacíos<br>mezcla<br>total<br>% | V.A.M.(vacíos<br>agregado<br>mineral)<br>% | R.B.V.<br>(relación<br>betumen<br>vacíos)<br>% |
| 1                 | 541,3                       | 2,16                                   |  |   |  |  |  |
| 2                 | 515,2                       | 2,21                                   | 2,18                                       | 2,37  | 8,33                                   | 18,06                                      | 53,91  |
| 3                 | 534,2                       | 2,15                                   |  |   |  |  |  |
| 4                 | 528,0                       | 2,21                                   |  |   |  |  |  |
| 5                 | 544,9                       | 2,19                                   | 2,22                                       | 2,35  | 5,84                                   | 16,86                                      | 65,39  |
| 6                 | 510,2                       | 2,25                                   |  |   |  |  |  |
| 7                 | 511,4                       | 2,28                                   |  |   |  |  |  |
| 8                 | 551,0                       | 2,20                                   | 2,23                                       | 2,34  | 4,31                                   | 16,54                                      | 73,93  |
| 9                 | 528,7                       | 2,22                                   |  |   |  |  |  |
| 10                | 496,6                       | 2,26                                   |  |   |  |  |  |
| 11                | 515,9                       | 2,24                                   | 2,24                                       | 2,32  | 3,22                                   | 16,61                                      | 80,63  |
| 12                | 526,7                       | 2,23                                   |  |   |  |  |  |
| 13                | 512,9                       | 2,25                                   |  |   |  |  |  |
| 14                | 521,0                       | 2,22                                   | 2,24                                       | 2,30  | 2,64                                   | 17,12                                      | 84,57  |
| 15                | 526,5                       | 2,24                                   |  |   |  |  |  |
| 16                | 500,4                       | 2,24                                   |  |   |  |  |  |
| 17                | 503,4                       | 2,25                                   | 2,22                                       | 2,28  | 2,84                                   | 18,28                                      | 84,45  |
| 18                | 534,5                       | 2,16                                   |  |   |  |  |  |
|                   |                             |  |  | mínimo  | 3                                      | 13   | 75   |
|                   |                             |  |  | máximo  | 5                                      | -  | 82   |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.42 Lecturas de estabilidad y fluencia de mezcla convencional en la prensa Marshall

| N° de briqueeta | Estabilidad Marshall |                  |   |                            |                      | Fluencia         |                  |                   |
|-----------------|----------------------|------------------|---|----------------------------|----------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                 | Lectura carga        | Carga convertida | Factor de corrección de altura de briqueeta | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio | Lectura de flujo | Flujo convertido | Fluencia promedio |
|                 | KN                   | lbf              | -   | lbf                        | lbf                  | mm               | 0,01 pulg        | 0,01 pulg         |
| 1               | 17                   | 3821,77          | 1,00  | 3812,22                    |                      | 475              | 18,70            |                   |
| 2               | 10                   | 2248,10          | 0,96  | 2153,90                    | 3293,73              | 480              | 18,90            | 18,75             |
| 3               | 18                   | 4046,58          | 0,97  | 3915,07                    |                      | 474              | 18,66            |                   |
| 4               | 17                   | 3821,77          | 0,95  | 3626,10                    |                      | 406              | 15,98            |                   |
| 5               | 18                   | 4046,58          | 0,95  | 3847,08                    | 3839,25              | 348              | 13,70            | 15,81             |
| 6               | 19                   | 4271,39          | 0,95  | 4044,58                    |                      | 451              | 17,76            |                   |
| 7               | 22                   | 4945,82          | 0,95  | 4710,89                    | 4381,92              | 417              | 16,42            | 16,47             |
| 8               | 27                   | 6069,87          | 0,93  | 5614,63                    |                      | 405              | 15,94            |                   |
| 9               | 13                   | 2922,53          | 0,97  | 2820,24                    |                      | 433              | 17,05            |                   |
| 10              | 17                   | 3821,77          | 0,98  | 3735,78                    |                      | 441              | 17,36            |                   |
| 11              | 27                   | 6069,87          | 1,02  | 6215,55                    | 4611,42              | 476              | 18,74            | 17,85             |
| 12              | 17                   | 3821,77          | 1,02  | 3882,92                    |                      | 443              | 17,44            |                   |
| 13              | 22                   | 4945,82          | 1,05  | 5207,95                    |                      | 480              | 18,90            |                   |
| 14              | 15                   | 3372,15          | 1,01  | 3389,01                    | 4354,94              | 482              | 18,98            | 19,96             |
| 15              | 19                   | 4271,39          | 1,05  | 4467,87                    |                      | 559              | 22,01            |                   |
| 16              | 19                   | 4271,39          | 0,99  | 4228,68                    | 4028,15              | 592              | 23,31            | 23,18             |
| 17              | 20                   | 4496,20          | 1,05  | 4734,50                    |                      | 603              | 23,74            |                   |
| 18              | 13                   | 2922,53          | 1,07  | 3121,26                    |                      | 571              | 22,48            |                   |
|                 |                      |                  |   | mínimo                     | 1800                 |                  |                  | 8                 |
|                 |                      |                  |   | máximo                     | -                    |                  |                  | 16                |

Fuente: Elaboración propia.

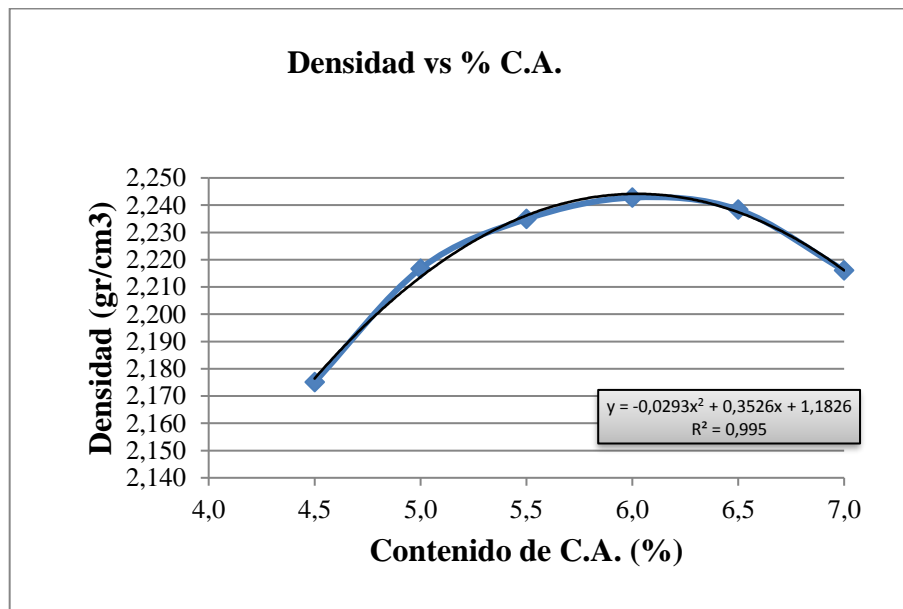
#### 4.7.4 Análisis de resultados propiedades mecánicas

Los resultados del comportamiento de las propiedades mecánicas se presentan en las siguientes gráficas, una vez determinado los valores de volúmenes, densidades, porcentajes de vacíos, estabilidad y fluencia correspondientes para cada contenido de cemento asfáltico, para posteriormente poder realizar un análisis de los resultados de la Mezcla Asfáltica en caliente y obtener el porcentaje óptimo de con cemento asfáltico 85/100.

#### Análisis de resultados de densidades-

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los % de cemento asfáltico y los resultados de sus densidades.

Gráfico 4.5 Análisis curva densidad vs. % cemento asfáltico convencional



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del contenido de cemento asfáltico convencional expresado en porcentaje con la densidad expresada en  $\text{gr/cm}^3$ , para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa dos secciones entre los puntos 5,5% y 6% donde la densidad sube a medida que el % de cemento asfáltico aumenta hasta cierto punto, donde al aumentar el % de cemento asfáltico la densidad

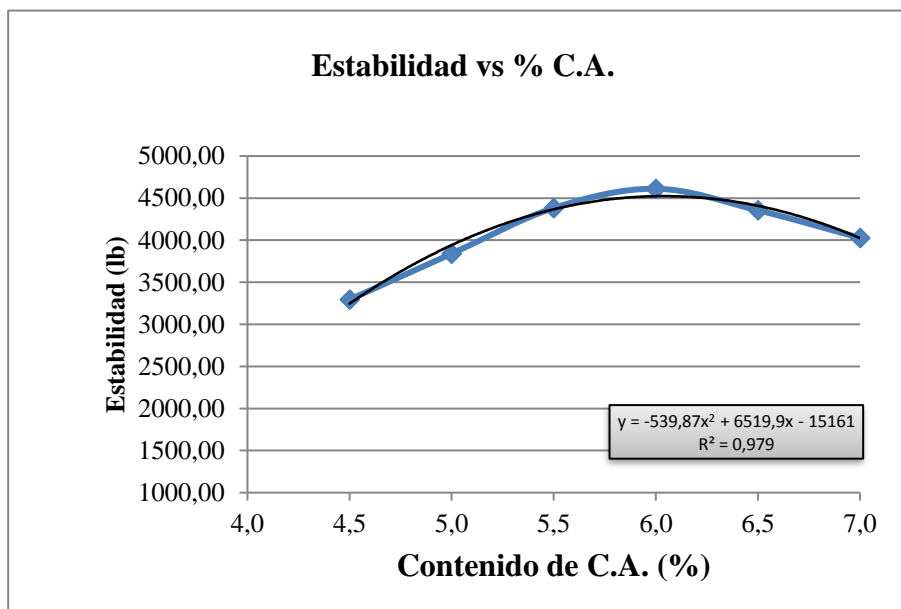


empieza a descender, con una línea de tendencia polinómica el cual nos demuestra que la densidad va bajando debido a que el cemento asfáltico se agrega en exceso.

### **Análisis de resultados de la estabilidad**

Curva de la gráfica es la relación entre los % de cemento asfáltico C.A. y los resultados de Estabilidad de cada contenido de C.A.

*Gráfico 4.6 Análisis curva estabilidad vs. % C.A. convencional.*



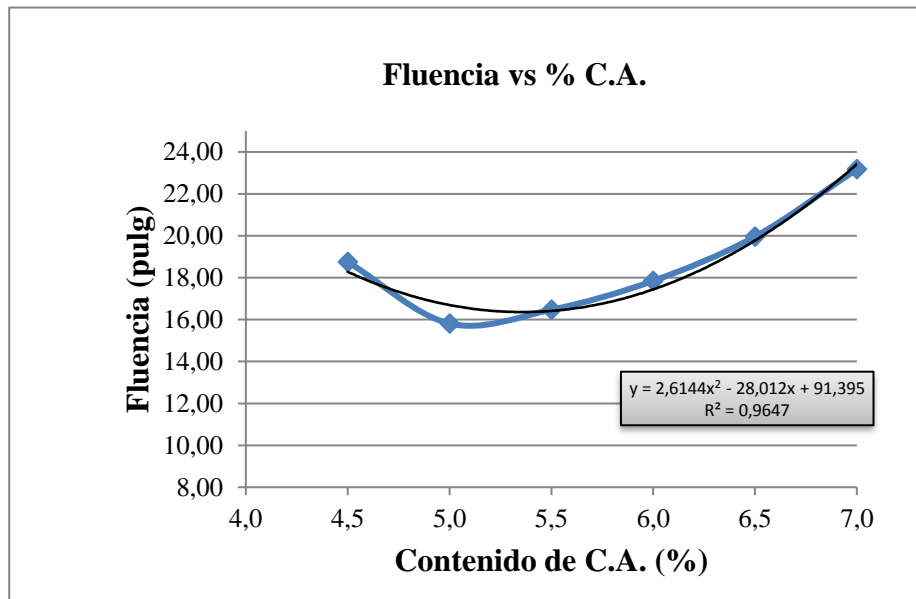
*Fuente: Elaboración propia.*

En la gráfica se muestra la relación del contenido de C.A. expresado en porcentaje con la estabilidad expresado en libras, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que la estabilidad baja a medida que el % de C.A. aumenta, entonces a mayor % de C.A., menor la estabilidad. se ha hecho la investigación para valores de contenido de C.A. entre 5,5% y 6,5% cuyas estabilidades nos marcan desde 4611,42 lb hasta 4354,94 lb, siendo el mayor valor del que tiene 6% de contenido de C.A. con una línea de tendencia polinómica, en esta gráfica.

### **Análisis de resultados de la Fluencia**

Se realizó la curva del gráfico entre los % de C.A. y los resultados de fluencia de cada contenido de C.A.

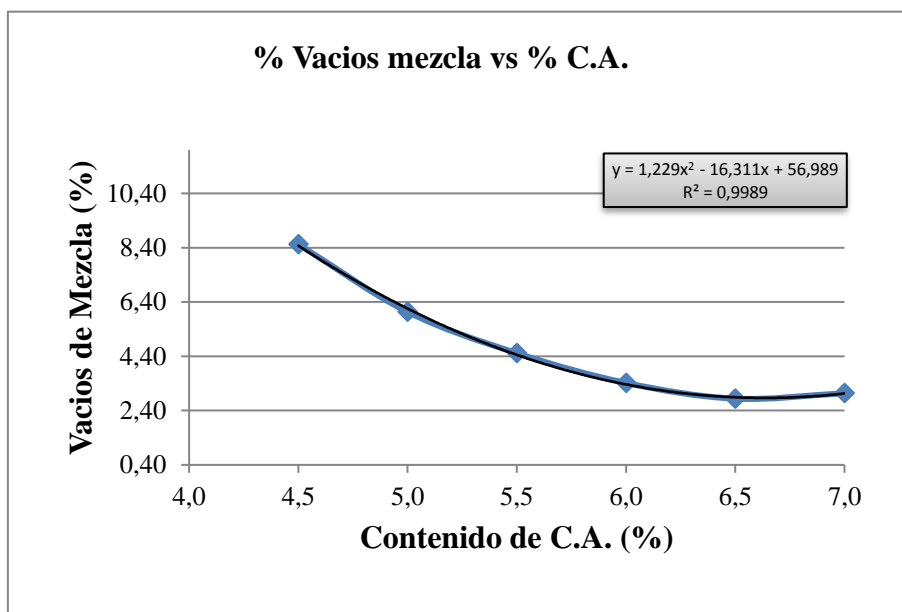
Gráfico 4.7 Curva fluencia vs. % C.A. convencional



*Fuente: Elaboración propia.*

En la gráfica se muestra la relación del contenido de C.A. convencional expresado en porcentaje con la fluencia expresado en 0,01 pulgadas, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica el flujo es proporcional al % de cemento asfáltico, es decir que a mayor % de C.A., mayor será el flujo. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de C.A. entre 5% y 6% donde tienen una variación de la fluencia óptima, según la línea de tendencia polinómica

Gráfico 4.8 Curva porcentaje total de vacíos vs. porcentaje de cemento asfáltico convencional.



Fuente: Elaboración propia.

### Cálculo de máximos y mínimos de un vértice

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

Condición para determinar un vértice

$a < 0$  ocurre un maximo

$a > 0$  ocurre un minimo

Determinación de las coordenadas de un vértice

$$X(\text{vértice}) = -\frac{b}{2a}$$

$$Y(\text{vértice}) = f(x \text{ vértice})$$

**Ecuaciones en estudio:**

**Densidad máxima**

$$y = -0,0293x^2 + 0,3526x + 1,1826$$

|                      |  |               |
|----------------------|--|---------------|
| $a = -0,0293$        | $< 0$  | <b>máximo</b> |
| $b = 0,3526$         |  |               |
| $c = 1,1826$         |  |               |
| <b>X máx. = 6,02</b> | Contenido de ligante para la densidad máxima |               |
| <b>Y máx. = 2,24</b> | Densidad máxima.                             |               |

### Estabilidad máxima

$$y = -539,87x^2 + 6519,9x + 15161$$

|                        |   |               |
|------------------------|---|---------------|
| $a = -539,87$          | $< 0$   | <b>máximo</b> |
| $b = 6519,9$           |   |               |
| $c = -15161$           |   |               |
| <b>X máx = 6,04</b>    | Contenido de ligante para la estabilidad máxima |               |
| <b>Y máx = 4523,88</b> | Estabilidad máxima.                             |               |

### Porcentaje de vacíos en la mezcla.

Ecuación original:

$$y = 1,2624x^2 - 16,651x + 55,361$$

### Método A

Vacíos de la mezcla debe ser igual a 3, 4 ó 5 % según diseño, se reemplaza dicho valor en "y" para obtener el valor de la incógnita "x" (contenido de ligante a ese % de vacíos).

|                 |             |  |               |
|-----------------|-------------|--|---------------|
| <b>a =</b>      | 1,2624      | <b>&gt; 0</b>  | <b>mínimo</b> |
| <b>b =</b>      | -16,651     |  |               |
| <b>c =</b>      | 55,361      |  |               |
| <b>X máx. =</b> | <b>4,90</b> | Contenido de ligante para los vacíos de la mezcla mínimo |               |
| <b>Y máx. =</b> | <b>4,00</b> | Vacíos de la mezcla mínimo                               |               |

Con ayuda de las líneas polinómicas de tendencia, obtenemos el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, para este tipo de mezclas densas calientes

*Tabla 4.43 Contenido óptimo de cemento asfáltico para una mezcla caliente convencional.*

|   | <b>Ensayo</b>                         | <b>Valor de Diseño</b> | <b>% de C.A.</b> |
|---|---------------------------------------|------------------------|------------------|
| <b>Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico</b> | Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,24                   | 6,02             |
|   | Estabilidad Marshall (Lb)             | 4523,88                | 6,04             |
|   | Vacíos de la mezcla (%)               | 4,00                   | 4,90             |
|   | <b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>    | <b>Promedio (%) =</b>  | <b>5,65</b>      |

*Fuente: Elaboración propia.*

Con el ensayo Marshall se encontró que el contenido óptimo es 5,65% de C.A y comparando con el manual básico de mezclas asfálticas densas se pudo evidenciar que se asemeja al valor optimo tabulado, con ese porcentaje optimo calculado se trabajara para conocer el comportamiento de las mezclas con aportación de RAP.

#### 4.8 MATERIAL DE APORTE RAP

Con la idea de realizar un análisis estabilidad, fluencia y otras propiedades mecánicas de estas mezclas recicladas, aplicando metodologías de reutilización de las carpetas asfálticas deterioradas que será demolidas de manera mecánica mediante una chancadora de molares; estas carpetas son removidas de distintas vías urbanas de la ciudad de Tarija.

*Figura 4.42 Acopio de carpetas asfálticas removidas de las vías urbanas de la ciudad de Tarija*



*Fuente: Elaboración propia.*

##### 4.8.1 Triturado del material de aportación RAP

Las **trituradora o chancadora de Mandíbula** emplea dos superficies trituradoras planas dispuestas en un ángulo pequeño entre sí y convergentes hacia abajo. Un plano es fijo y el otro pivota desde la parte superior o inferior, lo que permite un movimiento alternativo cuando es empujado por un arreglo de palanca accionada por una transmisión excéntrica.

*Figura 4.43 Se procedió a triturar el material en la chancadora de Santa Ana  
Chancadora de mandíbulas*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.44 Equipos de trituración*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.45 Materiales triturados RAP.*



*Fuente: Elaboración propia.*

Finalizado el proceso del triturado de las carpetas asfálticas deterioradas se recolectó con mucho cuidado el material con un tractor con pala de cargado frontal y luego a la tolva de una volqueta de 10 cubos de capacidad, para luego transportarlo a un lugar de acopio adecuado.

*Figura 4.46 Traslado de RAP.*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.47 Acopio de RAP*



*Fuente: Elaboración propia.*



Figura 4.48 Tamizado del RAP



Fuente: Elaboración propia.

## 4.9 DOSIFICACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA

### 4.9.1 Granulometría del agregado pétreo del RAP (método extracción centrifuga)

El RAP debe ser calentado en horno a 110°C a temperatura constante, una vez que la muestra de 1200 gramos se encuentra en un estado de reblandecimiento se lo incorpora a la centrifuga; posteriormente cuando la muestra se encuentre libre de cemento asfáltico efectivo, se saca la muestra y se la somete a un secado en horno de temperatura constante no mayor de 150°C, sacado del horno y dejando en reposo para el enfriamiento de la muestra, se procede al tamizado utilizando el raptor, y consecuente a esto se realiza los pesajes del material retenido en los distintos tamices.

### 4.9.2 Contenido de cemento asfáltico (método de extracción centrifuga)

Consiste en la diferencia de pesos antes y después de la extracción en la centrifuga para determinar el contenido de cemento asfáltico.

Figura 4.49 Contenido de cemento asfáltico del RAP.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.50 Granulometría del agregado pétreo extraído del RAP.



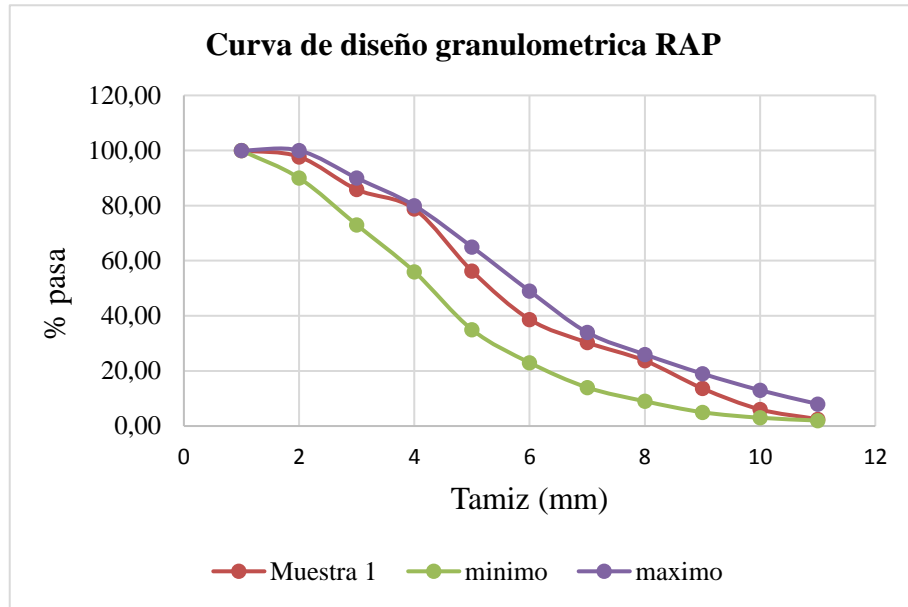
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.44 Granulometría del agregado pétreo extraído del RAP y contenido de cemento asfáltico.

| Comprobación granulométrica     |                |                      |                       |           |                            |                  |        |
|---------------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|-----------|----------------------------|------------------|--------|
| Método extractor centrífugo     |                |                      |                       |           |                            |                  |        |
| (ASTM D 3515)                   |                |                      |                       |           |                            |                  |        |
| Ensayo N° 1                     |                |                      |                       |           |                            |                  |        |
| Material                        | RAP            |                      |                       |           |                            |                  |        |
| Peso total de la muestra        | 1200 gr        |                      |                       |           |                            |                  |        |
| Peso después de la centrifuga   | 1139,1 gr      |                      |                       |           |                            |                  |        |
| Contenido de cemento asfáltico  | 60,9 gr        |                      |                       |           |                            |                  |        |
| Porcentaje de cemento asfáltico | 5,075 %        |                      |                       |           |                            |                  |        |
| Granulometría de RAP            |                |                      |                       |           |                            |                  |        |
| Tamices                         | Tamaño<br>(mm) | Muestra N°1          |                       |           |                            | Especificaciones |        |
|                                 |                | Peso<br>ret.<br>(gr) | Ret.<br>Acum.<br>(gr) | Ret.<br>% | % que<br>pasa<br>del total | Mínimo           | Máximo |
| 1"                              | 25,4           | 0,00                 | 0,00                  | 0,00      | 100,00                     | 100              | 100    |
| ¾"                              | 19,0           | 25,90                | 25,90                 | 2,27      | 97,73                      | 90               | 100    |
| ½"                              | 12,5           | 135,40               | 161,30                | 14,16     | 85,84                      | 73               | 90     |
| 3/8"                            | 9,50           | 80,20                | 241,50                | 21,20     | 78,80                      | 56               | 80     |
| N°4                             | 4,75           | 256,90               | 498,40                | 43,75     | 56,25                      | 35               | 65     |
| N°8                             | 2,36           | 199,90               | 698,30                | 61,30     | 38,70                      | 23               | 49     |
| N°16                            | 1,18           | 95,60                | 793,90                | 69,70     | 30,30                      | 14               | 34     |
| N°30                            | 0,60           | 75,00                | 868,90                | 76,28     | 23,72                      | 9                | 26     |
| N°50                            | 0,30           | 114,70               | 983,60                | 86,35     | 13,65                      | 5                | 19     |
| N°100                           | 0,15           | 86,80                | 1070,40               | 93,97     | 6,03                       | 3                | 13     |
| N°200                           | 0,075          | 40,30                | 1110,70               | 97,51     | 2,49                       | 2                | 8      |
| Base                            | -              | 28,40                | 1139,10               | 100,00    | 0,00                       | -                | -      |
| <b>Peso total</b>               |                | <b>1139,1</b>        |                       |           |                            |                  |        |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.9 Curva granulométrica muestra 1 de RAP.



*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla 4.45 Resumen granulometría extraídas de muestras de RAP.*

| Peso de la muestra: 1200 gr.  |           |           |           |           |           |           |           |           |            |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Porcentaje que pasa del total |           |           |           |           |           |           |           |           |            |
| Tamaño                        | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Muestra 5 | Muestra 6 | Muestra 7 | Muestra 8 | Muestra 9 | Muestra 10 |
| <b>1”</b>                     | 100,00    | 100,00    | 100,00    | 100,00    | 100,00    | 100,00    | 100,00    | 100,00    | 100,00     |
| <b>¾”</b>                     | 98,57     | 100,00    | 95,56     | 97,71     | 96,14     | 96,10     | 95,99     | 100,00    | 95,51      |
| <b>½”</b>                     |           | 87,30     | 83,63     | 84,98     | 83,58     | 84,01     | 82,21     | 89,72     | 79,49      |
| <b>3/8”</b>                   | 78,62     | 79,55     | 76,31     | 78,10     | 71,77     | 76,49     | 72,56     | 81,48     | 65,72      |
| <b>Nº4</b>                    | 58,24     | 58,09     | 56,65     | 55,23     | 47,79     | 57,15     | 54,06     | 59,94     | 38,87      |
| <b>Nº8</b>                    | 44,89     | 43,94     | 41,99     | 37,84     | 33,70     | 42,77     | 42,15     | 43,52     | 28,47      |
| <b>Nº16</b>                   | 36,81     | 35,22     | 34,01     | 29,43     | 26,80     | 34,26     | 35,19     | 34,63     | 23,58      |
| <b>Nº30</b>                   | 29,18     | 27,11     | 26,83     | 22,93     | 21,28     | 26,84     | 28,70     | 27,71     | 19,35      |
| <b>Nº50</b>                   | 16,91     | 16,30     | 16,29     | 12,75     | 12,74     | 16,89     | 17,67     | 18,39     | 11,95      |
| <b>Nº100</b>                  | 7,52      | 8,46      | 8,21      | 5,04      | 5,36      | 8,76      | 8,39      | 9,35      | 4,35       |
| <b>Nº200</b>                  | 3,09      | 4,21      | 3,93      | 1,38      | 1,70      | 4,04      | 3,60      | 3,44      | 1,31       |
| <b>BASE</b>                   | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00       |
| <b>Contenido de C.A.</b>      | 5,55%     | 5,56%     | 5,07%     | 5,12%     | 4,86%     | 5,66%     | 6,14%     | 5,56%     | 4,53%      |
| <b>Total, promedio</b>        |           |           |           |           |           |           |           |           | 5,34%      |

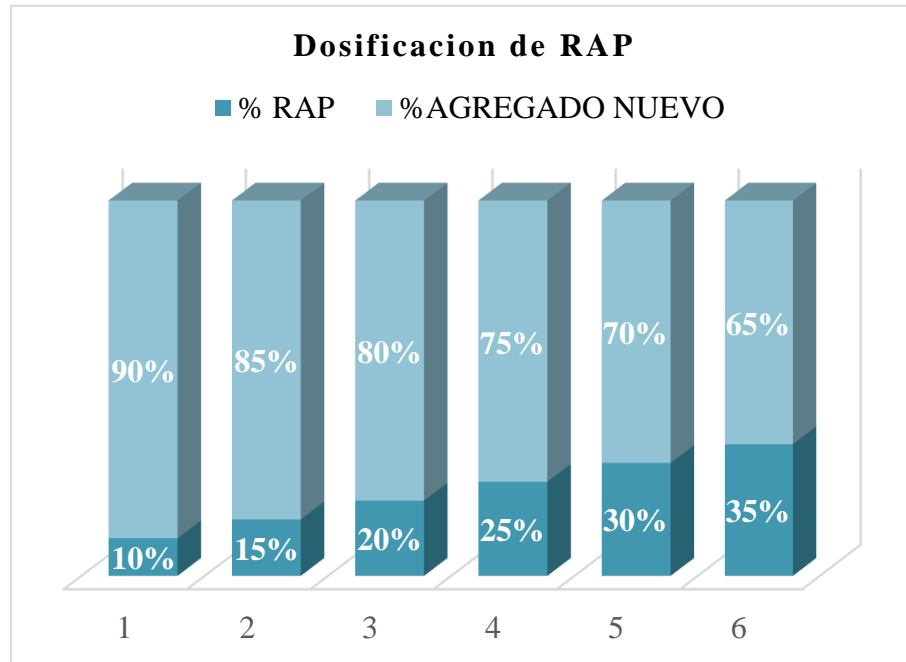
*Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.10 DOSIFICACIÓN DE MESCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EN CALIENTE CON APORTACIÓN DE RAP**

Este material de aportación RAP serán añadidos desde un 10%,15%;20%,25%30, y 35% en la mezcla asfáltica convencional; que previamente se calculó su porcentaje de

agregados y contenido óptimo de cemento asfáltico, siendo este porcentaje óptimo un valor constante para determinar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas con aportación de material reciclado

Gráfico 4.10 Dosificación RAP para la mezcla



Fuente: Elaboración propia.

### Preparación de las muestras de mezclas recicladas

Tabla 4.46 Datos característicos de los componentes de la mezcla

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| Peso Total de Briqueta (gr)     | 1200      |
| Ponderación de Grava (%)        | 20,17     |
| Ponderación de Gravilla (%)     | 35,46     |
| Ponderación de Arena (%)        | 44,37     |
| Ponderación de Filler (%)       | 0         |
| Porcentaje de Briqueta          | 100%      |
| Porcentaje de Cemento Asfáltico | X%        |
| Porcentaje de Agregado          | Y=100 – X |

Fuente: Elaboración propia.

*Tabla 4.47 Dosificación de mezclas recicladas con porcentaje de cemento óptimo de una mezcla convencional y variación en el porcentaje de aportación de RAP.*

|                                  | Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla |        |        |        |        |        |
|----------------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                  | 5,6%   | 5,6%   | 5,6%   | 5,6%   | 5,6%   | 5,6%   |
| Material a reciclar (%)          | 10,00%                                       | 15,00% | 20,00% | 25,00% | 30,00% | 35,00% |
| Material a reciclar (g)          | 120,00                                       | 180,00 | 240,00 | 300,00 | 360,00 | 420,00 |
| Material nuevo (%)               | 90%  | 85,00% | 80,00% | 75,00% | 70,00% | 65,00% |
| Material nuevo (gr)              | 1080   | 1020   | 960    | 900    | 840    | 780    |
| Agregado nuevo (gr)              | 1019,52                                      | 962,88 | 906,24 | 849,60 | 792,96 | 736,32 |
| Peso del Cemento Asfáltico (gr)  | 60,48  | 57,12  | 53,76  | 50,40  | 47,04  | 43,68  |
| Peso de Grava (gr) *             | 205,64                                       | 194,21 | 182,79 | 171,36 | 159,94 | 148,52 |
| Peso de Gravilla (gr) *          | 361,52                                       | 341,44 | 321,35 | 301,27 | 281,18 | 261,10 |
| Peso de Arena (gr) *             | 452,36                                       | 427,23 | 402,10 | 376,97 | 351,84 | 326,71 |
| Peso de Filler (gr) *            | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| Peso total de la briqueta (gr) * | 1200,0                                       | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 |

*Fuente: Elaboración propia.*

### **Procedimiento Mezclas asfálticas con aportación de RAP.**

La preparación de las muestras se realizó en el laboratorio de asfaltos de la Alcaldía Municipal de Tarija, en donde se realizarán seis grupos de briquetas de contenido de cemento asfáltico constante, el óptimo encontrado con los agregados estudiados y cemento asfáltico 85/100; las variaciones son de porcentajes de aportación de RAP.

Primeramente, se realizó el pesaje de las cantidades de grava, gravilla y arena mediante una balanza como se muestra en la siguiente figura, los agregados y el RAP son introducidos al horno para ser calentadas a una temperatura de 110°C.

*Figura 4.51 Agregado y porcentajes de RAP.*



*Fuente: Elaboración propia.*

Luego se pesó la cantidad de cemento asfáltico previamente calentado en un frasco, para después introducirla a la mezcla. Una vez que la mezcla (agregados y RAP) sea homogénea y cumpla con la temperatura adecuada entre 150 y 160°C, se vacía en el molde de la briqueta en tres capas con 25 punzonamientos en cada capa, colocamos láminas de papel a las caras de la briqueta para evitar la adherencia, se coloca el molde en el martillo mecánico, el cual está programado con 75 golpes por cara, como se muestra en la siguiente figura.

*Figura 4.52 Preparación de la mezcla y compactación de la briqueta.*



*Fuente: Elaboración propia.*

Con ayuda de una prensa hidráulica inmediatamente sacamos la muestra del molde, sin olvidar desprender las láminas de papel que colocamos anteriormente.



*Figura 4.53 Extracción de la briqueta del molde*



*Fuente: Elaboración propia.*

Una vez obtenidas todas las muestras las identificamos de manera que no se mezclen y las dejamos reposar mínimamente por 18 horas.

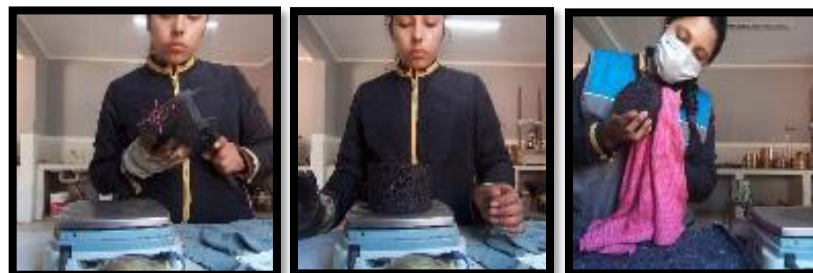
*Figura 4.54 Muestras de briquetas con variación de aportación de RAP*



*Fuente: Elaboración propia.*

Después del reposo se procede a realizar los pesajes de la briqueta, peso seco, peso superficialmente mojado, y peso sumergido.

*Figura 4.55 Peso seco y peso seco superficialmente mojado*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.56 Peso sumergido*



*Fuente: Elaboración propia.*

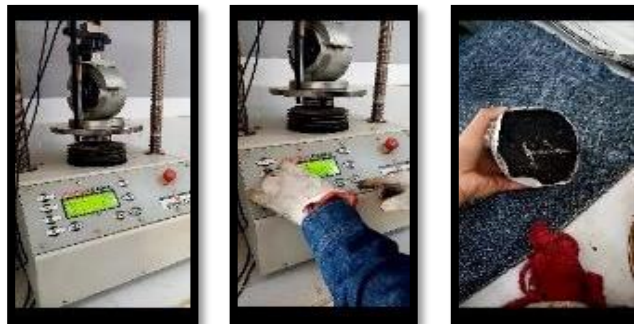
Una vez obtenidos los pesos procede a dejar las briquetas entre 30 y 45 minutos a 60°C para proceder a la ruptura en la prensa Marshall de donde obtendremos valores de fluencia y estabilidad.

*Figura 4.57 Reposo previo a la ruptura de briqueta en la prensa Marshall*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Figura 4.58 Prensa Marshall, medición de fluencia y estabilidad.*



*Fuente: Elaboración propia.*

### Planillas método Marshall de mezclas calientes con aportación de RAP

Comportamiento de la mezcla asfáltica reciclada con variación en la aportación del RAP.

Tabla 4.48 Características de los componentes de la mezcla

| Agregado | P.E. | %     |
|----------|------|-------|
| Grava    | 2,62 | 20,17 |
| Gravilla | 2,60 | 35,46 |
| Arena    | 2,48 | 44,37 |
| Filler   |      |       |

| Granulometría Formada    | P. Específico | % agregado |
|--------------------------|---------------|------------|
| Mat. Retenido Tamiz N° 4 | 2,61          | 51,37      |
| Mat. Pasa Tamiz N° 4     | 2,48          | 48,63      |
| Peso Específico Total    | 2,54          | 100        |

|  |        |
|--|--------|
| Tipo de cemento asfáltico: convencional                        | 85/100 |
| Número de golpes por cara                                      | 75     |
| Temperatura de mezclado (°C)                                   | 160    |
| Peso específico del ligante AASHTO T-229 (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1,0050 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.49 Datos medidos de alturas y pesos de briquetas de mezcla con variación de aporte de RAP.

|            | N°<br>de<br>briqueta | % de Asfalto   |                  | Altura<br>promedi<br>o de<br>briqueta | Peso Briqueta |                   |                      |
|------------|----------------------|----------------|------------------|---------------------------------------|---------------|-------------------|----------------------|
|            |                      | Base<br>mezcla | Base<br>agregado |                                       | Seco          | Sat. sup.<br>Seca | Sumergida<br>en agua |
|            |                      | %              | %                |                                       | grs.          | Grs.              | Grs.                 |
| 10%<br>RAP | 1                    |                |                  | 6,57                                  | 1191,50       | 1193,80           | 665,10               |
|            | 2                    | 5,60           | 5,93             | 6,59                                  | 1191,60       | 1193,90           | 669,30               |
|            | 3                    |                |                  | 6,63                                  | 1191,90       | 1194,50           | 667,30               |
| 15%<br>RAP | 4                    |                |                  | 6,62                                  | 1190,50       | 1194,00           | 667,50               |
|            | 5                    | 5,60           | 5,93             | 6,54                                  | 1193,30       | 1195,70           | 669,90               |
|            | 6                    |                |                  | 6,56                                  | 1193,40       | 1196,30           | 665,20               |
| 20%<br>RAP | 7                    |                |                  | 6,73                                  | 1193,90       | 1196,10           | 663,30               |
|            | 8                    | 5,60           | 5,93             | 6,77                                  | 1192,50       | 1196,10           | 665,30               |
|            | 9                    |                |                  | 6,60                                  | 1194,90       | 1197,80           | 668,20               |
| 25%<br>RAP | 10                   |                |                  | 6,56                                  | 1195,00       | 1197,20           | 664,00               |
|            | 11                   | 5,60           | 5,93             | 6,60                                  | 1192,10       | 1194,10           | 669,60               |
|            | 12                   |                |                  | 6,68                                  | 1187,0        | 1192,00           | 663,80               |
| 30%<br>RAP | 13                   |                |                  | 6,60                                  | 1198,80       | 1201,70           | 670,10               |
|            | 14                   | 5,60           | 5,93             | 6,64                                  | 1188,10       | 1191,00           | 668,60               |
|            | 15                   |                |                  | 6,70                                  | 1194,00       | 1197,90           | 671,80               |
| 35%<br>RAP | 16                   |                |                  | 6,71                                  | 1196,00       | 1198,40           | 676,20               |
|            | 17                   | 5,60           | 5,93             | 6,73                                  | 1191,10       | 1196,60           | 668,90               |
|            | 18                   |                |                  | 6,62                                  | 1195,30       | 1198,20           | 666,70               |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.50 *Determinación de volumen, densidad y porcentaje de vacíos de mezclas recicladas con variación de aporte de RAP.*

| % de aportación de RAP | N° de briqueta | Volumen         | Densidad Briqueta   |                     | % de Vacíos           |                          |                                  |                                      |
|------------------------|----------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
|                        |                | Briqueta        | Densidad real       | Densidad promedio   | Densidad máx. teórica | % de vacíos mezcla total | V.A.M.(vacíos) agregado mineral) | R.B.V. corrección betumen corregido) |
|                        |                | cm <sup>3</sup> | grs/cm <sup>3</sup> | grs/cm <sup>3</sup> | grs/cm <sup>3</sup>   | %                        |                                  | %                                    |
| 10% RAP                | 1              | 528,70          | 2,25                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
|                        | 2              | 524,60          | 2,27                | 2,26                | 2,33                  | 3,00                     | 15,61                            | 80,76                                |
|                        | 3              | 527,20          | 2,26                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
| 15% RAP                | 4              | 526,50          | 2,26                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
|                        | 5              | 525,80          | 2,27                | 2,26                | 2,33                  | 3,12                     | 15,71                            | 80,14                                |
|                        | 6              | 531,10          | 2,25                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
| 20% RAP                | 7              | 532,80          | 2,24                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
|                        | 8              | 530,80          | 2,25                | 2,25                | 2,33                  | 3,61                     | 16,13                            | 77,65                                |
|                        | 9              | 529,60          | 2,26                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
| 25% RAP                | 10             | 533,20          | 2,24                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
|                        | 11             | 524,50          | 2,27                | 2,25                | 2,33                  | 3,35                     | 15,91                            | 78,92                                |
|                        | 12             | 528,20          | 2,25                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
| 30% RAP                | 13             | 531,60          | 2,26                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
|                        | 14             | 522,40          | 2,27                | 2,27                | 2,33                  | 2,82                     | 15,44                            | 81,77                                |
|                        | 15             | 526,10          | 2,27                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
| 35% RAP                | 16             | 522,20          | 2,29                |                     |                       |                          |                                  |                                      |
|                        | 17             | 527,70          | 2,26                | 2,27                | 2,33                  | 2,85                     | 15,48                            | 81,57                                |
|                        | 18             | 531,50          | 2,25                |                     |                       |                          |                                  |                                      |

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 4.51 Lectura de estabilidad y fluencia de mezcla reciclada con variación de aporte de RAP.

| % de aportación de RAP | N° de briqueta | Estabilidad Marshall |                  |                                |                            | Fluencia             |                  |                  |                   |
|------------------------|----------------|----------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                        |                | Lectura carga        | Carga convertida | Factor de corrección de altura | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio | Lectura de flujo | Flujo convertido | Fluencia promedio |
|                        |                | KN                   | lbf              | -                              | lbf                        | lbf                  | mm               | 0,01 pulg        | 0,01 pulg         |
| 10% RAP                | 1              | 24                   | 5395,44          | 0,96                           | 5179,62                    |                      | 380              | 14,96            |                   |
|                        | 2              | 23                   | 5170,63          | 0,96                           | 4963,80                    | 4891,866             | 376              | 14,80            | 15,51             |
|                        | 3              | 21                   | 4721,01          | 0,96                           | 4532,17                    |                      | 426              | 16,77            |                   |
| 15% RAP                | 4              | 24                   | 5395,44          | 0,96                           | 5179,62                    |                      | 356              | 14,02            |                   |
|                        | 5              | 26                   | 5845,06          | 0,96                           | 5611,26                    | 5179,622             | 398              | 15,67            | 15,66             |
|                        | 6              | 22                   | 4945,82          | 0,96                           | 4747,99                    |                      | 439              | 17,28            |                   |
| 20% RAP                | 7              | 25                   | 5620,25          | 0,93                           | 5226,83                    |                      | 415              | 16,34            |                   |
|                        | 8              | 19                   | 4271,39          | 0,96                           | 4100,53                    | 4763,724             | 409              | 16,10            | 16,02             |
|                        | 9              | 23                   | 5170,63          | 0,96                           | 4963,80                    |                      | 397              | 15,63            |                   |
| 25% RAP                | 10             | 27                   | 6069,87          | 0,96                           | 5827,08                    |                      | 398              | 15,67            |                   |
|                        | 11             | 26                   | 5845,06          | 0,96                           | 5611,26                    | 5827,075             | 413              | 16,26            | 15,98             |
|                        | 12             | 28                   | 6294,68          | 0,96                           | 6042,89                    |                      | 407              | 16,02            |                   |
| 30% RAP                | 13             | 28                   | 6294,68          | 0,96                           | 6042,89                    |                      | 416              | 16,38            |                   |
|                        | 14             | 30                   | 6744,30          | 0,96                           | 6474,53                    | 6402,589             | 438              | 17,24            | 16,51             |
|                        | 15             | 31                   | 6969,11          | 0,96                           | 6690,35                    |                      | 404              | 15,91            |                   |
| 35% RAP                | 16             | 29                   | 6519,49          | 0,93                           | 6063,13                    |                      | 425              | 16,73            |                   |
|                        | 17             | 33                   | 7418,73          | 0,93                           | 6899,42                    | 6838,720             | 447              | 17,60            | 16,72             |
|                        | 18             | 35                   | 7868,35          | 0,96                           | 7553,62                    |                      | 402              | 15,83            |                   |

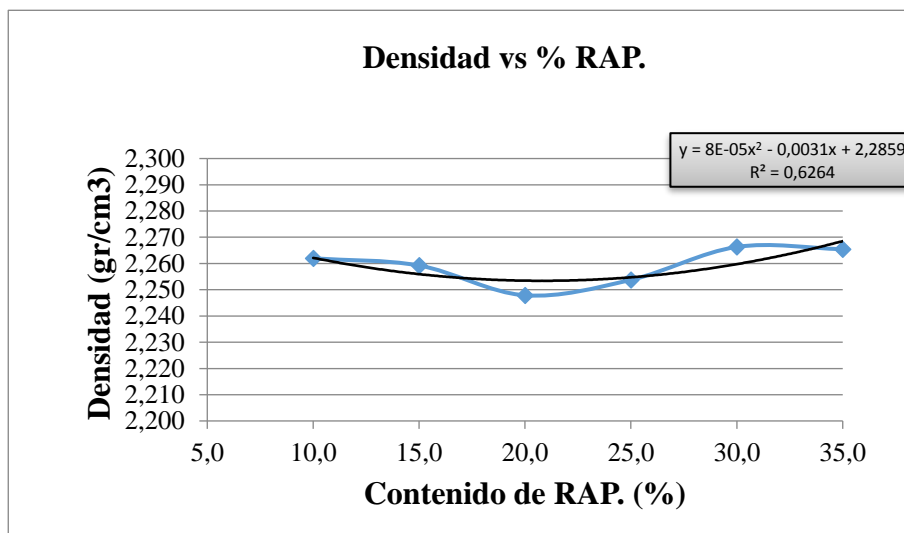
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.10.1 Análisis de resultados de mezclas recicladas con variaciones de aportación de RAP

Los resultados del comportamiento de las propiedades mecánicas se presentan en las siguientes gráficas, una vez determinado los valores de peso volumétrico, estabilidad y fluencia correspondientes para cada contenido de material de aportación RAP, para posteriormente poder realizar un análisis de los resultados de la mezcla asfáltica recicladas.

#### Análisis de resultados de densidad de mezclas asfálticas recicladas.

Gráfico 4.11 Análisis curva densidad vs. % de aportación de RAP.

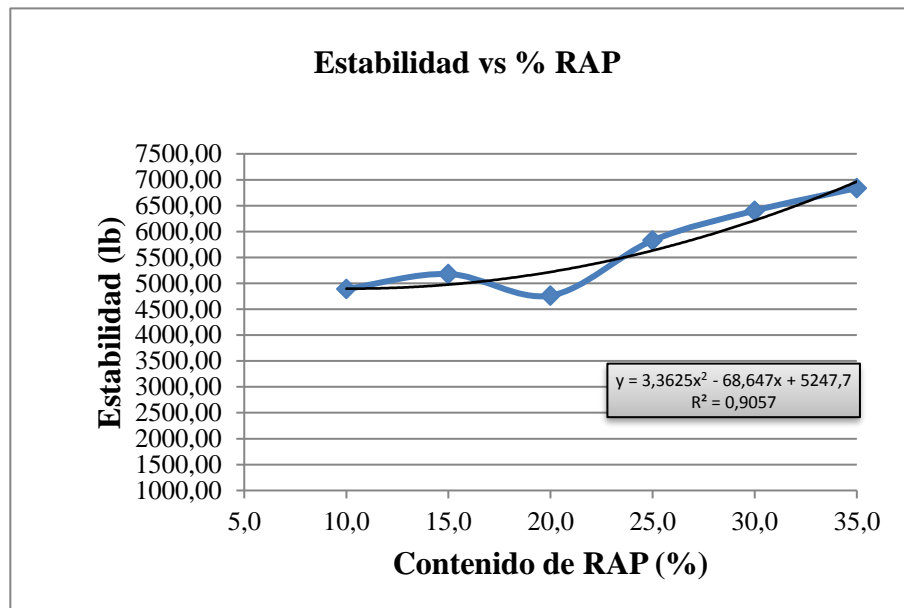


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del porcentaje de RAP expresado en porcentaje y la densidad expresada en  $\text{gr/cm}^3$ , para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que la densidad es inversamente proporcional al % de C.A., entonces a mayor % de C.A., menor densidad. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de RAP, con una línea de tendencia polinómica en donde se puede observar que la densidad varía en pequeñas cantidades, pero en todas cumple con el parámetro de densidad máxima obtenida con la relación de peso específico del ligante y de los agregados de  $2,33 \text{ gr/cm}^3$ .

## Análisis de resultados de la estabilidad de mezclas recicladas.

Gráfico 4.12 Análisis curva estabilidad vs. % de aportación de RAP



Fuente: Elaboración propia.

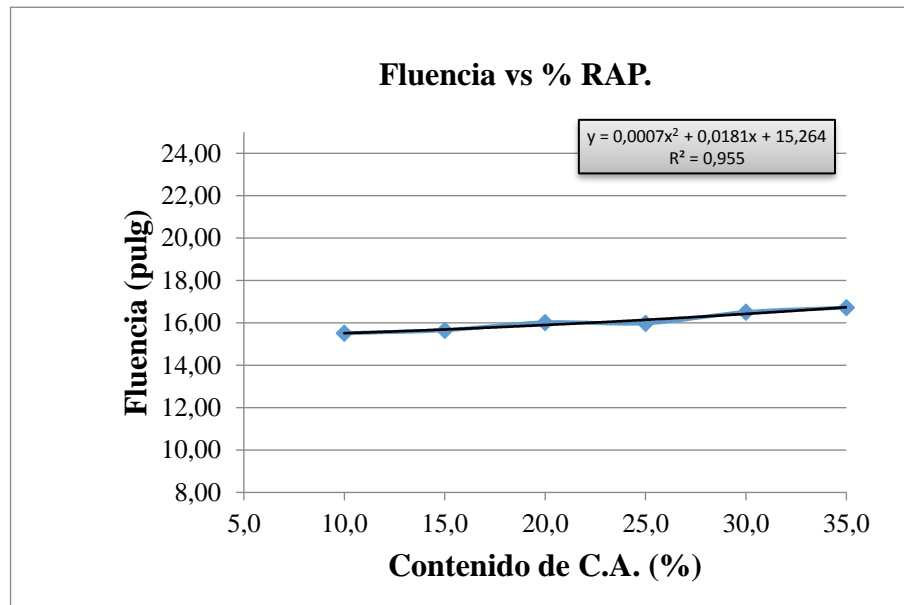
En esta grafica se puede observar claramente el aumento de la estabilidad dando un valor máximo de 6838,72 lb superior a la de una mezcla convencional y dando como valor mínimo de 4763,72 lb.

Comparándola con una mezcla convencional se pudo evidenciar que se mejoraron las propiedades mecánicas al adicionar RAP, se pudo evidenciar que el valor obtenido fue de 4763,72 lb a 6838,72 lb dando por hecho de mis los valores logran estar por encima del mínimo, también se puede evidenciar que a medida que se aumenta el porcentaje de aportación de RAP la estabilidad aumenta y según esas investigaciones valores muy altos de estabilidad provocan mucha rigidez en la mezcla y nos favorable para la durabilidad de la capa de rodadura.



## Análisis de resultados de la Fluencia

Gráfico 4.13 Análisis curva fluencia vs. % de aportación de RAP

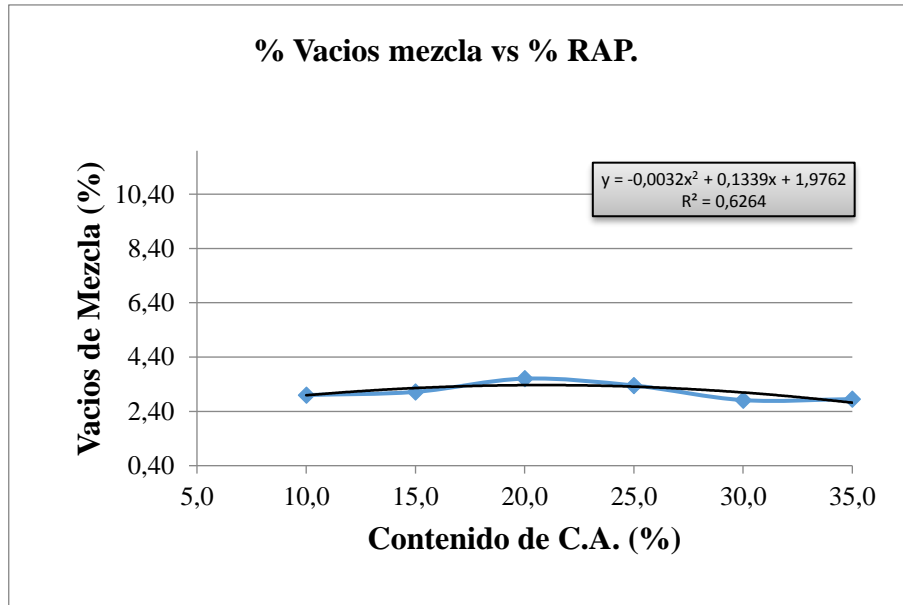


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la relación del porcentaje de RAP con la fluencia expresado en 0,01 pulgadas, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica el flujo es proporcional al % cemento asfáltico, es decir que a mayor % de cemento asfáltico, mayor será el flujo, se observa que los valores de fluencia se encuentran dentro de los parámetros de las especificaciones desde una aportación de 10% de RAP hasta un 25% de RAP; superior a este valor de porcentaje de aportación la fluencia excede su parámetro máximo pero no de manera considerable.

## Análisis de resultados de la relación de porcentaje de vacíos y porcentaje de aportación de RAP

Gráfico 4.14 Análisis de curva de % vacíos en la mezcla vs. % de portación de RAP

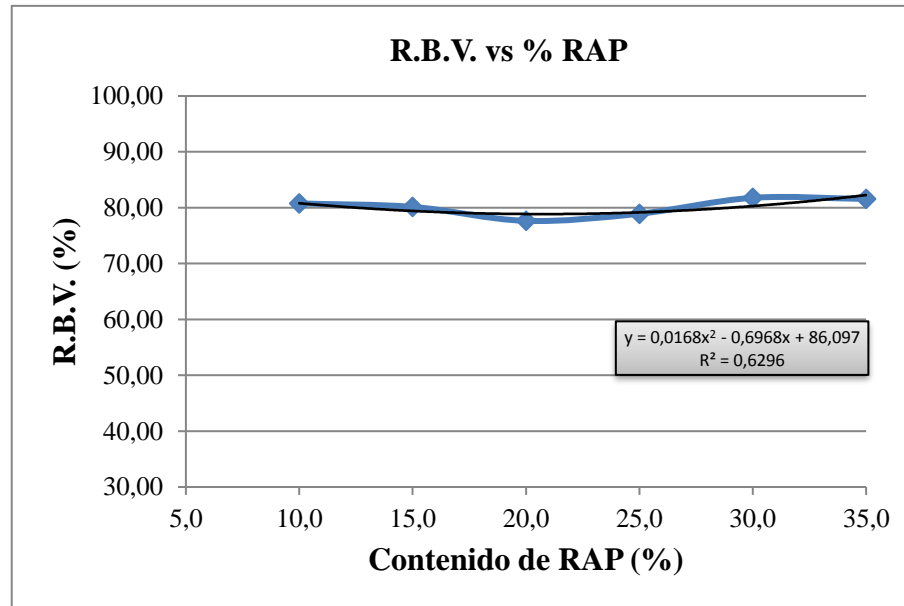


Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de vacíos en las mezclas asfálticas convencionales tienen parámetros en las especificaciones mínimo 3% y máximo 5% en la gráfica de comparación observamos que en los porcentajes de aportación de RAP del 10% al 25% cumplen con el porcentaje de vacíos dentro los parámetros y que a partir del 30% y 35% las mezclas se encuentran por debajo del mínimo de porcentaje de vacíos.

## Análisis de resultados de la Fluencia

Gráfico 4.15 Análisis de curva de relación betún % de vacíos versus. % de aportación de RAP



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica de la relación de betún con el porcentaje de vacíos versus el porcentaje de RAP, se observa de todos los datos obtenidos se acercan a límite superior, pero se encuentran dentro de los parámetros de las especificaciones que son como mínimo 75 y máximo 82.

### Cálculo de máximos y mínimos de un vértice

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

Condición para determinar un vértice

$$a < 0 \text{ ocurre un máximo}$$

$$a > 0 \text{ ocurre un mínimo}$$

Determinación de las coordenadas de un vértice

$$X(\text{vértice}) = -\frac{b}{2a}$$

$$Y(\text{vértice}) = f(x \text{ vértice})$$

**Ecuaciones en estudio:**

**Densidad máxima**

$$y = -0,00008x^2 - 0,0031x + 2,2859$$

|                       |  |               |
|-----------------------|--|---------------|
| <b>a =</b> 0,00008    | <b>&lt; 0</b>                                  | <b>máximo</b> |
| <b>b =</b> -0,0031    |  |               |
| <b>c =</b> 2,2859     |  |               |
| <b>X máx. =</b> 19,38 | Contenido de RAP<br>para la densidad<br>máxima |               |
| <b>Y máx. =</b> 2,26  | Densidad máxima.                               |               |

#### **4.11 VERIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA DE MEZCLAS RECICLADAS CON APORTACIÓN DE RAP (MÉTODO DE EXTRACCIÓN CENTRIFUGA)**

Estos ensayos se realizaron con el fin de observar la curva granulométrica de cada briqueta de mezcla asfáltica con los distintos porcentajes de aportación de RAP y corroborar que esta entre en los parámetros de granulometría aceptadas para mezclas asfálticas calientes convencionales.

**Procedimiento.** –

Cada briqueta es pesada e introducida al horno a no más de 110°C durante 15 minutos para lograr su ablandamiento; luego de manera cuidadosa por la temperatura que tiene se la pone en el plato del extractor centrifugo y con ayuda del disolvente (en el caso fue Gasolina), se obtiene los agregados de cada briqueta, con un secado en el horno y enfriado posterior para realizar el segundo pesaje y granulometría ; obtenemos los pesos retenidos en cada tamiz y el peso del contenido de cemento asfáltico.

Figura 4.59 Pesaje y ablandamiento de la briqueta con mezcla reciclada



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.60 Extracción del cemento asfáltico de la briqueta con mezcla reciclada



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.61 Obtención del agregado pétreo de la briqueta con mezcla reciclada



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.62 Granulometría de la briqueta de mezcla reciclada



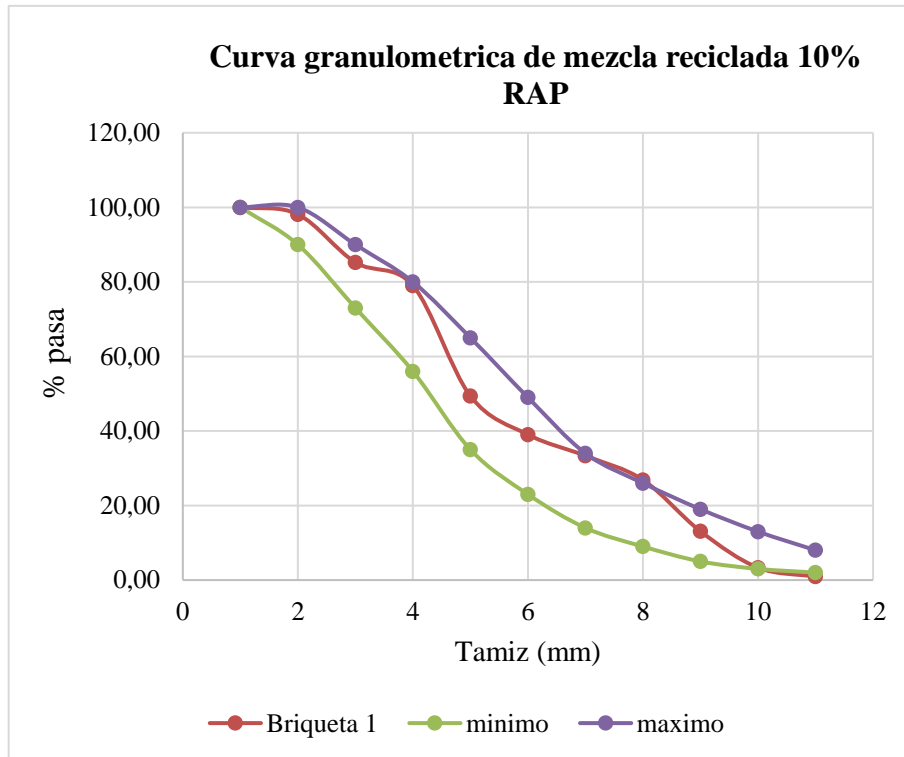
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.52 Verificación granulométrica y contenido de cemento asfáltico (briqueta N°1 con 10% de RAP)

| <b>Material: Mezcla convencional con aporte de 10 % RAP</b> |                   |                  |                   |            |                       |                         |               |
|---|-------------------|------------------|-------------------|------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
| Peso total de la muestra                                    |                   |                  |                   |            | 1191,9                | gr                      |               |
| Peso después de la centrifuga                               |                   |                  |                   |            | 1122,6                | gr                      |               |
| Contenido de cemento asfáltico                              |                   |                  |                   |            | 69,3                  | gr                      |               |
| Porcentaje de cemento asfáltico                             |                   |                  |                   |            | 5,814                 | %                       |               |
| <b>Granulometría</b>  |                   |                  |                   |            |                       |                         |               |
| <b>Briqueta N° 1</b>  |                   |                  |                   |            |                       | <b>Especificaciones</b> |               |
| <b>Tamices</b>  | <b>Tamaño</b>     | <b>Peso ret.</b> | <b>Ret. acum.</b> | <b>Ret</b> | <b>Pasa del total</b> | <b>ASTM D3515</b>       |               |
|   | <b>(mm)</b>       | <b>(gr)</b>      | <b>(gr)</b>       | <b>%</b>   | <b>%</b>              | <b>Mínimo</b>           | <b>Máximo</b> |
| 1"  | 25,4              | 0,00             | 0,00              | 0,00       | <b>100,00</b>         | 100                     | 100           |
| ¾"  | 19,0              | 21,00            | 21,00             | 1,87       | <b>98,13</b>          | 90                      | 100           |
| ½"  | 12,5              | 144,80           | 165,80            | 14,77      | <b>85,23</b>          | 73                      | 90            |
| 3/8"  | 9,50              | 70,00            | 235,80            | 21,00      | <b>79,00</b>          | 56                      | 80            |
| N°4   | 4,75              | 332,60           | 568,40            | 50,63      | <b>49,37</b>          | 35                      | 65            |
| N°8   | 2,36              | 116,10           | 684,50            | 60,97      | <b>39,03</b>          | 23                      | 49            |
| N°16  | 1,18              | 63,80            | 748,30            | 66,66      | <b>33,34</b>          | 14                      | 34            |
| N°30  | 0,60              | 72,70            | 821,00            | 73,13      | <b>26,87</b>          | 9                       | 26            |
| N°50  | 0,30              | 154,80           | 975,80            | 86,92      | <b>13,08</b>          | 5                       | 19            |
| N°100   | 0,15              | 109,40           | 1085,20           | 96,67      | <b>3,33</b>           | 3                       | 13            |
| N°200   | 0,075             | 27,00            | 1112,20           | 99,07      | <b>0,93</b>           | 2                       | 8             |
| Base  | -                 | 10,40            | 1122,60           | 100,00     | <b>0,00</b>           | -                       | -             |
|   | <b>Peso total</b> | <b>1122,6</b>    |                   |            |                       |                         |               |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.16 Curva granulométrica de mezcla reciclada con 10% de aportación de RAP.



Fuente: Elaboración propia.

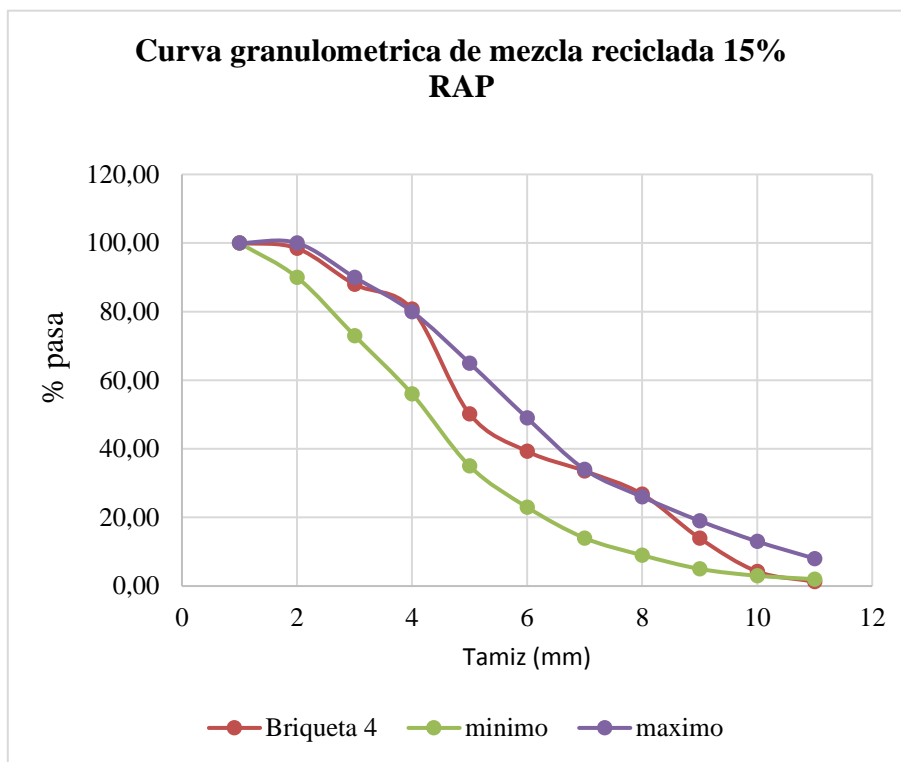
Tabla 4.53 Verificación granulométrica y contenido de cemento asfáltico (briqueta N°4 con 15% de RAP.)

| <b>Material mezcla convencional con aporte de 15 % RAP</b> |                |                   |                    |        |                         |                  |        |
|--|----------------|-------------------|--------------------|--------|-------------------------|------------------|--------|
| Peso total de la muestra                                   |                | 1191,3 gr         |                    |        |                         |                  |        |
| Peso después de la centrifuga                              |                | 1125,2 gr         |                    |        |                         |                  |        |
| Contenido de cemento asfáltico                             |                | 66,1 gr           |                    |        |                         |                  |        |
| Porcentaje de cemento asfáltico                            |                | 5,549 %           |                    |        |                         |                  |        |
| <b>Granulometría</b>                                       |                |                   |                    |        |                         |                  |        |
| Tamices  | Tamaño<br>(mm) | Briqueta N° 4     |                    |        |                         | Especificaciones |        |
|  |                | Peso ret.<br>(gr) | Ret. Acum.<br>(gr) | % Ret  | % que pasa<br>del total | ASTM D3515       |        |
|  |                |                   |                    |        |                         | Mínimo           | Máximo |
| 1"   | 25,4           | 0,00              | 0,00               | 0,00   | <b>100,00</b>           | 100              | 100    |
| ¾"   | 19,0           | 17,50             | 17,50              | 1,56   | <b>98,44</b>            | 90               | 100    |
| ½"   | 12,5           | 118,00            | 135,50             | 12,04  | <b>87,96</b>            | 73               | 90     |
| 3/8"   | 9,50           | 81,60             | 217,10             | 19,29  | <b>80,71</b>            | 56               | 80     |
| N°4  | 4,75           | 343,50            | 560,60             | 49,82  | <b>50,18</b>            | 35               | 65     |
| N°8  | 2,36           | 122,70            | 683,30             | 60,73  | <b>39,27</b>            | 23               | 49     |
| N°16   | 1,18           | 64,50             | 747,80             | 66,46  | <b>33,54</b>            | 14               | 34     |
| N°30   | 0,60           | 76,00             | 823,80             | 73,21  | <b>26,79</b>            | 9                | 26     |
| N°50   | 0,30           | 144,50            | 968,30             | 86,06  | <b>13,94</b>            | 5                | 19     |
| N°100  | 0,15           | 109,10            | 1077,40            | 95,75  | <b>4,25</b>             | 3                | 13     |
| N°200  | 0,075          | 33,40             | 1110,80            | 98,72  | <b>1,28</b>             | 2                | 8      |
| Base   | -              | 14,40             | 1125,20            | 100,00 | <b>0,00</b>             | -                | -      |
| <b>Peso total</b>  |                | <b>1125,2</b>     |                    |        |                         |                  |        |

Fuente: Elaboración propia.



Gráfico 4.17 Curva granulométrica de mezcla reciclada con 15% de aportación de RAP.



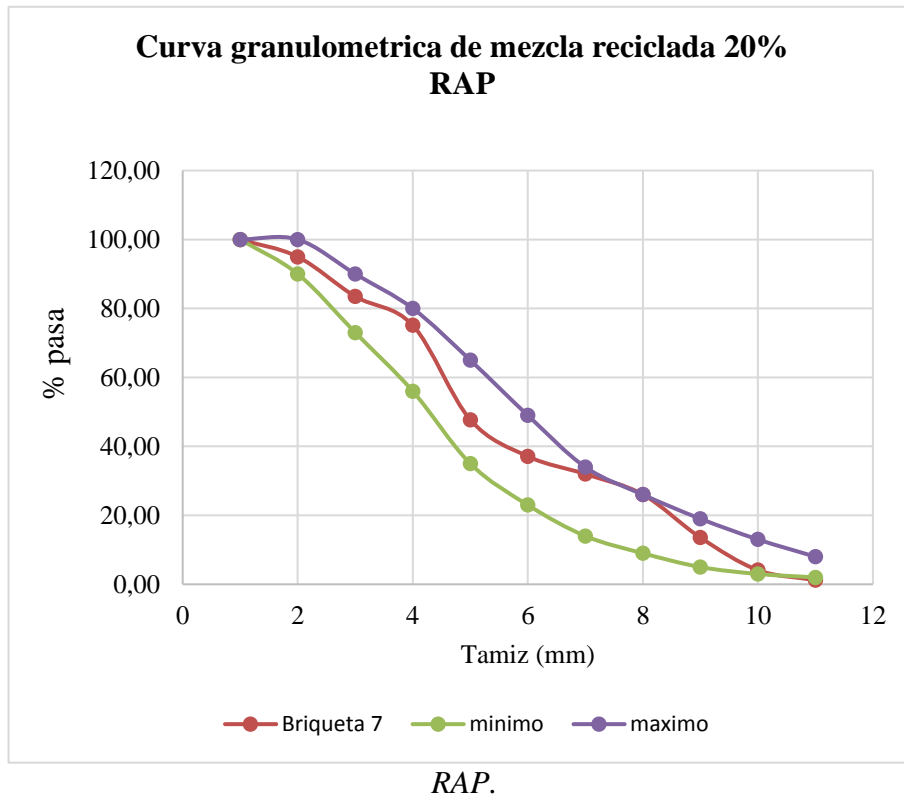
*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 4.54 Verificación granulométrica y contenido de cemento asfáltico (briqueta N° 7 con 20% de RAP.)

| <b>Material mezcla convencional con aporte de 20 % RAP</b> |                |               |           |        |                |                  |        |
|--|----------------|---------------|-----------|--------|----------------|------------------|--------|
| Peso total de la muestra                                   |                | 1200,2 gr     |           |        |                |                  |        |
| Peso después de la centrifuga                              |                | 1131,7 gr     |           |        |                |                  |        |
| Contenido de cemento asfáltico                             |                | 68,5 gr       |           |        |                |                  |        |
| Porcentaje de cemento asfáltico                            |                | 5,707 %       |           |        |                |                  |        |
| <b>Granulometría</b>                                       |                |               |           |        |                |                  |        |
| Tamices  | Tamaño<br>(mm) | Briqueta N° 7 |           |        |                | Especificaciones |        |
|  |                | Peso Ret.     | Ret. Acum | Ret    | Pasa del total | ASTM D3515       |        |
|  |                | (gr)          | (gr)      | %      | %              | Mínimo           | Máximo |
| 1"   | 25,4           | 0,00          | 0,00      | 0,00   | <b>100,00</b>  | 100              | 100    |
| ¾"   | 19,0           | 56,90         | 56,90     | 5,03   | <b>94,97</b>   | 90               | 100    |
| ½"   | 12,5           | 130,00        | 186,90    | 16,51  | <b>83,49</b>   | 73               | 90     |
| 3/8"   | 9,50           | 94,80         | 281,70    | 24,89  | <b>75,11</b>   | 56               | 80     |
| N°4  | 4,75           | 310,00        | 591,70    | 52,28  | <b>47,72</b>   | 35               | 65     |
| N°8  | 2,36           | 120,10        | 711,80    | 62,90  | <b>37,10</b>   | 23               | 49     |
| N°16   | 1,18           | 58,10         | 769,90    | 68,03  | <b>31,97</b>   | 14               | 34     |
| N°30   | 0,60           | 67,00         | 836,90    | 73,95  | <b>26,05</b>   | 9                | 26     |
| N°50   | 0,30           | 141,50        | 978,40    | 86,45  | <b>13,55</b>   | 5                | 19     |
| N°100  | 0,15           | 106,80        | 1085,20   | 95,89  | <b>4,11</b>    | 3                | 13     |
| N°200  | 0,075          | 33,00         | 1118,20   | 98,81  | <b>1,19</b>    | 2                | 8      |
| Base   | -              | 13,50         | 1131,70   | 100,00 | <b>0,00</b>    | -                | -      |
| <b>Peso total</b>  |                | <b>1131,7</b> |           |        |                |                  |        |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.18 Curva granulométrica de mezcla reciclada con 20% de aportación de



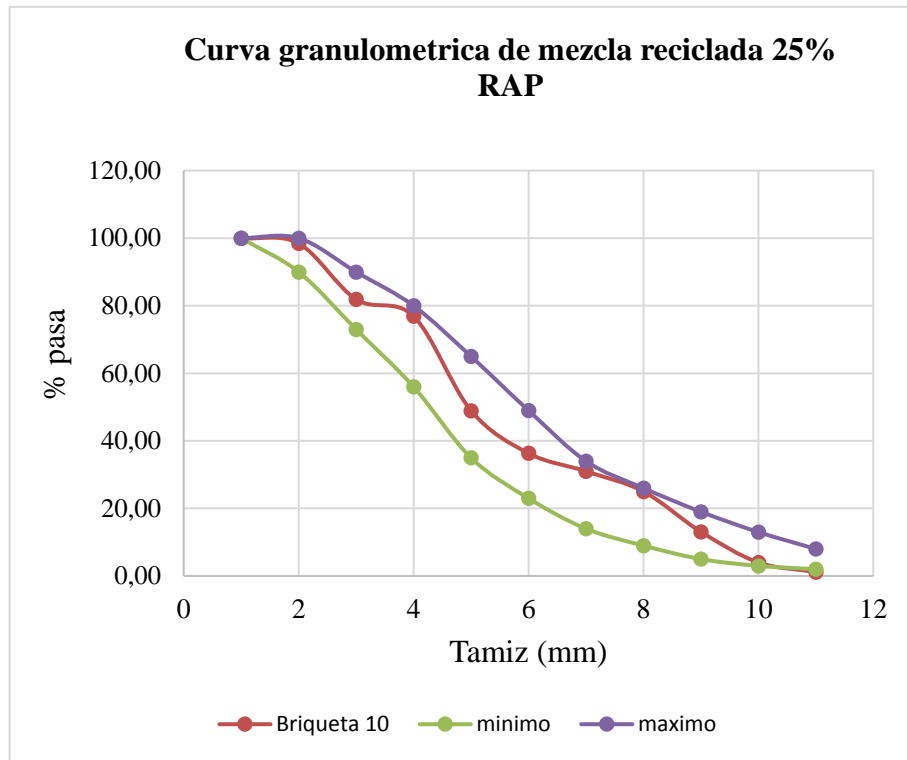
*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 4.55 Verificación granulométrica y contenido de cemento asfáltico (briqueta N° 10 con 25% de RAP.)

| <b>Material mezcla convencional con aporte de 25 % RAP</b> |                |                |           |        |                |                  |        |
|--|----------------|----------------|-----------|--------|----------------|------------------|--------|
| Peso total de la muestra                                   |                | 1194,50 gr     |           |        |                |                  |        |
| Peso después de la centrifuga                              |                | 1130,60 gr     |           |        |                |                  |        |
| Contenido de cemento asfáltico                             |                | 63,90 gr       |           |        |                |                  |        |
| Porcentaje de cemento asfáltico                            |                | 5,35 %         |           |        |                |                  |        |
| <b>Granulometría</b>                                       |                |                |           |        |                |                  |        |
| Tamices  | Briqueta N° 10 |                |           |        |                | Especificaciones |        |
|  | Tamaño         | Peso Ret.      | Ret. Acum | Ret    | Pasa del total | ASTM D3515       |        |
|  | (mm)           | (gr)           | (gr)      | %      | %              | Mínimo           | Máximo |
| 1"   | 25,40          | 0,00           | 0,00      | 0,00   | <b>100,00</b>  | 100              | 100    |
| ¾"   | 19,00          | 17,50          | 17,50     | 1,55   | <b>98,45</b>   | 90               | 100    |
| ½"   | 12,50          | 187,40         | 204,90    | 18,12  | <b>81,88</b>   | 73               | 90     |
| 3/8"   | 9,50           | 56,20          | 261,10    | 23,09  | <b>76,91</b>   | 56               | 80     |
| N°4  | 4,75           | 316,20         | 577,30    | 51,06  | <b>48,94</b>   | 35               | 65     |
| N°8  | 2,36           | 142,50         | 719,80    | 63,67  | <b>36,33</b>   | 23               | 49     |
| N°16   | 1,18           | 60,50          | 780,30    | 69,02  | <b>30,98</b>   | 14               | 34     |
| N°30   | 0,60           | 67,60          | 847,90    | 75,00  | <b>25,00</b>   | 9                | 26     |
| N°50   | 0,30           | 134,80         | 982,70    | 86,92  | <b>13,08</b>   | 5                | 19     |
| N°100  | 0,15           | 102,60         | 1085,30   | 95,99  | <b>4,01</b>    | 3                | 13     |
| N°200  | 0,075          | 32,20          | 1117,50   | 98,84  | <b>1,16</b>    | 2                | 8      |
| Base   | -              | 13,10          | 1130,60   | 100,00 | <b>0,00</b>    | -                | -      |
| <b>Peso total</b>  |                | <b>1130,60</b> |           |        |                |                  |        |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.19 Curva Granulométrica de mezcla reciclada con 25% de aportación de RAP.



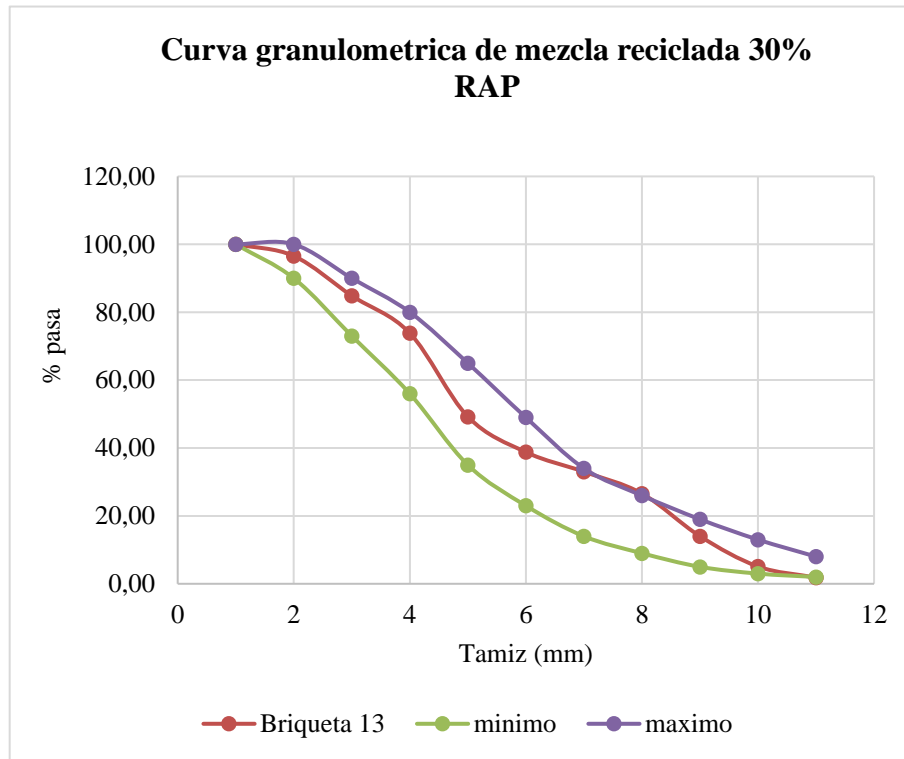
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.56 Verificación granulométrica y contenido de cemento asfáltico (briqueta N° 13 con 30% de RAP.)

| <b>Material mezcla convencional con aporte de 30 % RAP</b> |                   |                  |                  |              |                         |                   |               |
|--|-------------------|------------------|------------------|--------------|-------------------------|-------------------|---------------|
| Peso total de la muestra                                   |                   |                  |                  |              | 1200,40                 | gr                |               |
| Peso después de la centrifuga                              |                   |                  |                  |              | 1131,20                 | gr                |               |
| Contenido de cemento asfáltico                             |                   |                  |                  |              | 69,20                   | gr                |               |
| Porcentaje de cemento asfáltico                            |                   |                  |                  |              | 5,77                    | %                 |               |
| <b>Granulometría</b>                                       |                   |                  |                  |              |                         |                   |               |
| <b>Briqueta N° 13</b>                                      |                   |                  |                  |              | <b>Especificaciones</b> |                   |               |
| <b>Tamices</b>   | <b>Tamaño</b>     | <b>Peso Ret.</b> | <b>Ret. Acum</b> | <b>% Ret</b> | <b>% que pasa</b>       | <b>ASTM D3515</b> |               |
|  | <b>(mm)</b>       | <b>(gr)</b>      | <b>(gr)</b>      |              | <b>del total</b>        | <b>Mínimo</b>     | <b>Máximo</b> |
| 1"   | 25,40             | 0,00             | 0,00             | 0,00         | <b>100,00</b>           | 100               | 100           |
| ¾"   | 19,00             | 39,00            | 39,00            | 3,45         | <b>96,55</b>            | 90                | 100           |
| ½"   | 12,50             | 132,50           | 171,50           | 15,16        | <b>84,84</b>            | 73                | 90            |
| 3/8"   | 9,50              | 124,50           | 296,00           | 26,17        | <b>73,83</b>            | 56                | 80            |
| N°4  | 4,75              | 278,40           | 574,40           | 50,78        | <b>49,22</b>            | 35                | 65            |
| N°8  | 2,36              | 118,10           | 692,50           | 61,22        | <b>38,78</b>            | 23                | 49            |
| N°16   | 1,18              | 65,30            | 757,80           | 66,99        | <b>33,01</b>            | 14                | 34            |
| N°30   | 0,60              | 72,70            | 830,50           | 73,42        | <b>26,58</b>            | 9                 | 26            |
| N°50   | 0,30              | 142,20           | 972,70           | 85,99        | <b>14,01</b>            | 5                 | 19            |
| N°100  | 0,15              | 100,90           | 1073,60          | 94,91        | <b>5,09</b>             | 3                 | 13            |
| N°200  | 0,075             | 37,20            | 1110,80          | 98,20        | <b>1,80</b>             | 2                 | 8             |
| Base   | -                 | 20,40            | 1131,20          | 100,00       | <b>0,00</b>             | -                 | -             |
|  | <b>Peso total</b> | <b>1131,2</b>    |                  |              |                         |                   |               |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.20 Curva granulométrica de mezcla reciclada con 30% de aportación de RAP



Fuente: Elaboración propia.

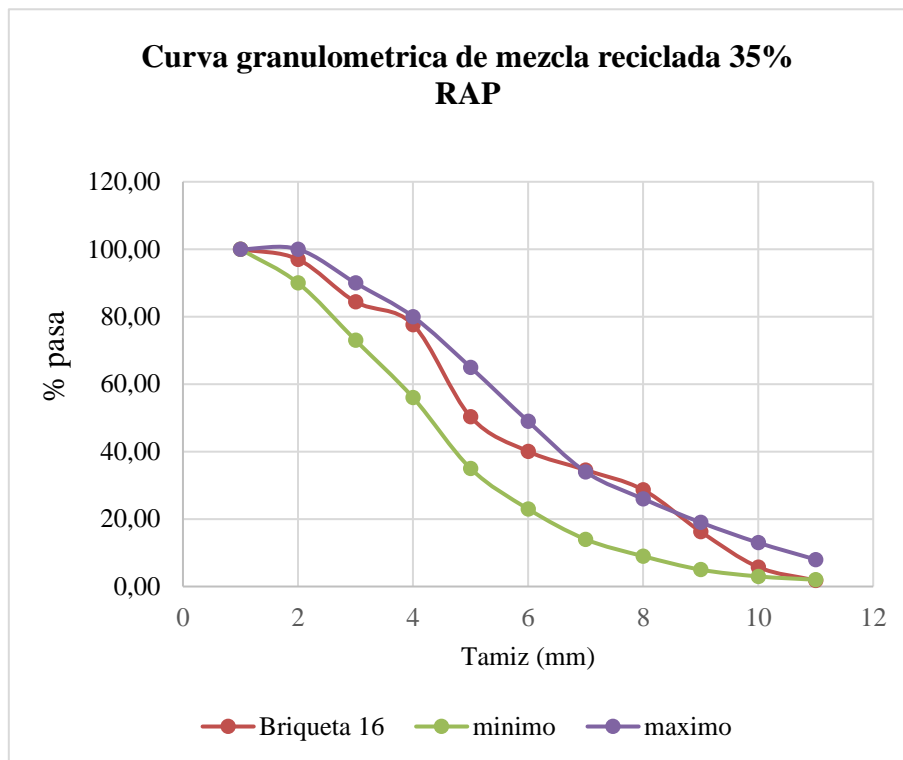
Tabla 4.57 Verificación granulométrica y contenido de cemento asfáltico (briqueta N° 16 con 35% de RAP.)

| <b>Material: Mezcla convencional con aporte de 35 % RAP</b> |                       |                  |                  |            |                       |                         |               |
|---|-----------------------|------------------|------------------|------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
| Peso total de la muestra                                    |                       |                  |                  |            | 1197,40               | gr                      |               |
| Peso después de la centrifuga                               |                       |                  |                  |            | 1130,40               | gr                      |               |
| Contenido de cemento asfáltico                              |                       |                  |                  |            | 67,00                 | gr                      |               |
| Porcentaje de cemento asfáltico                             |                       |                  |                  |            | 5,60                  | %                       |               |
| <b>Granulometría</b>  |                       |                  |                  |            |                       |                         |               |
| <b>Tamices</b>  | <b>Briqueta N° 16</b> |                  |                  |            |                       | <b>Especificaciones</b> |               |
|   | <b>Tamaño</b>         | <b>Peso ret.</b> | <b>Ret. Acum</b> | <b>Ret</b> | <b>Pasa del total</b> | <b>ASTM D3515</b>       |               |
|   | <b>(mm)</b>           | <b>(gr)</b>      | <b>(gr)</b>      | <b>%</b>   | <b>%</b>              | <b>Mínimo</b>           | <b>Máximo</b> |
| 1"  | 25,40                 | 0,00             | 0,00             | 0,00       | <b>100,00</b>         | 100                     | 100           |
| ¾"  | 19,00                 | 33,90            | 33,90            | 3,00       | <b>97,00</b>          | 90                      | 100           |
| ½"  | 12,50                 | 142,50           | 176,40           | 15,61      | <b>84,39</b>          | 73                      | 90            |
| 3/8"  | 9,50                  | 76,50            | 252,90           | 22,37      | <b>77,63</b>          | 56                      | 80            |
| N°4   | 4,75                  | 308,70           | 561,60           | 49,68      | <b>50,32</b>          | 35                      | 65            |
| N°8   | 2,36                  | 115,80           | 677,40           | 59,93      | <b>40,07</b>          | 23                      | 49            |
| N°16  | 1,18                  | 62,50            | 739,90           | 65,45      | <b>34,55</b>          | 14                      | 34            |
| N°30  | 0,60                  | 66,50            | 806,40           | 71,34      | <b>28,66</b>          | 9                       | 26            |
| N°50  | 0,30                  | 139,80           | 946,20           | 83,70      | <b>16,30</b>          | 5                       | 19            |
| N°100   | 0,15                  | 118,90           | 1065,10          | 94,22      | <b>5,78</b>           | 3                       | 13            |
| N°200   | 0,075                 | 45,20            | 1110,30          | 98,22      | <b>1,78</b>           | 2                       | 8             |
| Base  | -                     | 20,10            | 1130,40          | 100,00     | <b>0,00</b>           | -                       | -             |
|   | <b>Peso total</b>     | <b>1130,4</b>    |                  |            |                       |                         |               |

Fuente: Elaboración propia.



Gráfico 4.21 Curva granulométrica de mezcla reciclada con 35% de aportación de RAP.



*Fuente: Elaboración propia.*

Se verifica que la granulometría de las mezclas asfálticas recicladas con aportaciones desde un 10% de RAP hasta un 35% de RAP entra entre los parámetros de curva ASTM-D-3515; y el porcentaje de contenido de asfalto es muy próximo al porcentaje óptimo calculado para una mezcla convencional

Los detalles de todas las briquetas serán adjuntados en anexo (Anexo G)

## 4.12 OBTENCIÓN DE CONTENIDO ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

### 4.12.1 Mezclas recicladas con variación de cemento asfáltico y porcentaje de RAP constante de 20%

**Procedimiento. –**

El procedimiento es el mismo de el de un ensayo de mezclas convencional en caliente con la aportación de RAP EN UN 20%; con variaciones de cemento asfáltico por encima y por debajo del optimo calculado en el primer ensayo de Marshall para mezclas convencionales de 5,2%.5,4%,5,6%,5,8% y 6%

*Figura 4.63 Procedimiento ensayo Marshall mezcla reciclada con 20% de RAP.*



*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla 4.58 Dosificación para mezclas recicladas con aportación de RAP del 20% y variación de cemento asfáltico.*

|                                   | <b>Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla</b> |             |             |             |             |
|-----------------------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                   | <b>5,2%</b>   | <b>5,4%</b> | <b>5,6%</b> | <b>5,8%</b> | <b>6,0%</b> |
| Material a reciclar (%)           | 20,00%  | 20,00%      | 20,00%      | 20,00%      | 20,00%      |
| Material a reciclar (g)           | 240,00  | 240,00      | 240,00      | 240,00      | 240,00      |
| Material nuevo (%)                | 80%   | 80,00%      | 80,00%      | 80,00%      | 80,00%      |
| Material nuevo (gr)               | 960,00  | 960,00      | 960,00      | 960,00      | 960,00      |
| agregado nuevo (gr)               | 910,08  | 908,16      | 906,24      | 904,32      | 902,40      |
| Peso del Cemento Asfáltico (gr) * | 49,92   | 51,84       | 53,76       | 55,68       | 57,60       |
| Peso de Grava (gr) *              | 182,79  | 182,79      | 182,79      | 182,79      | 182,79      |
| Peso de Gravilla (gr) *           | 321,35  | 321,35      | 321,35      | 321,35      | 321,35      |
| Peso de Arena (gr) *              | 402,10  | 402,10      | 402,10      | 402,10      | 402,10      |
| Peso de Filler (gr) *             | 0,00  | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,00        |

*Fuente: Elaboración propia.*

### Planillas método Marshall

Tabla 4.59 Datos medidos de alturas de briquetas con 20% de RAP., peso seco, peso saturado superficialmente seco y peso sumergido.

| N° de<br>briqueta | % de Asfalto   |                  | Altura<br>promedio<br>de<br>briqueta | Peso Briqueta |                   |                      |
|-------------------|----------------|------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------|----------------------|
|                   | Base<br>mezcla | Base<br>agregado |                                      | Seco          | Sat. Sup.<br>Seca | Sumergida<br>en agua |
|                   | %              | %                |                                      | grs.          | Grs.              | Grs.                 |
| 1                 |                |                  | 6,48                                 | 1175,50       | 1178,20           | 665,40               |
| 2                 | 5,20           | 5,49             | 6,56                                 | 1188,90       | 1192,90           | 669,10               |
| 3                 |                |                  | 6,59                                 | 1192,60       | 1195,50           | 670,50               |
| 4                 |                |                  | 6,62                                 | 1183,50       | 1188,80           | 663,20               |
| 5                 | 5,40           | 5,71             | 6,53                                 | 1184,40       | 1187,10           | 668,50               |
| 6                 |                |                  | 6,68                                 | 1188,90       | 1193,10           | 660,30               |
| 7                 |                |                  | 6,63                                 | 1188,10       | 1191,70           | 665,50               |
| 8                 | 5,60           | 5,93             | 6,64                                 | 1194,60       | 1196,90           | 664,90               |
| 9                 |                |                  | 6,52                                 | 1191,00       | 1193,70           | 674,40               |
| 10                |                |                  | 6,56                                 | 1195,20       | 1198,40           | 677,50               |
| 11                | 5,80           | 6,16             | 6,55                                 | 1192,50       | 1195,40           | 672,30               |
| 12                |                |                  | 6,62                                 | 1194,50       | 1199,00           | 675,10               |
| 13                |                |                  | 6,54                                 | 1200,40       | 1202,00           | 681,30               |
| 14                | 6,00           | 6,38             | 6,47                                 | 1192,00       | 1192,80           | 678,00               |
| 15                |                |                  | 6,48                                 | 1193,70       | 1194,60           | 678,10               |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.60 *Determinación de volumen, densidad y porcentaje de vacíos de mezcla reciclada con 20% de aportación de RAP.*

| Nº de briqueta | % de C. Asfáltico | Volumen         | Densidad Briqueta           |                                 |  | % de Vacíos                            |  | R.B.V.<br>(relación<br>betumen<br>vacios) |
|----------------|-------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------------|--|--|--|---|
|                |                   | briqueta<br>cm3 | Densidad<br>real<br>grs/cm3 | Densidad<br>promedio<br>grs/cm3 | Densidad<br>máxima<br>teórica<br>grs/cm3 | % de<br>vacíos<br>mezcla<br>total<br>% | V.A.M.(vacíos<br>agregado<br>mineral)<br>% |   |
| 1              |                   | 512,80          | 2,29                        |                                 |  |  |  |   |
| 2              | 5,20              | 523,80          | 2,27                        | 2,28                            | 2,35                                     | 3,09                                   | 14,73                                      | 79,02                                     |
| 3              |                   | 525,00          | 2,27                        |                                 |  |  |  |   |
| 4              |                   | 525,60          | 2,25                        |                                 |  |  |  |   |
| 5              | 5,40              | 518,60          | 2,28                        | 2,26                            | 2,34                                     | 3,74                                   | 15,71                                      | 76,19                                     |
| 6              |                   | 532,80          | 2,23                        |                                 |  |  |  |   |
| 7              |                   | 526,20          | 2,26                        |                                 |  |  |  |   |
| 8              | 5,60              | 532,00          | 2,25                        | 2,27                            | 2,34                                     | 3,02                                   | 15,48                                      | 80,52                                     |
| 9              |                   | 519,30          | 2,29                        |                                 |  |  |  |   |
| 10             |                   | 520,90          | 2,29                        |                                 |  |  |  |   |
| 11             | 5,80              | 523,10          | 2,28                        | 2,28                            | 2,33                                     | 1,90                                   | 14,91                                      | 87,29                                     |
| 12             |                   | 523,90          | 2,28                        |                                 |  |  |  |   |
| 13             |                   | 520,70          | 2,31                        |                                 |  |  |  |   |
| 14             | 6,00              | 514,80          | 2,32                        | 2,31                            | 2,32                                     | 0,47                                   | 14,09                                      | 96,63                                     |
| 15             |                   | 516,50          | 2,31                        |                                 |  |  |  |   |
|                |                   |                 | Min.                        | Especificaciones                |  | 3                                      | 13   | 75  |
|                |                   |                 | Máx.                        |                                 |  | 5                                      | -  | 82  |

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla 4.61 Lectura de estabilidad y fluencia de mezcla reciclada con aportación de 20% de RAP. Y variación de cemento asfáltico.*

| N° de briqueta | % de C. Asfáltico | Estabilidad Marshall |                  |  |                            | Fluencia             |                  |                  |                   |
|----------------|-------------------|----------------------|------------------|--|----------------------------|----------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                |                   | Lectura carga        | Carga convertida | Factor de corrección de altura de briqueta | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio | Lectura de flujo | Flujo convertido | Fluencia promedio |
|                |                   | KN                   | lbf              | -  | lbf                        | lbf                  | mm               | 0,01 pulg        | 0,01 pulg         |
| 1              |                   | 21                   | 4721,01          | 0,97                                       | 4579,38                    |                      | 374              | 14,72            |                   |
| 2              | 5,20              | 20                   | 4496,20          | 0,95                                       | 4271,39                    | 4570,39              | 372              | 14,65            | 15,54             |
| 3              |                   | 23                   | 5170,63          | 0,94                                       | 4860,39                    |                      | 438              | 17,24            |                   |
| 4              |                   | 22                   | 4945,82          | 0,96                                       | 4747,99                    |                      | 321              | 12,64            |                   |
| 5              | 5,40              | 23                   | 5170,63          | 0,96                                       | 4963,80                    | 4491,70              | 431              | 16,97            | 13,90             |
| 6              |                   | 18                   | 4046,58          | 0,93                                       | 3763,32                    |                      | 307              | 12,09            |                   |
| 7              |                   | 21                   | 4721,01          | 0,95                                       | 4484,96                    |                      | 369              | 14,53            |                   |
| 8              | 5,60              | 22                   | 4945,82          | 0,94                                       | 4649,07                    | 4339,58              | 401              | 15,79            | 15,05             |
| 9              |                   | 18                   | 4046,58          | 0,96                                       | 3884,72                    |                      | 377              | 14,84            |                   |
| 10             |                   | 20                   | 4496,20          | 0,95                                       | 4271,39                    |                      | 408              | 16,06            |                   |
| 11             | 5,80              | 22                   | 4945,82          | 0,95                                       | 4698,53                    | 4328,34              | 384              | 15,12            | 15,55             |
| 12             |                   | 19                   | 4271,39          | 0,94                                       | 4015,11                    |                      | 393              | 15,47            |                   |
| 13             |                   | 20                   | 4496,20          | 0,95                                       | 4271,39                    |                      | 344              | 13,54            |                   |
| 14             | 6,00              | 18                   | 4046,58          | 0,97                                       | 3925,18                    | 4476,72              | 440              | 17,32            | 16,57             |
| 15             |                   | 24                   | 5395,44          | 0,97                                       | 5233,58                    |                      | 479              | 18,86            |                   |

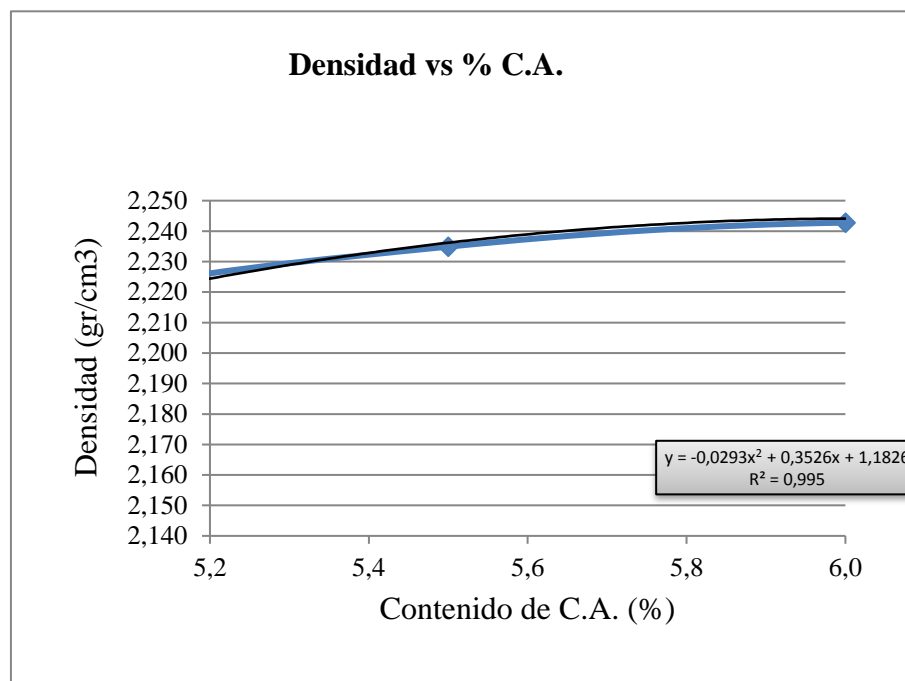
*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.12.2 Análisis de resultados de mezclas recicladas con variaciones de Cemento asfáltico

Este ensayo de Marshall se realizó con la finalidad de obtener el porcentaje de cemento asfáltico para el total de la masa de la mezcla asfáltica reciclada.

En las curvas siguientes se observa que en todas se cumple los valores dentro los parámetros máximos y mínimos establecidos en las especificaciones

Gráfico 4.22 Análisis de curva de densidad vs. % de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.23 Análisis de curva de estabilidad vs. % de cemento asfáltico

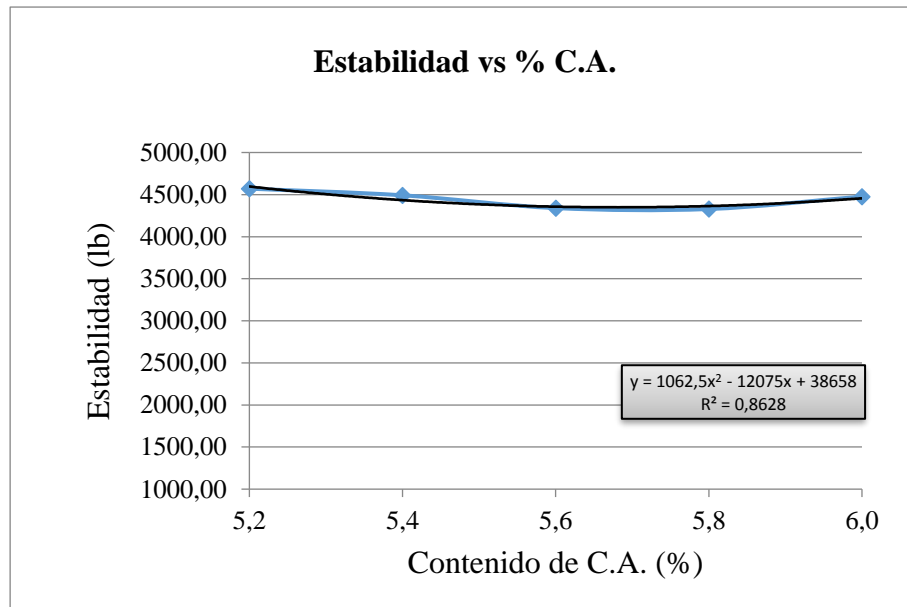


Gráfico 4.24 Análisis de curva de fluencia vs. % de cemento asfáltico

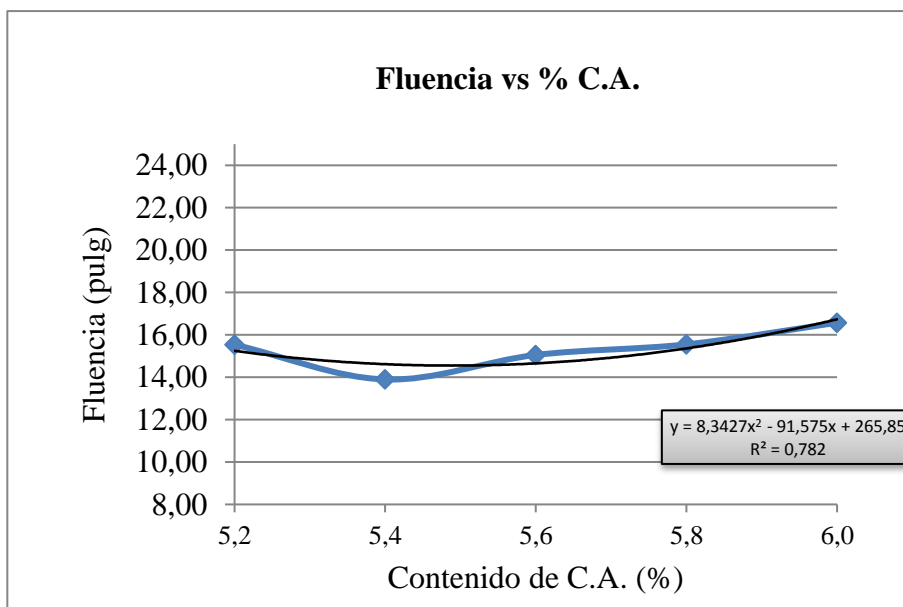
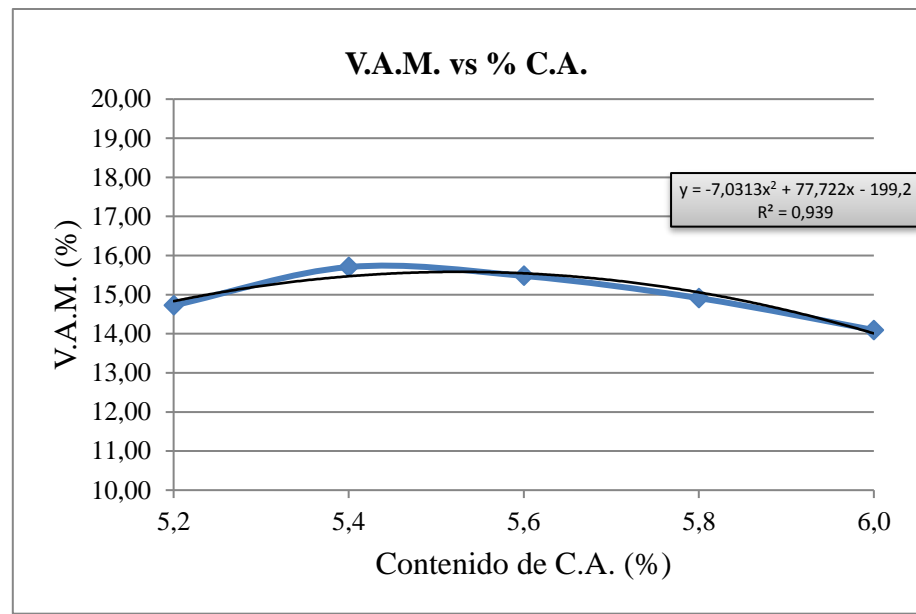


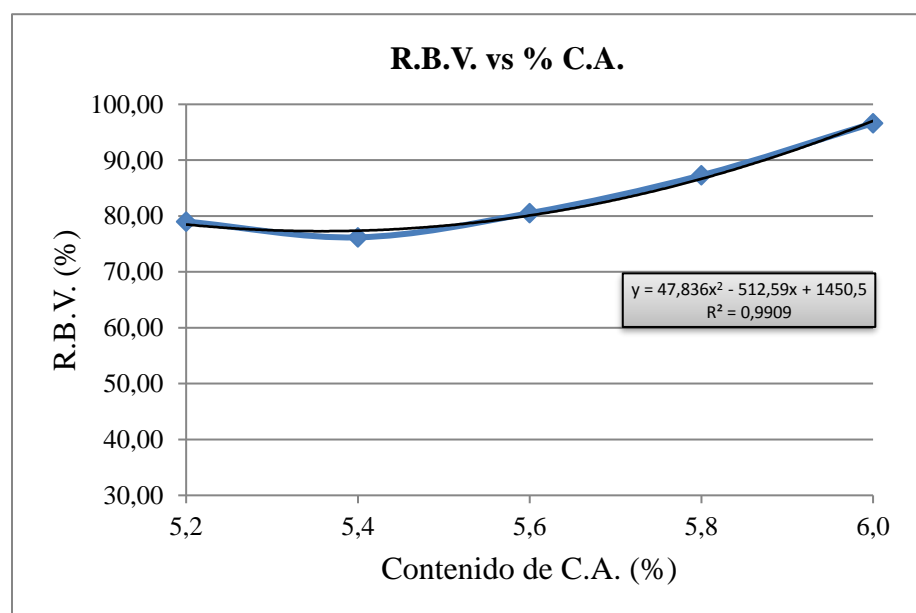


Gráfico 4.25 *Análisis de curva de porcentaje de Vacíos del agregado vs. % de cemento asfáltico*



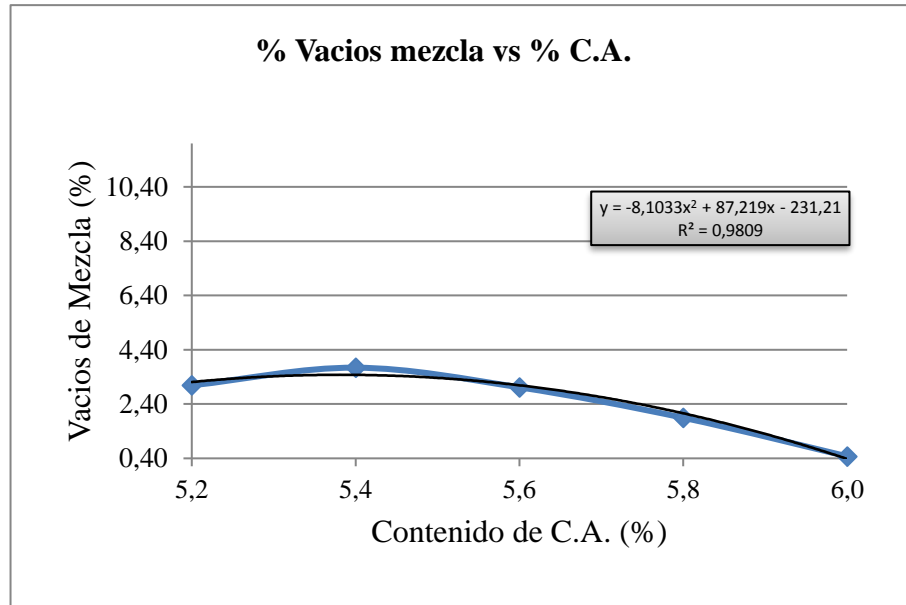
Fuente: *Elaboración propia.*

Gráfico 4.26 *Análisis de curva de relación de betúmen y porcentaje de vacíos vs. % de cemento asfáltico*



Fuente: *Elaboración propia.*

Gráfico 4.27 Análisis curvo de % de vacíos de la mezcla vs. % de cemento asfáltico

**Máximo y mínimo de un vértice.**

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

$a < 0$  ocurre un máximo

$a > 0$  ocurre un mínimo

**Determinación de las coordenadas de un vértice.**

$$X(\text{vértice}) = -\frac{b}{2a}$$

$$y(\text{vértice}) = f(x \text{ vértice})$$

Ecuaciones en estudio

$$y = -0,0293x^2 + 0,3526x + 1,1826$$

|                      |  |               |
|----------------------|--|---------------|
| <b>a =</b> -0,0293   | <b>&lt; 0</b>                                | <b>máximo</b> |
| <b>b =</b> 0,3526    |  |               |
| <b>c =</b> 1,1826    |  |               |
| <b>X máx. = 6,02</b> | Contenido de ligante para la densidad máxima |               |
| <b>Y máx. = 2,24</b> | Densidad máxima.                             |               |

**Estabilidad máxima**

$$y = 1062,5x^2 - 12075x + 38658$$

|                         |   |               |
|-------------------------|---|---------------|
| <b>a =</b> 1062,5       | <b>&lt; 0</b>                                   | <b>máximo</b> |
| <b>b =</b> -12075       |   |               |
| <b>c =</b> 38658        |   |               |
| <b>X máx. = 5,68</b>    | Contenido de ligante para la estabilidad máxima |               |
| <b>Y máx. = 4350,79</b> | Estabilidad máxima.                             |               |

**Vacíos en la mezcla**

Vacíos de la mezcla debe ser igual a 3, 4 ó 5 % según diseño, se reemplaza dicho valor en “y” para obtener el valor de la incógnita “x” (contenido de ligante a ese % de vacíos).

$$y = -8,1033x^2 + 87,219x - 231,21$$

|                      |  |               |
|----------------------|--|---------------|
| <b>a =</b> -8,1033   | <b>&gt; 0</b>  | <b>mínimo</b> |
| <b>b =</b> 87,219    |  |               |
| <b>c =</b> -231,21   |  |               |
| <b>X máx. =</b> 4,90 | Contenido de ligante para los vacíos de la mezcla mínimo |               |
| <b>Y máx. =</b> 1,52 | Vacíos de la mezcla mínimo                               |               |

*Tabla 4.62 Determinación de porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezclas recicladas con aportación de 20% de RAP.*

|  | <b>Ensayo</b>                         | <b>Valor de Diseño</b> | <b>% de C.A.</b> |
|--|---------------------------------------|------------------------|------------------|
| Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico | Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,26                   | 6,02             |
|  | Estabilidad Marshall (Lb)             | 4897,33                | 5,68             |
|  | Vacíos de la mezcla (%)               | 4,00                   | 4,90             |
|  | <b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>    | <b>Promedio (%) =</b>  | <b>5,53</b>      |

*Fuente: Elaboración propia.*

De donde obtenemos que el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para la masa total de la mezcla asfáltica es de 5,53%

#### 4.13 COMPORTAMIENTO DE MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA

Tabla 4.63 Propiedades mecánicas de muestras con variación de aportación de RAP

|                                       | Unidad                   | Mezcla asfáltica convencional | Mezcla asfáltica reciclada |          |          |          |          |          |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                       |                          |                               | 10% RAP                    | 15% RAP  | 20% RAP  | 25% RAP  | 30% RAP  | 35% RAP  |
| <b>Densidad</b>                       | <b>gr/cm<sup>3</sup></b> | 2,230                         | 2,260                      | 2,260    | 2,250    | 2,250    | 2,270    | 2,270    |
| <b>% de vacíos mezcla total</b>       | <b>%</b>                 | 4,310                         | 3,000                      | 3,120    | 3,610    | 3,350    | 2,820    | 2,850    |
| <b>Estabilidad</b>                    | <b>lbf</b>               | 4381,920                      | 4891,866                   | 5179,622 | 4763,724 | 5827,075 | 6402,589 | 6838,720 |
| <b>Fluencia</b>                       | <b>0,01 plg</b>          | 15,810                        | 15,510                     | 15,660   | 16,020   | 15,980   | 16,510   | 16,720   |
| <b>Contenido de cemento asfáltico</b> | <b>%</b>                 | 5,650                         | 5,600                      | 5,600    | 5,600    | 5,600    | 5,600    | 5,600    |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.64 Propiedades mecánicas de muestras con variación de aportación de cemento asfáltico

|                                       | Unidad                   | Mezcla<br>asfáltica<br>convencional | Mezcla asfáltica reciclada |          |          |          |          |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                                       |                          |                                     | 20% RAP                    | 20% RAP  | 20% RAP  | 20% RAP  | 20% RAP  |
| <b>Densidad</b>                       | <b>gr/cm<sup>3</sup></b> | 2,230                               | 2,280                      | 2,260    | 2,270    | 2,280    | 2,310    |
| <b>% de vacíos mezcla total</b>       | <b>%</b>                 | 4,310                               | 3,090                      | 3,740    | 3,020    | 1,90     | 0,470    |
| <b>Estabilidad</b>                    | <b>lbf</b>               | 4381,92                             | 4570,387                   | 4491,704 | 4339,582 | 4328,342 | 4476,716 |
| <b>Fluencia</b>                       | <b>0,01 plg</b>          | 15,810                              | 15,540                     | 13,90    | 15,050   | 15,550   | 16,570   |
| <b>Contenido de cemento asfáltico</b> | <b>%</b>                 | 5,650                               | 5,200                      | 5,400    | 5,600    | 5,800    | 6,000    |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.65 Especificaciones Marshall de Diseño

| Especificación del<br>Método Marshall | Tráfico liviano |      | Tráfico mediano |      | Tráfico pesado} |      |
|---------------------------------------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
|                                       | Min.            | Max. | Min.            | Max. | Min.            | Max. |
| N° de golpes                          | 35              |      | 50              |      | 75              |      |
| <b>Estabilidad</b>                    |                 |      |                 |      |                 |      |
| <b>Newtons</b>                        | 3336            |      | 5338            |      | 8006            |      |
| <b>Libras</b>                         | 750             |      | 1200            |      | 1800            |      |
| <b>Fluencia 0,25<br/>mm(0,01")</b>    | 8               | 18   | 8               | 16   | 8               | 14   |
| <b>% de vacíos</b>                    | 3               | 5    | 3               | 5    | 3               | 5    |

Fuente: *The Asphalt Institute's Manual (MS-2).*

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas de todas las muestras, tanto en la variación de RAP y en la el contenido de cemento asfáltico, realizando una comparación con parámetros de diseño Marshall (Tabla 70) todas las muestras con distinta aportación de RAP se encuentran dentro de la norma, y en el caso de la variación de cemento asfáltico se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico para una mezcla reciclada con el 20% de RAP.

En primer lugar, se presenta el comportamiento de las mezclas asfálticas con distintos porcentajes de RAP; Luego se expone el resultado final de ambos diseños (Diseño mezcla asfáltica convencional en caliente y Diseño de mezcla asfáltica reciclada con RAP) específicamente se comparan sus propiedades mecánicas.

Los resultados obtenidos son próximos a las de las especificaciones técnicas de una mezcla convencional en caliente; el comportamiento de las mezclas con distintos porcentajes de aportación de RAP desde un 10 % hasta un 35% es factible y viable con un ajuste en la proporción de cemento asfáltico a partir de una aportación del 20%.

Con los resultados de estabilidad las mezclas hasta un 25% de RAP tiene un comportamiento igual al de una mezcla convencional, por lo que se puede definir que la aportación hasta un 25 % se puede asumir la aportación del RAP como si fuera solo aportación de agregado y a partir del 25% en adelante se observa una pequeña variación en la estabilidad, por el motivo que en las briquetas se observó un excedente de cemento asfáltico al ser mayor el porcentaje de RAP es mayor el contenido de cemento contenido en el mismo y al mezclarla con los agregados nuevos y con el mismo porcentaje optimo se produce un ligero exceso, por lo que a partir de un 35%, será necesario realizar un análisis minucioso del cemento asfáltico contenido en el RAP y estudiar si contine las propiedades necesarias para ser reutilizado, o tiene la necesidad de aditivos o rejuvenecedores.



|  | <b>Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla</b> |             |             |             |             |             |
|--|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|  | <b>5,6%</b>   | <b>5,6%</b> | <b>5,6%</b> | <b>5,6%</b> | <b>5,6%</b> | <b>5,6%</b> |
| Material a reciclar (%)                        | 10,00%  | 15,00%      | 20,00%      | 25,00%      | 30,00%      | 35,00%      |
| Material nuevo (%)                             | 90%   | 85,00%      | 80,00%      | 75,00%      | 70,00%      | 65,00%      |
| Peso del Cemento Asfáltico (gr)                | 60,48   | 57,12       | 53,76       | 50,40       | 47,04       | 43,68       |
| Peso de Grava (gr) *                           | 205,64  | 194,21      | 182,79      | 171,36      | 159,94      | 148,52      |
| Peso de Gravilla (gr) *                        | 361,52  | 341,44      | 321,35      | 301,27      | 281,18      | 261,10      |
| Peso de Arena (gr) *                           | 452,36  | 427,23      | 402,10      | 376,97      | 351,84      | 326,71      |
| Peso de Filler (gr) *                          | 0,00  | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,00        |
| Peso total de la briqueta (gr) *               | 1200,0  | 1200,0      | 1200,0      | 1200,0      | 1200,0      | 1200,0      |
| <b>Resultados de las propiedades mecánicas</b> |   |             |             |             |             |             |
| <b>Por la metodología Marshall</b>             |   |             |             |             |             |             |
| Estabilidad (lbf)                              | 4891,867  | 5179,62     | 4763,72     | 5827,08     | 6402,59     | 6838,72     |
| Fluencia (0,01 plg )                           | 15,51   | 15,66       | 16,02       | 15,98       | 16,51       | 16,72       |

*Fuente: Elaboración propia.*

Para finalizar esta primera etapa se realizó ensayos de verificación, con el objetivo de obtener la granulometría de las mezclas con aportación de RAP; ensayos que tuvieron resultados satisfactorios, confirmando que la granulometría entra dentro la franja admisible para el diseño de mezclas asfálticas y el contenido de cemento asfáltico es próximo a valor del óptimo teórico. (ver anexos)

En esta segunda etapa se realizó ensayos de laboratorio para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico para una mezcla reciclada con aportación del 20% de RAP, teniendo como referencia el porcentaje óptimo de cemento asfáltico de una mezcla convencional, del 5,6 % tomando porcentajes de variación del 0,2%. Por lo tanto 5,2%.5,4%,5,6%,5,8% y 6%

Después de los ensayos realizados se obtuvo un contenido óptimo de cemento asfáltico de 5,53%

*Tabla 4.66 Comparación de resultados*

|                          |                    | <b>Resultados</b>                   |                                  |
|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
|                          |                    | Mezcla<br>asfáltica<br>convencional | Mezcla<br>asfáltica<br>reciclada |
| Densidad                 | gr/cm <sup>3</sup> | 2,23                                | 2,26                             |
| % de vacíos mezcla total | %                  | 4,31                                | 3,37                             |
| Estabilidad              | lbf                | 4381,92                             | 4415,63                          |
| Fluencia                 | 0,01 plg           | 15,81                               | 14,76                            |
| C. Asfáltico             | %                  | 5,65                                | 5,53                             |

*Fuente: Elaboración propia.*

La mezcla reciclada presenta una mayor densidad en comparación de una mezcla convencional, el porcentaje de vacíos reduce en la mezcla reciclada, la estabilidad es mayor en una mezcla reciclada, la fluencia es menor en la mezcla reciclada, y el contenido de cemento asfáltico es menor en una mezcla reciclada al de una mezcla convencional

Todos los resultados obtenidos de la mezcla reciclada entran dentro los parámetros de las especificaciones técnicas de mezclas asfálticas convencionales.

El ahorro en el consumo de cemento asfáltico de 0,12% es confirmado por los resultados obtenidos, que involucra ahorro económico en la producción de mezclas asfálticas y en la reducción representativa de agregado nuevo, en cemento asfáltico y en la indiscutible ayuda al medio ambiente,

Finalmente, este proyecto es bastante ventajoso en apoyo a la mitigación de la contaminación y es económicamente sustentable por los ahorros de en la explotación de agregados nuevos, costos que podrán ser invertidos en el procesado de las carpetas asfálticas deterioradas para la obtención del RAP y por ende ser utilizado para el diseño de mezclas asfálticas recicladas para la rehabilitación de vías.

#### **4.14 GUÍA PARA EL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA**

##### **Resumen**

La siguiente guía propone procedimiento de trituración mecánica del material a reciclar en una chancadora de muelas con el objetivo de obtener el RAP para realizar la dosificación para obtener la mezcla asfáltica reciclada y en apego a las especificaciones técnicas de ABC para mezcla convencional en caliente.

Una condición necesaria para garantizar un buen desempeño y eficiencia de los materiales componentes de la mezcla asfáltica reciclada es contar con procedimientos de laboratorio para el diseño y evaluación del desempeño que logren ser representativos de las condiciones reales a las que será sometido el material.

Así mismo, la reutilización de material extraído de las vías, toma cada vez más auge por razones ambientales y económicas al escasear las fuentes de materiales. Por estas razones, se ha valorado el uso de materiales asfálticos para capas asfálticas recicladas como alternativa para la rehabilitación en rutas de alto medio y bajo volumen de tránsito.

##### **Diseño de mezcla asfáltica en caliente con aportación de RAP**

El procedimiento de diseño involucra una serie de pasos y ensayo de laboratorio que determina las propiedades y características de los materiales componentes de la mezcla.

##### **PASO 1**

Muestreo y estudio del material virgen de mezcla asfáltica convencional en caliente:

| Agregados   | Ensayos de laboratorio   |
|---|--|
| Agregado grueso<br>Agregado intermedio<br>Agregado fino (arena) | Granulometría (ASTM C 33 AASHTO T 27)<br>Equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T 176-00)<br>Peso específico del agregado fino (ASTM C 128 AASHTO T 84)<br>Peso específico del agregado grueso (ASTM C 127 AASHTO T 85)<br>Peso unitario de los agregados (ASTM C 29 AASHTO T 19 M-00)<br>Desgaste por medio de la máquina de los ángeles (ASTM C 131 AASHTO T 96)<br>Determinación de partículas laminares, chatas y alargadas (ASTMD791) |
| Cemento asfáltico   | Ensayos de laboratorio   |
| Asfalto (.../.....)   | Viscosidad Saybolt-Furol (ASTM D 244 AASHTO T-72)<br>Penetración (ASTM D5 AASHTO T 49-97)<br>Ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T 51-00)<br>Densidad real o peso específico cemento asfáltico (ASTM D71-94 AASHTO T229-97)  |

## PASO 2

Material a reciclar (carpetas asfálticas deterioradas removidas de las vías)

|                                       | Ensayos de laboratorio  |
|---------------------------------------|---|
| Bloques extraídos de las vías urbanas | Extractor centrifugo (contenido de cemento asfáltico y Granulometría) |

## PASO 3

Triturado de los bloques de las carpetas asfálticas deterioradas para la obtención del RAP

(Pavimento Asfáltico Reciclado)

- Disgregado por Fresadora (in situ)
- Disgregado por Chancadora o trituradora.

Disgregado Chancadora:

Trituradora de Mandíbulas, este debe ser regulado para que el RAP se obtenga con tamaño máximo de 2 pulgadas, tamaño adecuado para una mejor trabajabilidad, sin afectar la granulometría del agregado pétreo dentro de la carpeta asfáltica a reciclar.

#### **PASO 4**

RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado)

|            | <b>Ensayos de laboratorio</b>   |
|------------|---|
| <b>RAP</b> | Extractor centrifugo (contenido de cemento asfáltico y Granulometría) |
|            | Desgaste de los ángeles para el agregado del RAP                      |

#### **PASO 5**

**Diseño de mezcla asfáltica convencional en caliente**

**Dosificación de agregados**

Previamente se debe conocer las características granulométricas y resistencia de los agregados y las características principales del cemento

Con la granulometría de los agregados nuevos, determinar de proporciones para la dosificación, acorde a las graduaciones propuestas para mezclas cerradas o densas. (tabla Instituto del Asfalto)

| Mezclas cerradas  |                                    |          |          |          |          |          |          |         |         |      |
|---|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|------|
| Abertura de malla   | Tamaño máximo nominal del agregado |          |          |          |          |          |          |         |         |      |
|   | 2 in                               | 1 1/2 in | 1 in     | 3/4 in   | 1/2 in   | 3/8 in   | N° 4     | N°8     | N° 16   |      |
|   | 50mm                               | 37,5 mm  | 25,0 mm  | 19,0 mm  | 12,5 mm  | 9,5 mm   | 4,74 mm  | 2,36 mm | 1,18 mm |      |
| Graduaciones para mezcla de agregados (grueso, fino y filler) |                                    |          |          |          |          |          |          |         |         |      |
| 2 1/2 in  | 63 mm                              | 100      |          |          |          |          |          |         |         |      |
| 2 in  | 60 mm                              | 90 - 100 | 100      |          |          |          |          |         |         |      |
| 1 1/2 in  | 37,5 mm                            |          | 90 - 100 | 100      |          |          |          |         |         |      |
| 1 in  | 25,0 mm                            | 60 - 80  |          | 90 - 100 | 100      |          |          |         |         |      |
| 3/4 in  | 19,0 mm                            |          | 56-80    |          | 90 - 100 | 100      |          |         |         |      |
| 1/2 in  | 12,5 mm                            | 35 - 85  |          | 56-80    |          | 90 - 100 | 100      |         |         |      |
| 3/8 in  | 9,5 mm                             |          |          |          | 56-80    |          | 90 - 100 | 100     |         |      |
| N°4   | 4,75 mm                            | 17 - 47  | 23-53    | 29-59    | 35-65    | 44-74    | 55-85    | 80-100  | 100     |      |
| N°8   | 2,36 mm                            | 10-36    | 15-41    | 19-45    | 23-49    | 28-58    | 32-67    | 65-100  | 95-100  |      |
| N°16  | 1,18 mm                            |          |          |          |          |          |          | 40-80   | 85-100  |      |
| N°30  | 600 μm                             |          |          |          |          |          |          | 25-65   | 70-95   |      |
| N°50  | 300 μm                             | 3-15     | 4-16     | 5-17     | 5-19     | 5-21     | 7-23     | 7-40    | 45-75   |      |
| N°100   | 150 μm                             |          |          |          |          |          |          | 3-20    | 20-40   |      |
| N°200   | 75 μm                              | 0-5      | 0-6      | 1-7      | 2-8      | 2-10     | 2-10     | 2-10    | 9-20    |      |
| Asfalto, porcentaje de acuerdo al peso de la mezcla           |                                    | 2-7      | 3-8      | 3-9      | 4-10     | 4-11     | 5-12     | 6-12    | 7-12    | 8-12 |

*Fuente: Instituto del asfalto gradación propuesta por ASTM D3515.*

La metodología Marshall utiliza una gráfica semi logarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, 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)

### **Determinación de proporción de cemento asfáltico**

Realizar ensayos para las muestras (briquetas) con aportación de cemento asfáltico desde 4,5% hasta un 6,5% con variaciones de 0,5% para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico para una mezcla convencional en caliente.

| <b>Ensayos de Laboratorio</b>           |  |
|---|--|
| <b>Briquetas de mezcla convencional</b> | Altura de briquetas                          |
|   | Peso seco al aire de la briqueta (P.A.)      |
|   | Peso saturado superficialmente seco (S.S.S.) |
|   | Peso sumergido (P.S.)                        |
|   | Volumen de la briqueta                       |
|   | Densidad de la briqueta.                     |
|   | Porcentaje de vacíos                         |
|   | Metodología Marshall:                        |
|   | Estabilidad                                  |
|   | fluencia                                     |

Realizar análisis de curvas Marshall para mezcla convencional en caliente.

Análisis curva Densidad vs. % Cemento asfáltico convencional

Análisis curva estabilidad vs. % C.A. convencional

Curva Fluencia vs. % C.A. convencional

Curva porcentaje total de vacíos vs. Porcentaje de cemento asfáltico convencional

## **PASO 6**

### **Diseño de mezcla asfáltica reciclada con aportación de RAP**

Determinar las cantidades optimas de RAP, para el diseño de mezcla reciclada.

Realizar muestras (briquetas) con variaciones de RAP de 5%; desde un 10% hasta un 35%

A partir de los ensayos de laboratorio se determinará en cada fase del diseño la clasificación del material, antes y después de realizar las briquetas con la aportación de material a reciclar RAP

|                                      | <b>Ensayo de laboratorio</b>                  |
|--------------------------------------|---|
| <b>Briquetas de mezcla reciclada</b> | Metodología Marshall                          |
|                                      | Estabilidad                                   |
|                                      | Fluencia                                      |
|                                      | Extractor centrifugo (ensayo de verificación) |
|                                      | Granulometría                                 |
|                                      | Contenido de cemento asfáltico                |

## **PASO 7**

Análisis de resultados de estabilidad y fluencia acorde a los parámetros de exigencia de las curvas Marshall.



Análisis de curva de densidad vs. % de cemento asfáltico

Análisis de curva de estabilidad vs. % de cemento asfáltico.

Análisis de curva de fluencia vs. % de cemento asfáltico.

Análisis de curva de porcentaje de vacíos del agregado vs. % de cemento asfáltico.

Análisis de curva de relación de betúmen y porcentaje de vacíos vs. % de cemento asfáltico.

Análisis curvo de % de vacíos de la mezcla vs. % de cemento asfáltico.

### **PASO 8**

Obtención de contenido óptimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas recicladas

Realizar briquetas con mezclas recicladas con variación de cemento asfáltico y porcentaje de RAP constante de 20%

El procedimiento es el mismo que el de un ensayo de mezcla convencional en caliente con la aportación de RAP en un 20%; con variaciones de cemento asfáltico por encima y por debajo del optimo calculado en el primer ensayo de Marshall para mezclas convencionales de 5,2%,5,4%,5,6%,5,8% y 6%

### **PASO 9**

Análisis de resultados de mezclas recicladas con variaciones de Cemento asfáltico

### **PASO 10**

Realizar tabla comparativa de resultados de mezcla asfáltica convencional caliente y mezcla asfáltica con aportación de RAP.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Como parámetros de estudio y comparación para realizar el diseño de mezclas recicladas, se utilizó las especificaciones técnicas de la ABC para mezclas asfálticas en caliente

Con los ensayos de laboratorio se caracterizó los materiales vírgenes tanto cemento asfáltico (85/100 de procedencia colombiana) como agregados, se verifican las especificaciones respectivas y los resultados se encontraron dentro de los rango esperados y establecidos, por ello no fue necesario buscar otra fuente de agregados u otro cemento asfáltico; con las características de los materiales nuevos se realizó un diseño Marshall con la finalidad de encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico que como resultado de ensayo salió 5,6% que es muy próximo al óptimo teórico.

Se recolecto los bloques removidos de las calles urbanas de nuestra ciudad, previamente se realizó una inspección visual de todas las fallas y deterioros existentes en las calles de nuestra ciudad que son los principales motivos de la remoción de carpetas asfálticas, mismas que son acopiadas en instalaciones de la planta asfáltica Municipal de la pintada en situación de desecho.

La realización de ensayos de granulometría en el material a reciclar, se obtuvo resultados positivos al encontrarse dentro de los parámetros requeridos para mezclas asfálticas en caliente, demostrando que los agregados dentro de una mezcla asfáltica no cambian con el transcurso del tiempo y en el ensayo de extracción centrifuga se verifico en el contenido de cemento asfáltico se encuentra entre un 5,2% y 6% que son valores muy cercanos al valor optimo teórico

Para la obtención del RAP se propuso el método de triturado mecánico en una chancadora de muelas, se optó por este método de disgregación, ya que en nuestra ciudad no contamos con máquinas fresadoras. El resultado de este método fue satisfactorio, con ensayos

realizados de prueba y error, se calibro la chancadora, obteniendo RAP con un tamaño máximo de 2 pulgadas, tamaño adecuado para un precalentado y así mejorar la trabajabilidad en el mezclado para la obtención de mezcla asfáltica reciclada

Se procesó muestra suficiente para realizar los ensayos de granulometría y contenido de asfalto en laboratorio.

Los ensayos realizados al RAP nos muestra la clara información que las granulometrías de los agregados cumplen con las normas dentro los parámetros las curvas máximas y mínimas establecidas en ASTM-D3515; exponiendo que el triturado no afecta en la granulometría de los agregados del RAP, por otra parte el contenido de cemento asfáltico son próximos al óptimo teórico, los ensayos que se realizó al cemento asfáltico deteriorado fueron limitados por la falta de equipos adecuados para este tipo de estudios. Los ensayos requeridos para el análisis del cemento asfáltico de RAP, se complica desde su extracción para su caracterización, como el de separar los componentes del cemento asfáltico y determinar cuál de sus componentes es el más afectado durante su vida útil y con cuanta frecuencia ocurre, si es debido a motivo físico o químico, como la oxidación que ocurre durante la vida de servicio que se produce cuando la mezcla se pone en contacto con el ambiente y este altera las fracciones de (saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos), manifestando endurecimiento, pérdida de la consistencia visco elástica, fisuración y agrietamiento; así también se requieren estudios de los diversos agentes climáticos que son fenómenos que afectan de manera directa a las carpetas asfálticas.

Mediante recomendaciones de distintas bibliografías sobre mezclas recicladas se determinó las proporciones de RAP durante el proceso de reciclado en caliente, en donde se produce un aprovechamiento íntegro del betún y de los áridos que lo componen el RAP. Por lo que la aportación en masa es desde un 10% hasta un 25%, en algunos países como España hasta un 35% que se puede adicionar a una mezcla nueva sin la necesidad de usar rejuvenecedores u otro tipo de aditivos, para los ensayos de laboratorio de este proyecto se realizó con porcentajes de RAP desde un 10 hasta 35% para la realización de las mezclas recicladas y observar el comportamiento es las briquetas con las distintas

aportaciones de RAP por medio del ensayo Marshall.

Se observó las propiedades mecánicas de las muestras al incrementar el contenido de RAP en un 5% utilizando el contenido óptimo de cemento asfáltico de una mezcla convencional de 5,6%;

Concluyendo que al utilizar aportaciones de RAP hasta un 15% no tiene gran repercusión con la mezcla y el RAP aportado puede ser considerado como agregado. A partir de una aportación de RAP del 20% existe variaciones mínimas en las propiedades, pero los mismos cumplen con los parámetros de exigencia de una mezcla convencional en caliente.

De las briquetas de mezcla reciclada se obtuvo que; la densidad varía desde 2,25 hasta 2,27 gr/cm<sup>3</sup> y en relación de la densidad máxima teórica de 2,33 gr/cm<sup>3</sup>, las densidades de todas las muestras entran dentro de los parámetros aceptados, al igual que el porcentaje de vacíos que tiene una variación entre 3 y 3,65%, la estabilidad arriba de los 4000 lbf. Y la fluencia entre 15,51 y 16,72 (0,01plg)

Se realizó ensayos de verificación a las briquetas de mezclas recicladas (ensayo granulometría y contenido de cemento asfáltico con el método del extractor centrifugo) correspondientes a las mezclas con 10%, 15%, 20%, 25%, 30% y 35% de RAP. Obteniendo resultados satisfactorios en todas las muestras con distintos porcentajes de RAP, al cumplir la granulometría dentro los máximos y mínimos parámetros para mezclas convencionales y el contenido del cemento asfáltico muy próximo al óptimo ASTM-D 3515

Observando el buen comportamiento de las mezclas recicladas se realizó un ensayo Marshall con el objetivo de encontrar en contenido óptimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas con aportación de 20%RAP; obteniendo como resultado final un porcentaje de 5,53%

Realizando una comparación entre las propiedades de una mezcla convencional con su contenido óptimo y una mezcla reciclada con el 20% de RAP y su contenido óptimo de cemento asfáltico tenemos:

| Resultados               |                    |                                     |                                  |
|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
|                          |                    | Mezcla<br>asfáltica<br>convencional | Mezcla<br>asfáltica<br>reciclada |
| Densidad                 | gr/cm <sup>3</sup> | 2,23                                | 2,26                             |
| % de vacíos mezcla total | %                  | 4,31                                | 3,37                             |
| Estabilidad              | lbf                | 4381,92                             | 4415,63                          |
| Fluencia                 | 0,01 plg           | 15,81                               | 14,76                            |
| C. Asfáltico             | %                  | <b>5,65</b>                         | <b>5,53</b>                      |

Podemos observar las propiedades de una mezcla asfáltica recicladas se encuentran dentro los parámetros normados, y que la aplicación de esta técnica de reciclado reduciría un 0,12% de cemento asfáltico en la producción y aproximadamente un 20 % en áridos.

Los beneficios que podrían obtener las instituciones y las constructoras aplicando el reciclado de carpetas asfálticas pueden resumirse en el menor costo de transporte y de obtención de material virgen, ahorros energéticos.

La factibilidad ambiental está totalmente demostrada ya que el uso del material RAP evita el uso de material virgen, producto de sobreexplotaciones de reservas naturales y mitiga en manejo y acomodo de desechos de productos removidos de las vías de nuestra ciudad, que en algún momento nos veremos obligados a la remoción de grandes volúmenes de carpetas asfálticas, debido a los constantes recapamientos que se realizan y que dejan las calles a nivel de las aceras sin respetar la alturas de las mismas que provoca inundaciones en épocas de lluvia y otras afecciones al usuario.

Es factible técnica y económicamente el uso del material RAP en la fabricación de las nuevas mezclas asfálticas para la rehabilitación de vías.

No se cuenta con una normativa en nuestro país relacionada con este tipo de reciclaje.

En el presente documento se dio a conocer todos los aspectos más importantes de la técnica de reciclado aplicando un método acorde a las condiciones de nuestra ciudad.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Esta técnica de reciclado en caliente con respecto al procedimiento realizado en el presente proyecto, es lograr el calentamiento del RAP por transferencia de calor, que en laboratorio se realizó en un horno, con el fin de no arriesgar las propiedades del cemento asfáltico. Por lo que se recomienda no utilizar el fuego directo para el calentamiento del RAP que provocaría la oxidación del mismo, por tanto, pérdida de sus propiedades.

Reutilizar las carpetas deterioradas y removidas de obras, con el objetivo de reducir el impacto ambiental de degradación de las canteras y ríos, así como eliminar los botaderos donde se acumulan los residuos de las carpetas deterioradas.

Se recomienda realizar parámetros de verificación en mezclas recicladas en el equipo de amueblamiento y ensayos de durabilidad, ya que el presente proyecto no se pudo realizar por tratarse de una investigación en laboratorio de manera experimental y no una aplicación por los costos personales que este correspondería.

Los materiales removidos de las vías deben ser almacenadas correctamente evitando su contaminación con otros materiales, se debe utilizar en el menor tiempo posible para evitar la variación de sus propiedades por la exposición a factores ambientales.

La presente investigación recomienda aplicar las mezclas asfálticas recicladas en caliente en nuestra ciudad por todos los factores positivos, económicos, sociales y ambientales que favorecerían a nuestra ciudad.

Con la ejecución de la mezcla asfáltica reciclada con la aportación de una parte de residuos de una carpeta flexible deteriorada, se ha logrado resultados satisfactorios, que han permitido determinar que la Estabilidad y el Flujo son parámetros medibles de calidad de una mezcla asfáltica reciclada.

