

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

La tendencia latente de someter los pavimentos flexibles a elevadas intensidades de tránsito aunado en su inevitable exposición a condiciones climáticas adversas genera en las capas asfálticas la aparición de grietas y deformaciones permanentes, las cuales son deterioros que conducen al debilitamiento o fallo estructural y funcional del pavimento. En respuesta a revestir la situación anterior, comúnmente se recurre a la remoción y reemplazo de la mezcla asfáltica dañada. Sin embargo, las acciones antepuestas implican un doble impacto negativo al ambiente; por un lado, el consumo de escasos recursos naturales no renovables en la elaboración de mezclas asfálticas nueva y, por el otro, la contaminación del medio ambiente y sus elementos debido a los residuos sólidos generados durante el fresado o desintegración del pavimento.

El reciclaje de pavimentos asfálticos es una práctica cada día más común en los países desarrollados, esto debido a los altos beneficios que tiene el reutilizar los materiales recuperados tanto económicos como ecológicos, por lo que es de suma importancia la correcta evaluación de la dosificación de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) en las mezclas asfálticas.

Actualmente en la mayoría de los países Latinoamérica una importante fracción de la red de carreteras se encuentran en mal estado por lo cual en un futuro próximo se verá la necesidad de rehabilitar estas redes, generando almacenes con miles de toneladas de mezcla asfáltica sin uso, producto de la escarificación de carreteras en mal estado. Varias de las razones por las que no se utilizan estos materiales son los pocos o nulos controles de calidad además del desconocimiento sobre el uso y reciclaje del RAP.

El RAP es definido como un pavimento asfáltico envejecido que ha sido triturado o arrancado del camino y que puede ser usado en la fabricación de nuevas mezclas asfálticas, dado que, el asfalto y el agregado reciclado aún tiene valor.

Una forma de aumentar la flexibilidad sin la necesidad de cambiar los requerimientos volumétricos de las mezclas asfálticas es a través de la reducción en el esfuerzo de compactación, lo cual trae en consecuencia un incremento de los vacíos en el agregado mineral, por ende un aumento en el espacio disponible para alojar un mayor volumen de asfalto efectivo, dando así a los agregados pétreos de una película de asfalto más gruesa, mejorando de esta manera la flexibilidad de la mezcla asfáltica.

El aporte académico en el presente trabajo, es dar una validación a la alternativa para las estrategias de reconstrucción y rehabilitación de pavimentos asfálticos y para disminuir el impacto ambiental haciendo uso del pavimento asfáltico (RAP) en mezclas asfálticas en caliente lo cual trae consigo beneficios energéticos, económicos y ambientales, tales como; disminución en los costos de producción de mezclas asfálticas, preservación de los recursos naturales al reducir la necesidad de nuevos materiales, abatimiento de las emisiones de Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), haciendo que la industria de los pavimentos sea sostenible y así para posteriormente se realice una aplicación práctica teniendo como base diferentes estudios del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas con RAP y aplicarlo en algún proyecto de carretera local; permitiendo el uso de agregados de nuestra región cuyo resultado sería el de dar validez a nuestro estudio de la aplicación de asfaltos con RAP.

Para ello es necesario analizar las propiedades y característica de la mezcla asfálticas en caliente con RAP, establecer parámetros mecánicos y volumétricos que fundamenten sus principios. Las propiedades mecánicas de la mezcla resultante dependerán esencialmente de las proporciones y características de los componentes que la conforman.

En el campo de la ingeniería vial, se busca constantemente las formas de mejorar los pavimentos tras ver el constante desgaste de estos, su envejecimiento prematuro causados por la circulación de servicio, factores climáticos y asentamiento que producen baches y fisuras en los diferentes pavimentos, para ello se trata de aplicar la vida útil de las mezclas asfálticas en caliente con RAP, a partir de establecer el diseño volumétrico de energía de compactación adecuada.

## 1.2 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En el mundo entero se puede observar que se construyen pavimentos flexibles como en diferentes ciudades, conformando la estructura vial de las ciudades la cual permite la comunicación entre personas de un lugar a otro con un desplazamiento rápido y confiable, con el fin de generar un servicio vial adecuado para el bien de la sociedad actual.

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la meteorología, factores que sumados a las propiedades intrínsecas del material genera un proceso de deterioro del mismo que conlleva a perder la vida útil. Hoy en día causa de algunas características de los materiales usados, de procesos constructivos o de la calidad de mano de obra, los pavimentos tienen a disminuir el tiempo de servicio, causando que las adecuaciones de la vía sean más frecuentes aumentando los costos y recursos necesarios para la rehabilitación, reconstrucción y construcción de vías, y a su vez generando un aumento significativo de escombros.

En la ciudad de Tarija existe un gran deterioro de las principales vías de acceso y avenidas, debido a que en la construcción de las mismas se utiliza mezclas asfálticas en caliente, y a la falta de investigación para encontrar nuevas técnicas adecuadas que mejoren las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.

Otro problema es que con el aumento poblacional se ha ido aumentando también el tipo de tráfico, la cantidad de tráfico, así como también la carga del vehículo, es decir mayor exigencia al pavimento por lo tanto los insumos que se tienen que utilizar en la construcción de estos pavimentos son también de mayor exigencia. Por esta razón buscamos soluciones que ayuden a mejorar las características de las carpetas asfálticas y su comportamiento, implementando métodos que deduzcan los costos y los daños ambientales que estas prácticas generan, dentro de los cuales se encuentra el reciclado de pavimentos asfálticos (RAP).

### **1.2.1 Problema**

¿Se podrá utilizar el RAP como parte de las mezclas asfálticas, y de esta forma pueda ser considerada como una opción de mezcla en los pavimentos flexibles?

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

Si bien es cierto el cemento asfáltico ha sido el insumo principal en todas las tecnologías tales como son en caliente, en frío, en asfaltos emulsionados, es el elemento principal ante este panorama se pretende realizar un análisis del comportamiento mecánico de mezclas en caliente con RAP, consiste en tratar de perfeccionar las mezclas asfálticas que se utilizan hoy en día en nuestro medio, con la finalidad de mejorar ciertos aspectos tales demandas económicas y ecológicas con el reciclaje de pavimentos y el uso en una nueva carpeta asfáltica.

Para poder dar solución a estos problemas es necesario evaluar las alternativas de solución, para así obtener una reducción de costos de construcción para que dicha carretera sea funcionable, de modo que, al aplicar la comparación y evaluación de pavimentos flexibles a través del método del reciclaje, éste sea más técnico, ecológico, económico y a la vez ofrecería un rodaje cómodo y seguro.

### **1.2.3 Delimitación temporal y espacial del problema**

Se encuentra en tiempo presente ya que es analizar en la actualidad el comportamiento mecánico de mezclas en caliente con RAP.

En este sentido se dispone de todos los recursos necesarios para la ejecución de esta investigación y así verificar si esta mezcla podría aplicarse como una alternativa más en la implementación en los proyectos viales de nuestra ciudad.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

La idea de este proyecto es realizar un análisis de la influencia de la compactación en el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas en caliente con RAP en carpetas asfálticas, buscando generar nuevas alternativas técnicas actuales en la construcción de caminos que cumplan con las demandas de los usuarios y de las entidades encargadas de la construcción, mantenimiento y rehabilitación de carreteras.

Dentro de este entorno, un factor clave es el mantenimiento que debe realizarse a las vías, a causa de algunas características de los materiales usados o procesos constructivos, tienden a perder su vida útil en menor tiempo, aumentando los costos y recursos necesarios para la reconstrucción de vías. Debido a esto se ha hecho necesario buscar nuevas alternativas que proporcionen una disminución de costos y que a su vez presenten condiciones óptimas de resistencia y calidad, para lo cual una de las alternativas es la utilización de material reciclado (RAP).

En algunos países se ha usado el pavimento reciclado en conformación de bases estabilizadas, y en menor medida se ha usado en el diseño de carpetas de rodadura. Aunque se han realizado investigaciones basadas en la importancia y viabilidad en el uso de esta técnica, todas tienden a realizar el diseño de mezclas asfálticas con RAP basados en ensayos mecánicos realizados empíricamente, pero no se evalúa a fondo las propiedades del reciclado, así pues, se desconoce los factores que influyen en el comportamiento del RAP dentro de las mezclas.

Se pretende realizar este trabajo los estudios a cerca del manejo y comportamiento del reciclado en diferentes condiciones de porcentaje de RAP y la influencia de la compactación en el diseño de las carpetas asfáltica. Es por ello que se hace necesario realizar la caracterización del RAP usado actualmente, identificar sus propiedades y establecer las principales variaciones que se presentan entre las diferentes muestras, e identificar la influencia de las mismas en una mezcla nueva en caliente, para así optimizar el uso de reciclado y contribuir a que sea una técnica más viable y económica para el mejoramiento y mantenimiento de las carreteras del país.

En nuestro medio no se ha tomado la importancia necesaria a este tipo de mezcla. Por lo cual se carece de información y para la elaboración de este tipo de mezcla, para ello nos basaremos en las especificaciones que nos proporcionan manuales y normas de AASTHO. De esta forma observar si los materiales de nuestro medio cuentan con las propiedades y características necesarias para la elaboración de la mezcla asfálticas con RAP a travez de ensayos en laboratorio de hormigón y de asfáltos, la norma AASTHO nos proporcionara todos los parámetros y especificaciones para poder realizar una carpeta asfáltica en caliente.

En consecuencia, se hará el análisis de la aplicación de la influencia de la compactación en el desempeño mecánico de las mezclas en caliente con RAP para carpeta asfáltica por estas varias razones:

- Porque el deterioro de las carreteras pavimentadas se incrementa cada día más, debido al crecimiento vehicular y agentes climatológicos. Por lo tanto, esta nueva alternativa puede responder a estas demandas económicas y ecológicas con el reciclaje de pavimentos y el uso en una nueva carpeta asfáltica.
- Por qué se busca introducir este nuevo planteamiento para que exista un mayor conocimiento sobre esta aplicación y que cada día se vuelva más versátil y más aplicable.
- Los materiales a utilizar en este proyecto se pueden conseguir fácilmente en nuestro medio con las características que exige esta investigación.
- Por qué los recursos destinados para cualquier mejoramiento en las obras viales resultan ser muy importantes, y además el impacto ambiental debe ser mínimo. Esta nueva alternativa permite minimizar ambos aspectos.

El estudio propuesto brindara un aporte académico al proceso de investigación que lleva acabó la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, con el objeto de analizar la influencia de la compactación en el desempeño mecánico de las mezclas en caliente con RAP, de esta forma obtener información de las propiedades y características, para poder ser evaluadas en base a las especificaciones de manuales y de las normas, con el fin de ver si son aptas para su uso de pavimentos flexibles.

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar la influencia de la compactación en el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas en caliente con RAP, a través del ensayo de Marshall, para realizar una comparación con una mezcla asfáltica convencional.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Realizar la caracterización de los agregados pétreos, ligante asfáltico y del agregado reciclado RAP.
- Diseñar la mezcla asfáltica convencional por el método Marshall.
- Realizar la dosificación de la mezcla asfáltica con diferente porcentaje de RAP para la evaluación de su comportamiento mecánico tales como: estabilidad y fluencia de las mezclas asfálticas calientes.
- Investigar la influencia de la compactación de la mezcla asfáltica en caliente con RAP en propiedades mecánicas.
- Efectuar un análisis comparativo de las propiedades mecánicas entre una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica con RAP.
- Determinar si la mezcla asfáltica con RAP a diferente energía de compactación pueda ser considerada como una alternativa técnica en la elaboración de mezclas asfálticas.

## **1.5 HIPÓTESIS**

Si, el diseño de mezclas asfálticas en caliente con la adición de diferentes porcentajes de RAP como parte de la mezcla, puede ser considerado como alternativa técnica, ya que mejora las propiedades mecánicas que presenta la mezcla asfáltica, en comparación a las mezclas asfálticas convencionales.

## **1.6 DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES**

### **1.6.1 Variables independientes**

- Mezclas asfálticas en caliente.

### **1.6.2 Variables dependientes**

- Comportamiento mecánico de mezclas de acuerdo a la compactación y el porcentaje de RAP.

### 1.6.3 Operacionalización de las variables

**Tabla 1.1 Conceptualización y operacionalización de variables independientes**

Variable nominal	Conceptualización	Operacionalidad			
		Dimencion	Indicador	Valor/accion	
<b>Variable independiente</b> Mezclas asfálticas en caliente con rap	Caracterización de los materiales petreos, rap y cemento asfáltico	Agregados petreos	Agregado grueso y intermedio	Granulometría	Ensayo para tamizar y determinar la granulometría (AASHTO T-27)
				Resistencia al desgaste por abrasión	Ensayo para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (AASHTO T-96)
				Peso unitario de los agregados	Ensayo para determinar peso unitario del agregado grueso e intermedio (AASHTO T-19)
				Peso específico y absorción del agregado	Determinación del peso específico del agregado grueso e intermedio (T-85, T-84)
				Porcentaje de caras fracturadas de los agregados	Determinación del porcentaje de caras porcentajes de agregado grueso (ASTM D-5821)
				Durabilidad de los agregados usando sulfato de sodio	Ensayo para determinar la durabilidad de agregado grueso usando sulfato de sodio (AASHTO T-104)
		Agregado fino	Equivalente de arena	Ensayo para determinar el equivalente arena (AASHTO T-176)	
			Peso específico y absorción del agregado fino	Determinación del peso específico del agregado fino "arena" (T-85, T-84)	
			Peso unitario del agregado fino	Ensayo para determinar peso unitario del agregado fino "arena"(AASHTO T-19)	

Variable nominal	Conceptualización	Operacionalidad			
		Dimencion		Indicador	Valor/accion
<b>Variable independiente</b> Mezclas asfálticas en caliente con rap	Caracterización de los materiales petreos, rap y cemento asfáltico	Pavimento asfáltico reciclado	RAP	Separación de ligante y agregado de la muestra de RAP	La separación de ligante y el agregado pétreo se realizará con un producto disolvente "gasolina " (AASHTO T-164)
				Contenido de agregado	Ensayo de contenido de agregado en % de la muestra de RAP
			Agregado reciclado del RAP	Granulometria	Ensayo para tamizar y determinar la granulometría (AASHTO T-30)
				Peso específico del agregado grueso y fino	Determinación del peso específico del agregado grueso y fino (T-84, T-85)
		Cemento asfáltico convencional	Caracterización del asfalto convencional	Punto de inflamación y combustion	Ensayo para determinar el punto de inflamación y combustión del asfalto viejo (AASHTO T79-96)
				Peso específico	Ensayo para determinar la gravedad especifica (AASHTO T-229)
				Ductilidad	Ensayo para determinar la ductilidad (AASHTO T51-00)
				Penetración	Ensayo para determinar el índice de penetración (ASSHTO T49-97)
				Punto de ablandamiento	Ensayo para determinar el punto de ablandamiento (ASSHTO T53-96)
				Viscosidad	Ensayo para determinar la viscosidad (ASSHTO T201-01)

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 1.2 Conceptualización y operacionalización de variables dependientes**

Variable nominal	Conceptualización	Operacionalidad			
		Dimension		Indicador	Valor/accion
<b>Variable dependiente</b> Comportamiento mecánico de acuerdo a la compactación y el porcentaje de rap	Se refiere a la influencia de la compactación en el desempeño mecánico en las mezclas en caliente con rap	Elaboración de especímenes de mezcla asfáltica en caliente con rap compactado a diferentes energías de compactación y su desempeño mecánico	Energía de compactación	Número de golpes según el propósito esperado de la mezcla diseñada	Ensayo para determinar el número de golpes con el martillo de Marshall en ambas caras según el propósito de la mezcla diseñada
				Parámetros volumétricos de diseño	Ensayo para determinar el contenido de asfalto óptimo para cumplir parámetros establecidos de acuerdo al Ensayo de Marshall (AASHTO T-245)
			Características volumétricas y mecánicas	Granulometría	Curva granulométrica para el diseño de mezclas asfálticas y porcentaje en peso para el diseño de muestras de acuerdo al Ensayo de Marshall (AASHTO T-11)
				Determinación de la gravedad específica	Ensayo de gravedad específica bulk de mezclas asfálticas (AASHTO T166-05, AASHTO T-275)
				Estabilidad y flujo	Ensayo de estabilidad para medir la resistencia a la deformación y la fluencia mide la deformación bajo carga aplicado a la muestra con el aparato de Marshall
				Análisis de densidad de vacíos	Determinar la densidad de vacíos de las muestras, estos valores se determinarán de acuerdo a los valores promedios de gravedad específica teórica máxima (AASHTO T-209)

Fuente: Elaboración Propia

## 1.7 IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo corresponde al tipo de investigación experimental, a un nivel de investigación descriptiva, mediante el ensayo de Marshall donde se observan los resultados en su contexto natural para después analizarlos, se diagnóstica el estado del comportamiento mecánico y la influencia de la compactación en las mezclas en caliente con RAP, caracterizándolos de manera cuantitativa.

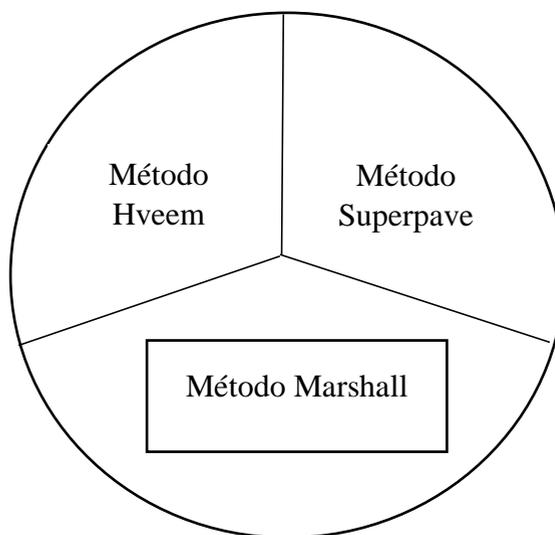
## 1.8 UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL

### 1.8.1 Unidad de estudio

Mezcla asfáltica en caliente.

#### 1.8.1.1 Población

Mezclas asfálticas en caliente con RAP, diseñada por diferentes métodos.



Fuente: Elaboración Propia

#### 1.8.1.2 Muestra

Mezclas asfálticas en caliente con RAP por el método Marshall.

### **1.8.1.3 Selección de las técnicas de muestreo**

Recolección del muestreo de la carpeta asfáltica reciclada de Canaletas-Entre Rios, tomando las muestras por el método de demolición mecánica de manera que sea representativo para el presente estudio.

## **1.9 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

### **1.9.1 Métodos**

El método inductivo es aquel método científico que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares; es decir va de lo individual a lo universal.

El método se inicia con la observación individual de los hechos, se analiza la conducta y características del fenómeno, se hacen comparaciones, experimentos, etc, y se llega a conclusiones universales para postularlas como leyes, principios o fundamentos.

El método inductivo se caracteriza en 4 etapas, en una primera etapa se deberían observar y registrar todos los hechos y luego analizarlos y clasificarlos ordenadamente. A partir de los datos procesados se deriva una hipótesis que solucione el problema basada en el análisis lógico de los datos procesados. Esta derivación de hipótesis se hace siguiendo un razonamiento inductivo. En la última etapa se deduce una implicación contrastadora de hipótesis. Esta implicación debería ocurrir en el caso de que la hipótesis sea verdadera, así si se confirma la implicación contrastadora de hipótesis quedará validada la hipótesis principal.

### **1.9.2 Técnicas**

Para realizar el comportamiento de una mezcla asfáltica elaborada con una proporción de RAP, cuyos resultados serán comparados con la mezcla asfáltica convencional, se deberá efectuar los siguientes ensayos:

#### **Características de los agregados**

- ✓ Adquisición y selección de los agregados
- ✓ Granulometría de los agregados

- ✓ Densidad y porcentaje de los vacíos
- ✓ Gravedad específica y porcentaje de absorción
- ✓ Desgaste de los ángeles
- ✓ Equivalente de arena

### **Cemento asfáltico**

- ✓ Adquisición del ligante (cemento asfáltico convencional)
- ✓ Penetración a 25 °C
- ✓ Punto de inflamación
- ✓ Peso específico
- ✓ Ductilidad

### **Características de RAP**

- ✓ Separación de ligante y agregado
- ✓ Contenido de agregado
- ✓ Análisis granulométrico

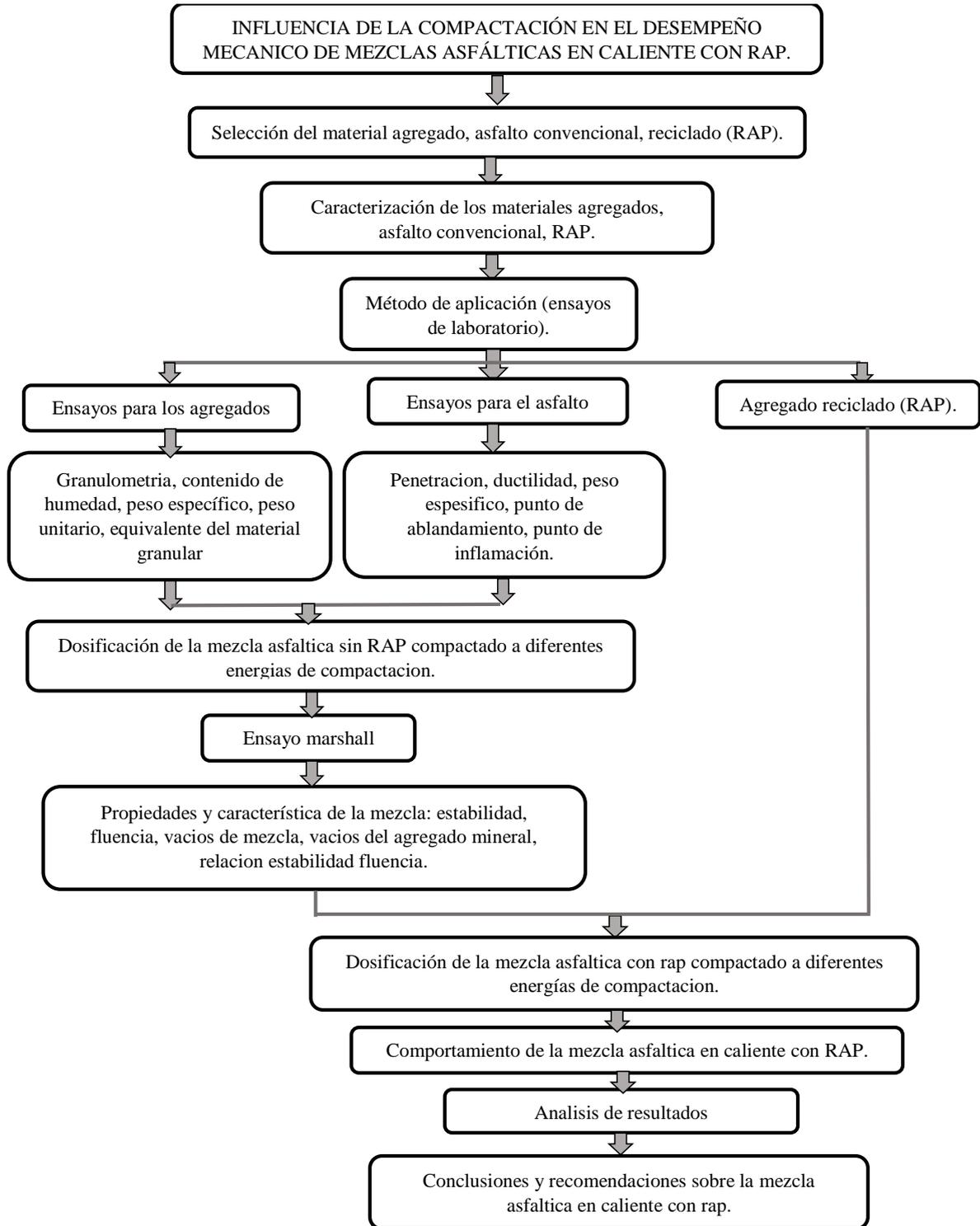
### **Ensayos Marshall**

- ✓ Estabilidad
- ✓ Fluencia
- ✓ Densidad

Los ensayos se realizarán en laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho los mismos cuentan con todo el equipo necesario que se requiere en la presente investigación, los resultados obtenidos serán avalados por los encargados de laboratorio.

### 1.9.3 Esquema de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva

**Figura 1.1 Esquema de actividades en función al procedimiento**



Fuente: Elaboración Propia

## **1.10 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

Se realizó un análisis de resultados mediante el programa del Excel, ya que es el más conocido en nuestro medio para conocer el desempeño mecánico de mezclas en caliente con RAP.

## **1.11 ALCANCE DEL PROYECTO**

El presente trabajo de investigación se centra en el análisis de la influencia de la compactación en el desempeño mecánico de mezclas asfálticas en caliente a las cuales se añade diferentes porcentajes de RAP, a diferente energía de compactación y por medio de ensayos se establece parámetros de comparación con respecto a una mezcla convencional, para tener como una alternativa en beneficio económico y ambiental.

Para la caracterización de los materiales que se utilizaran en esta investigación, se limitará a realizar los ensayos de acuerdo a los equipos disponibles en los laboratorios de hormigón y asfalto de la Universidad, deben cumplir ciertas normas de calidad las cuales van a determinar si el tipo de material es el correcto para lo que se pretende alcanzar con nuestro proyecto.

Conociendo las características de los materiales a usar, se procederá a la dosificación de la mezcla en caliente con la adición de un 0%, 15%, 30%, 50% y 100% RAP, para tránsito pesado, mediano, liviano y posteriormente elaboración de la carpeta de asfalto de este modo poder someterla a la prensa Marshall y poder determinar sus propiedades y características de la mezcla.

Después de todo este procedimiento práctico una vez determinadas las propiedades y características de la mezcla se seguirá con el estudio de gabinete donde se obtendrá resultados a los cuales poder constatar y ver si son aceptables, se procederá a realizar el análisis en base a los diferentes parámetros que están normados, también se procederá a las comparaciones pertinentes a este proyecto.

Una vez recopilada la información necesaria de la influencia de la compactación mecánica en mezclas en caliente con RAP, podremos tener criterios básicos para ver si podemos utilizar o no la dicha mezcla.

La finalidad de este estudio es principalmente poder brindar información necesaria de la mezcla estudiada en este caso mezcla con RAP y que esta sea una opción a tomar en cuenta al momento de realizar los pavimentos flexibles en la ciudad de Tarija, como también recomendar para futuros tesis que deseen profundizar el estudio de este tema o hacerlo de una forma más amplia o puntual.

## CAPÍTULO II

### MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON RAP

#### 2.1 GENERALIDADES

Los pavimentos flexibles son ampliamente utilizados en la mayoría de los países a nivel mundial. Las mezclas asfálticas asumen un papel fundamental en los pavimentos flexibles no sólo por los volúmenes requeridos en su construcción, sino porque constituyen la parte más costosa de los mismos: la “fachada” que los usuarios observan cotidianamente, y la superficie por la que transitan diariamente los millones de vehículos, que resuelven gran parte de las necesidades de movilidad en las sociedades humanas contemporáneas.

La mezcla asfáltica se puede definir como una combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el comportamiento funcional de la misma como pavimento.

Se describe al asfalto como un cemento fuerte, fácilmente adhesivo, altamente impermeable, y durable. Es una sustancia plástica que proporciona una flexibilidad controlable a las mezclas de material mineral con las que usualmente se combina. No obstante que es un sólido o semisólido, en condiciones normales de temperatura ambiental el asfalto puede ser fácilmente licuado mediante aplicación de calor. El asfalto se considera como un cemento bituminoso, debido al hecho de que está constituido por hidrocarburos.

Existen tres métodos de diseño utilizados para determinar las proporciones adecuadas de asfalto y agregados. Ellos son el método Marshall y el método Hveem, actualmente el método que se utiliza en EEUU es el método SUPERPAVE ya que se considera que la metodología de diseño esta basada en pruebas más reales y científicas y no empíricas como

las del método Marshall; debido a las condiciones económicas los países como el nuestro se siguen utilizando es el método Marshall.<sup>1</sup>

## **2.2 PAVIMENTOS**

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aún en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

### **2.2.1 Tipos de pavimentos**

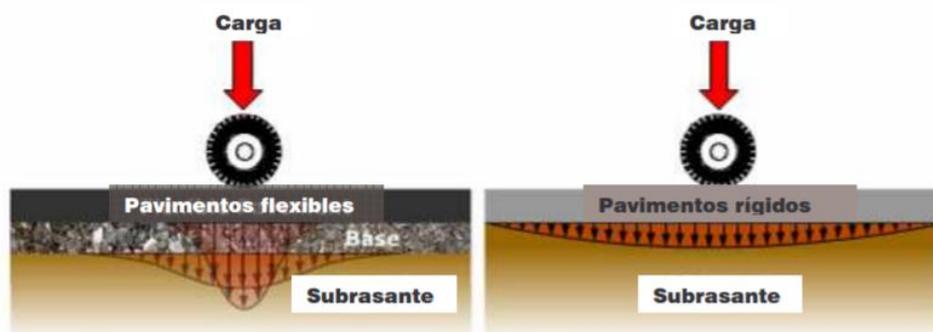
Los pavimentos se componen de capas sobrepuestas con finalidades específicas. Al utilizar una vía pavimentada el usuario ve apenas los beneficios con relación a la utilidad y comodidad ofrecida apenas por la capa superficial, o sea, la capa de rodamiento. El usuario común no imagina que el desempeño de ésta dependa fundamentalmente de las capas inferiores de soporte.

Los pavimentos están divididos, en lo que se refiere a su capa superficial en dos grupos: Pavimentos Rígidos y Pavimentos Flexibles

---

<sup>1</sup> Garnica Anguas, P., y Flores, M. (2005). Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas. Publicación técnica No 267 Sanfandilla, Qro Mexico.

**Figura 2.1 Distribución de las cargas en los pavimentos flexibles y rígidos**



Fuente: Tesis. Modelo empírico de diseño de pavimentos flexibles. Pag, 11

### **2.2.1.1 Pavimento rígido**

El pavimento rígido se compone de losas de concreto hidráulico o cemento Pórtland que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de dilatación entre losas.

Este tipo de pavimento se utiliza generalmente en proyectos destinados a soportar grandes cargas, intenso tráfico o incluso en terrenos de baja capacidad de soporte. Su mayor aplicación, hoy, está en la pavimentación de grandes carreteras, avenidas de intenso tráfico pesado, aeropuertos, áreas portuarias de movimiento de cargas pesadas, etc.

### **2.2.1.2 Pavimento flexible**

Los pavimentos flexibles elaborados a partir de la mezcla de áridos y cemento asfáltico resultan más económicos en su construcción inicial, tiene un periodo de vida de entre 10 y 20 años, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil.

Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de una carpeta asfáltica, de la base y la sub-base. Se usan e indican para la mayoría de los proyectos de pavimentación. Esa

técnica de pavimentación tiene a su disposición varios procesos diferentes cuya elección depende de la evaluación de costos, intensidad de tráfico, vida útil, etc.<sup>2</sup>

El pavimento flexible típicamente consiste en una estructura integral de 4 capas: subrasante, sub-base, base y carpeta (o también conocida como superficie de rodamiento), destinada a sostener las cargas vehiculares. A continuación, se presenta la estructura por la que está constituido el pavimento:

**Figura 2.2 Estructura básica de un pavimento flexible**



Fuente: Tesis. Modelo empírico de diseño de pavimentos flexibles. Pag, 14

#### **2.2.1.2.1 Carpeta o superficie de rodamiento**

Se le llama carpeta asfáltica o superficie de rodamiento a la capa superior de la estructura de un pavimento, diseñada para soportar las cargas del tránsito, resistir el deslizamiento de los vehículos y la abrasión que ellos producen, así como el intemperismo. La superficie de rodadura está conformada por tres componentes: agregados pétreos, asfalto y vacíos de aire (porcentaje de vacíos en la mezcla).

#### **2.2.1.2.2 Base**

La función principal que posee esta capa es distribuir y transmitir las cargas generadas por el tránsito a la subbase y a través de esta a la subrasante. Sobre ella se coloca la superficie

<sup>2</sup>Barrios Bolaños, W. (2007). Guía Teórica y Práctica del Curso de Pavimentos y Mantenimiento de carreteras. Guatemala.

de rodamiento. La base debe de cumplir mínimo con los siguientes valores: CBR 80, compactación 95% según AASHTO T180, límite líquido máximo 35, índice de plasticidad entre 4 y 9 y cumplir con AASHTO M147. Las bases especificadas son:

#### **2.2.1.2.3 Base granular**

Material constituido por partículas duras y durables (piedra de buena calidad) que se encuentra inmediatamente debajo de la capa superficial. Puede estar compuesta de escoria triturada, roca triturada, grava y arena triturada o cualquier combinación de estos materiales, que cumple con la normativa vigente. La estabilidad de esta capa dependerá de la graduación, forma, densidad relativa, fricción interna y cohesión que posean las partículas y a su vez, todas estas propiedades están relacionadas con la proporción de finos, con respecto al agregado grueso.

#### **2.2.1.2.4 Base estabilizada**

Capa formada por la combinación de piedra o grava trituradas, combinadas con material de relleno, mezclados con materiales o productos estabilizadores, preparada y construida aplicando técnicas de estabilización, para mejorar sus condiciones de estabilidad y resistencia, para construir una capa destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a la capa de subbase.

#### **2.2.1.2.5 Sub base**

La capa o capas de material colocado sobre una subrasante o material selecto para soportar la base o superficie de un pavimento es la capa sub base que requiere cumplir como mínimo con las siguientes propiedades: CBR 30, índice de plasticidad entre 4 y 10, límite líquido máximo de 35 y compactación de 95% según AASHTO T180.

Esta capa tiene como función soportar, transmitir y distribuir uniformemente las cargas aplicadas a la superficie de rodamiento con el propósito de que la subrasante logre soportarla. Es utilizada también como capa de drenaje y se encarga de controlar la ascensión capilar del agua, por ello generalmente se utiliza material granular.

#### **2.2.1.2.6 Subrasante**

Capa de terreno de una carretera, que soporta la estructura del pavimento y que se extiende hasta una profundidad en que no le afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y debidamente compactada, para luego realizar las secciones transversales y pendientes especificadas en el diseño. Se deben de contemplar requisitos de resistencia mínima, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de humedad.

La compactación deberá realizarse al 95% de la densidad máxima y el contenido de humedad, así como la densidad en sitio se medirán de acuerdo con las normas AASHTO T 238 y T 239.<sup>3</sup>

### **2.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS**

La mezcla asfáltica se puede definir como la combinación de agregados pétreos con cemento asfáltico, mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto.

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 tráfico pesado intenso. 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.

---

<sup>3</sup>Murillo Rodríguez, M. (2006). Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas con RAP. Universidad Rodrigo Facio. Costa Rica.

### 2.3.1 Clasificación de mezcla asfáltica

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

**Tabla 2.1 Clasificación de las mezclas asfálticas**

Clasificación de mezclas asfálticas	Fracción de agregado	Masilla asfáltica
		Mortero asfáltico
		Concreto asfáltico
		Macadam asfáltico
	Temperatura de puesta en obra	Mezclas en caliente
		Mezclas en frío
	Proporción de vacíos	Mezclas densas
		Mezclas semi densas
		Mezclas abiertas
		Mezclas porosas o drenantes
	Tamaño máximo del agregado	Mezclas gruesas
		Mezclas finas
	Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
		Sin esqueleto mineral
	Granulometría	Mezclas continuas
		Mezclas discontinuas

Fuente 1: Elaboración propia

#### 2.3.1.1 Mezcla asfáltica en caliente

Las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) o concreto asfáltico, es un material vial compuesto de ligante asfáltico y agregado mineral. El ligante puede ser un cemento asfáltico o un cemento asfáltico modificado, el cual actúa como un agente ligante que

aglutina las partículas en una masa cohesiva. Debido a que el cemento asfáltico es altamente impermeable al agua, éste también impermeabiliza la mezcla. Por otra parte, el agregado mineral actúa como un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez a la mezcla.

El concreto asfáltico mezclado en planta es fabricado y colocado a una temperatura aproximada de 150°C y compactada en caliente a una temperatura de 140 °C.

### **2.3.2 Características de la mezcla (analizando el método Marshall)**

La mezcla asfáltica en caliente 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**

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 por lo que, el agua no entrará en su interior obteniéndose, de esta manera, una carpeta de rodadura más durable. La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) o libras por pie cúbico ( $\text{lb/pie}^3$ ), se calcula al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$  o  $62,416 \text{ lb/pie}^3$ ). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar si la densidad del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto, las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

#### **Vacíos de aire**

Están presentes 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 éstos 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.

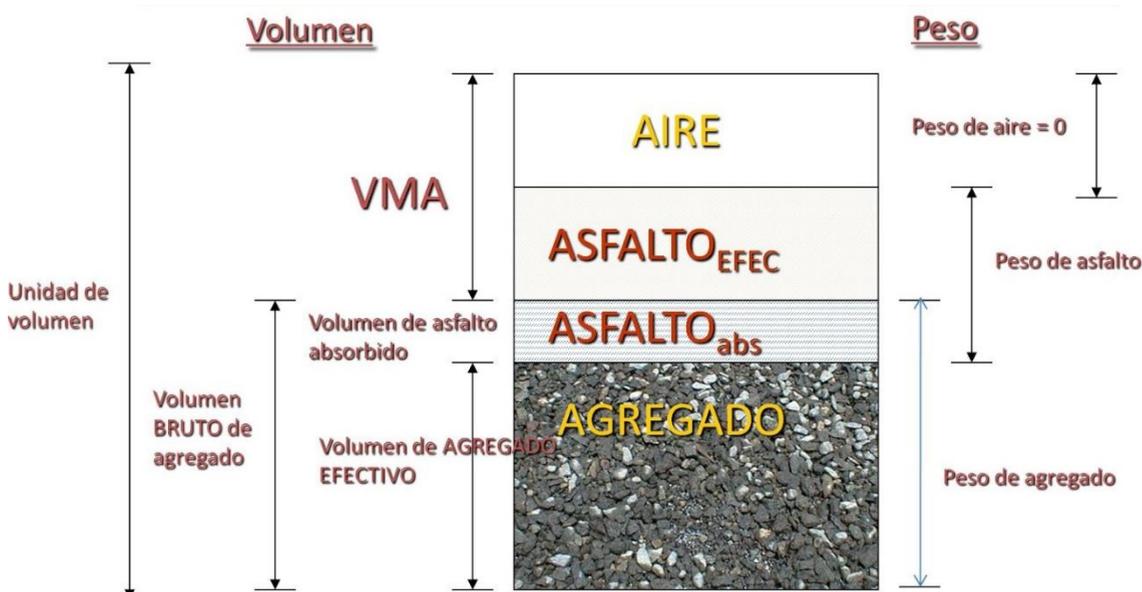
## Contenido de asfalto

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 de agregado que pasan a través del tamiz de 0,075 mm (N° 200)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. En caso contrario, al efectuar pequeñas disminuciones de filler, nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

**Figura 2.3 Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica**



Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 401

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

El contenido efectivo de asfalto: 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, 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.

### **2.3.3 Propiedades de las mezclas asfálticas**

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría del agregado a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas en la mezcla y se satisfagan los requisitos específicos del proyecto.

#### **Estabilidad**

Es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas por el tránsito. La carpeta asfáltica debe de ser capaz de mantener su

forma y textura ante las secuencias de carga que a diario le son impuestas. La fricción interna depende de la textura superficial, graduación del agregado, forma de la partícula, densidad de la mezcla, y, del contenido y tipo de asfalto. La estabilidad es función de la fricción y la resistencia inter-bloqueada del agregado en la mezcla. Cuando se sobrepasa el nivel óptimo de asfalto, la película es demasiado gruesa y esto genera que la cohesión decrezca, resultando en pérdida de fricción entre las partículas que componen la mezcla asfáltica. Es importante que las partículas que componen el agregado sean angulares y ásperas en su textura superficial, esto dará una alta estabilidad a la mezcla.

Los problemas clásicos debido a una estabilidad baja se detallan a continuación:

### **Ahuellamiento**

Consiste en una depresión continua a lo largo de la capa de rodadura. Las cargas repetitivas de tránsito conducen a deformar permanentemente cualquier capa que componen la estructura del pavimento, sin embargo, cuando la carpeta asfáltica recién colocada presenta ahuellamiento es debido al exceso de asfalto en la mezcla, es decir el óptimo de asfalto se ha sobrepasado y genera, por consiguiente, pérdida de cohesión. El ahuellamiento también es producido por la forma redondeada de la partícula, por la falta de textura áspera, falta de adherencia y absorción del agregado. Es decir, si una mezcla tiene un óptimo de asfalto y sus agregados no cumplen con las siguientes propiedades tales como: graduación, limpieza, dureza, textura superficial, capacidad de absorción, afinidad con el asfalto, peso específico, también nos generara ahuellamiento y una serie de problemas que desarrollaremos en este capítulo.

### **Corrimiento**

Consiste en el desplazamiento de la mezcla asfáltica provocando distorsiones en la superficie de la carpeta asfáltica, acompañado a veces por levantamiento de material formando “cordones” principalmente laterales. Estos desplazamientos son ocasionados por las cargas de tránsito y son debido al exceso de asfalto, falta de vacíos o bien por falta de confinamiento lateral. La corrugación es una serie de ondulaciones constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección de tránsito, siendo próximas unas de otras, por lo general menores a un metro entre ellas.

### **Exudación del asfalto**

Es el afloramiento del asfalto o ligante asfáltico hacia la superficie de la carpeta asfáltica. Por lo que, se forma una película continua de ligante, creando una superficie brillante, reflectante, resbaladiza y pegajosa durante las altas temperaturas. Es causado específicamente por un excesivo contenido de asfalto. Ocurre en mezclas con un porcentaje de vacíos deficiente, durante épocas calurosas. El proceso de exudación no es reversible durante el tiempo frío, por tal motivo, el asfalto se acumula en la superficie.

### **Durabilidad**

Es la propiedad de una mezcla asfáltica para resistir los efectos perjudiciales causados por el agua, aire, temperatura y las cargas debidas al tráfico. Estos efectos perjudiciales provocan desintegración del agregado, cambio en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), envejecimiento, segregación, etc. Puede mejorarse la durabilidad de una mezcla asfáltica de tres maneras:

#### **Utilizando un contenido óptimo de asfalto**

Se aumenta la durabilidad de la mezcla ya que las partículas del agregado están cubiertas por una película gruesa de asfalto. Esto evita el envejecimiento y el endurecimiento del asfalto, reteniendo por más tiempo las características originales tanto del asfalto como de los agregados.

#### **Utilizando una graduación densa**

Esto proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, mejorando así la impermeabilidad de la mezcla.

#### **Diseñar y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad**

Esto se logra mediante la compactación por medios mecánicos utilizando maquinaria y equipo adecuado.

## **Flexibilidad**

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamiento, soportando los movimientos graduales y asentamientos de la base y subbase. Los asentamientos en el pavimento pueden ocurrir debido a que falle cualquiera de sus componentes, lo cual provoca daños visibles en la carpeta de rodadura. De hecho, todas las estructuras tienden a tener asentamientos diferenciales. Por lo tanto la flexibilidad de las mezclas asfálticas es incrementada agregando mayor contenido de asfalto, hasta llegar al contenido óptimo, a partir de este, si se aumenta en exceso el contenido de asfalto la carpeta tiende a ser extremadamente flexible y provoca entonces una mezcla con estabilidad baja. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

## **Resistencia a la fatiga**

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir la flexión repetida causada por las cargas de tránsito. Si el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Por tal razón, las mezclas asfálticas de graduación densa presentan mayor resistencia a la fatiga que las mezclas asfálticas de graduaciones abiertas.

El envejecimiento y endurecimiento del asfalto en la carpeta de rodadura da como resultado menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, influyen determinadamente en la vida útil de una carpeta de rodadura asfáltica. Si la carpeta asfáltica presenta buena resistencia a la fatiga y la subbase está mal compactada, se verán claramente los asentamientos y la resistencia a la fatiga disminuirá considerablemente. Caso contrario, si la subbase está bien compactada y la carpeta asfáltica presenta mala resistencia a la fatiga, la carpeta se dañará. Por lo anterior, el pavimento debe trabajar en conjunto para que pueda resistir la flexión causada por el tránsito.

A continuación, se detallan algunos daños visibles debido a una mala resistencia a la fatiga:

### **Fisura piel de cocodrilo**

Consiste en una serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de la carpeta asfáltica, donde las tensiones y deformaciones por tracción alcanzan su valor máximo, cuando el pavimento es solicitado por una carga. Las fisuras se propagan a la superficie y evolucionan interconectándose y formando una malla cerrada, que asemeja el cuero de un cocodrilo. La fisura piel de cocodrilo es causada por la fatiga que sufre la carpeta de asfáltica al ser sometidas a las cargas repetidas del tránsito. Por lo general, el fisuramiento indica que el pavimento ya no tiene capacidad estructural de sostener las cargas de tránsito y ha llegado al fin de su vida útil. El ligante por lo general ha envejecido y por ende ha perdido la flexibilidad de sostener cargas repetidas al tránsito sin agrietarse.

### **Fisuras en bloque**

Son una serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, con diámetro promedio mayor de 30 cm, y un área variable de 0,10 a 9,00 m<sup>2</sup>. Se presentan generalmente en una gran área de la carpeta asfáltica y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico. Son causadas principalmente por la contracción de las mezclas asfálticas debido a las variaciones diarias de temperatura. A menudo es difícil constatar si las fisuras y grietas son debido a contracciones producidas en la carpeta asfáltica o en la base y subbase.

La presencia de fisuras en bloques generalmente es un indicativo de que el asfalto se ha endurecido significativamente.

### **Fisura transversal**

Se refiere a una fracturación de longitud variable que se extiende a través de la superficie de la carpeta asfáltica, formando un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril como limitarse a los 0,60 m próximos al borde lateral de la carpeta de rodadura. La contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad; es decir, si una carpeta asfáltica no tiene la capacidad de flexionar

repetitivamente la resistencia a la fatiga es menor o nula. Puede ser ocasionado por un exceso de filler, envejecimiento asfáltico, etc; particularmente ante la baja temperatura y gradientes térmicos importantes.

### **Peladura**

Consiste en la desintegración superficial de la carpeta asfáltica como consecuencia de la pérdida de ligante bituminoso y del desprendimiento del agregado pétreo, aumentando la textura de la carpeta asfáltica pavimento y exponiendo cada vez más los agregados a la acción del tránsito y el clima.

### **Resistencia al fracturamiento por baja temperatura**

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no agrietarse en condiciones de bajas temperaturas. Depende principalmente de la rigidez del asfalto a bajas temperaturas.

### **Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad**

Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada y, por tanto, con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento.

### **Resistencia al deslizamiento**

Es la habilidad de una carpeta asfáltica, particularmente cuando está mojada, de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos. Esto implica que el neumático debe mantenerse en contacto con las partículas del agregado y no sobre una película de agua en la superficie del pavimento, conocido como hidropelaje. Los agregados con texturas ásperas y contenidos adecuados de asfalto contribuyen en una buena resistencia al deslizamiento. Los contenidos altos de asfalto producen mezclas inestables las cuales tienden a deformarse y exudar, generando así, mayor deslizamiento.

## **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; sin embargo, tiene algún efecto sobre esta propiedad.

Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable; mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

Existen varias clasificaciones de mezclas asfálticas, de acuerdo con el parámetro considerado para establecer las diferencias. Así, conforme las fracciones de agregado pétreo empleado en la elaboración de la mezcla, éstas se dividen en mástico asfáltico; mortero asfáltico; macadam asfáltico; y concreto asfáltico. Si la temperatura es considerada, se dividen en mezclas en frío y mezclas en caliente. Si el parámetro considerado es el porcentaje de vacíos de aire, las mezclas pueden ser densas o cerradas; semidensas o semicerradas; abiertas y porosas, dependiendo de si tienen menos del 6%, entre el 6 y el 12% de vacíos de aire, entre el 12 y el 18% o más del 20%, respectivamente. Otra clasificación se establece de acuerdo con la estructura de los agregados pétreos; así, se tienen mezclas con o sin esqueleto mineral. Si se considera la curva granulométrica, se clasifican en mezclas asfálticas continuas o mezclas discontinuas.

### **2.4 COMPONENTES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

La mezcla asfáltica es el resultado de combinar material asfáltico con agregados pétreos en proporciones exactas, o bien, en distribución uniforme. Las proporciones relativas de dichos minerales establecen las propiedades físicas de la mezcla una vez terminada.

### 2.4.1 Cemento asfáltico

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe disolución. El petróleo crudo se destila para separar sus diversas fracciones y recuperar el asfalto. Procesos similares producidos naturalmente han dado lugar a yacimientos naturales de asfalto, en algunos de los cuales el material se encuentra prácticamente libre de materias extrañas, mientras que en otros este mezclado con cantidades variables de minerales, agua y otras sustancias.

El asfalto es un material de particular interés para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación.

En una mezcla asfáltica el cemento asfáltico está presente en un porcentaje menor en cuanto a su proporción, pero sus propiedades influyen de gran manera en el comportamiento de la mezcla, por lo que las características del ligante asfáltico son importantes en su desempeño.

El cemento asfáltico es un material viscoelástico, a altas temperaturas (mayores a 100 °C), actúa casi como un fluido viscoso, a bajas temperaturas (menores a 0 °C), su comportamiento es más parecido a un sólido elástico volviéndose a su condición original cuando se carga y se descarga, a temperaturas intermedias como las que se encuentran generalmente, em cemento asfáltico presenta ambas características.

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, que tiene las propiedades ideales para la construcción de pavimentos cumpliendo las funciones de impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación también proporciona una fuerte unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de

disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.

### 2.4.1.1 Clasificación del cemento asfáltico

Los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes. Ellos son: viscosidad, según la especificación AASHTO M 226, viscosidad después de envejecimiento, AASHTO M 226 y penetración según la especificación AASHTO M 20. Cada sistema abarca diferentes grados, cada uno con diferentes rangos de consistencia.<sup>4</sup>

**Tabla 2.2 Requisitos del cemento asfáltico clasificado por penetración**

Pruebas	Grado de penetración									
	40 - 50		60 - 70		85 - 100		120 - 150		200 - 300	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Penetración a 25 °C (77 °F), 100, 5 seg.	40,00	50,00	60,00	70,00	85,00	100,00	120,00	150,00	200,00	300,00
Punto de inflamación °C (°F)	232,00	-	232,00	-	232,00	-	218,00	-	177,00	-
	450,00		450,00		450,00		425,00		350,00	
Ductilidad a 25 °C (77 °F), 5 cm/min, cm	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-	-	-
Solubilidad en tricloroetileno, porcentaje	90,00	-	90,00	-	90,00	-	90,00	-	90,00	-
Prueba en horno de película delgada (TFO), 3,2 mm (1/8 in), 163 °C (325 °F), 5 horas perdida por calentamiento, porcentaje										
	-	0,80	-	0,80	-	1,00	-	1,30	-	1,50
Penetración del residuo, porcentaje del original	58,00	-	54,00	-	50,00	-	46,00	-	40,00	-
Ductilidad de residuo, a 25 °C (77 °F), 5 cm/min.cm	-	-	50,00	-	75,00	-	100,00	-	100,00	-
Prueba de mancha (cuando y como se especifique) (ver nota)	Negativo para todos los grados									
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados									
Solvente de nafta-xileno, porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados									
Solvente de heptano-xileno, porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados									

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 223

<sup>4</sup>Cortez García, J. (2007). Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente. Universidad de El Salvador.

## **2.4.1.2 Ensayos realizados al cemento asfáltico para determinar sus propiedades**

### **2.4.1.2.1 Penetración (ASTM D 5; AASHTO T49-97)**

Este método describe un procedimiento para determinar el grado de dureza de un ligante asfáltico, mediante el uso de un equipo denominado penetrómetro. Este mide la profundidad de penetración, efectuada con una aguja estándar que cae verticalmente dentro de una muestra, bajo condiciones específicas de temperatura, carga y tiempo.

### **2.4.1.2.2 Ductilidad (ASTM D 113; AASHTO T51-00)**

Mide la resistencia a la ruptura por medio del alargamiento en un equipo llamado ductilímetro. La ductilidad de un ligante asfáltico es la longitud en (cm) que se alarga o elonga hasta romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra de ligante asfáltico, se estiran a velocidad y temperatura específica. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de  $25 \pm 0,5$  °C y a una velocidad de 5 cm/min  $\pm$  5%.

### **2.4.1.2.3 Punto de inflamación y combustión en la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01; AASHTO T79-96)**

El método define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para productos del petróleo y otros líquidos, excepto aceites combustibles y materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de los 79 °C.

### **2.4.1.2.4 Viscosidad Saybolt Furol (AASHTO T201; ASTM D 2170)**

Este método abarca los procedimientos para determinar la viscosidad de asfaltos líquidos, aceites de caminos y residuos destilados de asfaltos líquidos, todos a 60 °C, y de cementos asfálticos a 135 °C.

### **2.4.1.2.5 Punto de ablandamiento (ASTM D 36; AASHTO T53-96)**

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentre en el rango de 30 a 200°C, por medio del aparato de anillo y bola.

#### 2.4.1.2.6 Densidad (ASTM D 71-94; AASHTO T229-97)

Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos, mediante el uso del picnómetro a la temperatura requerida.

#### 2.4.1.3 Ensayos realizados a los agregados

Agregado, es un material granular duro de composición mineralógica, usado para ser mezclado en diferentes tamaños de partículas graduadas, como parte de una mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen la arena, la grava, la escoria de alto horno, o la roca triturada y polvo de roca. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad soportante.

El agregado constituye entre el 90 % y 95 % en peso y entre el 75 % y 85 % en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento.

**Tabla 2.3. Clasificación de los agregados para pavimentos.**

Clasificación de los agregados	
Agregados naturales	Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento.
Agregados procesados	Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados.
Agregados sintéticos o artificiales	Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales.

Fuente: Elaboración Propia

#### 2.4.1.3.1 Granulometría (ASTM E 40; AASHTO T27-99)

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Se muestran los tamaños y números de tamices más frecuentemente usados para determinar la graduación de agregado para mezclas asfálticas de pavimentación.

**Tabla 2.4 Serie de tamices utilizados para realizar la granulometría**

<b>Designación de tamices</b>			
<b>Para agregados gruesos</b>		<b>Para agregados finos</b>	
<b>Sistema métrico</b>	<b>Sistema habitual norteamericano</b>	<b>Sistema métrico</b>	<b>Sistema habitual norteamericano</b>
63,00 mm	2½ plg	2,36 mm	N° 8
50,00 mm	2 plg	1,18 mm	N° 16
37,50 mm	1½ plg	0,60 mm	N° 30
25,00 mm	1 plg	0,30 mm	N° 50
19,00 mm	¾ plg	0,150 mm	N° 100
12,50 mm	½ plg	0,075 mm	N° 200
9,50 mm	3/8 plg		
4,75 mm	N° 4		

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 36

#### **2.4.1.3.2 Densidad real, densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos y finos (AASHTO T85; AASHTO T84)**

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos.

Es aplicable a los áridos gruesos y finos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m<sup>3</sup>, que se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas.

#### **2.4.1.3.3 Equivalente de arena (ASTM D 2419; AASHTO T176-00)**

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz N° 4 (4,75 mm).

#### **2.4.1.3.4 Desgaste mediante la máquina de los Ángeles (ASTM E 131; AASHTO T96-99)**

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,36 mm, de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m<sup>3</sup>, mediante la máquina de los Ángeles.

#### **2.4.1.3.5 Desintegración de sulfato de sodio (ASTM E 88; AASHTO T104-99)**

Este método establece el procedimiento para determinar la desintegración de los áridos mediante soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. El uso de otra sal es alternativo, pero sus resultados no son comparables. Este método se aplica a los áridos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m<sup>3</sup>, que se utilizan en la elaboración de morteros y mezclas asfálticas.

#### **2.4.1.3.6 Caras fracturadas en los áridos (ASTM D 5821)**

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso del material que presenta una o más caras fracturadas de las muestras de áridos.<sup>5</sup>

### **2.4.1.4 Especificaciones que deben cumplir los agregados**

#### **2.4.1.4.1 Agregado grueso**

El agregado grueso será piedra o grava triturada (retenidos en la malla de 4,75 mm). El agregado grueso estará constituido de fragmentos sanos, duros, durables, libre de terrones de arcilla y sustancias nocivas, debe presentar las siguientes características:

**Tabla 2.5 Especificaciones que debe cumplir el agregado grueso**

<b>Nº</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Norma</b>	<b>Especificación</b>
1	Abrasión de los Ángeles	AASHTO T 96	40,00 % máx.
2	Durabilidad, sulfato de sodio	AASHTO T 104	12,00 % máx.
3	Caras fracturadas	ASTM D 5821	75,00 % min.

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

<sup>5</sup> APIA XXI, (2010). Manual de ensayos de Suelos y materiales asfalto (V4a-Vab). Administradora Boliviana de Carreteras.

### 2.4.1.4.2 Agregado fino

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra quebrada cernida, o su combinación y deberá tener una granulometría que (material que pasa la malla 4.75 mm), al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría requerida según AASHTO M 29 incluyendo la pérdida en sulfato, y que llene además los requisitos siguientes:

**Tabla 2.6 Especificaciones que debe cumplir el agregado fino**

Nº	Parámetro	Norma	Especificación
1	Índice de durabilidad (fino)	AASHTO T 210	35,00 % min
2	Equivalente de arena	AASHTO T 176	45,00 % min
3	Durabilidad, sulfato de sodio	AASHTO T 104	12,00 % máx

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

**Tabla 2.7 Graduación del agregado fino de acuerdo a AASHTO M 29**

Graduación del agregado fino						
Tamaño de tamiz		Cantidad más fina que pasa cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), Masa, %				
		Graduación N° 1	Graduación N° 2	Graduación N° 3	Graduación N° 4	Graduación N° 5
3/8"	9,50 mm	100	-	-	100	100
N° 4	4,75 mm	95 a 100	100	100	80 a 100	80 a 100
N° 8	2,36 mm	70 a 100	75 a 100	95 a 100	65 a 100	65 a 100
N° 16	1,18 mm	40 a 80	50 a 74	85 a 100	40 a 80	40 a 80
N° 30	0,60 mm	20 a 65	28 a 52	65 a 90	20 a 65	20 a 65
N° 50	0,30 mm	7 a 40	8 a 30	30 a 60	7 a 40	7 a 46
N° 100	0,15 mm	2 a 20	0 a 12	5 a 25	2 a 20	2 a 30
N° 200	0,075 mm	0 a 10	0 a 5	0 a 5	0 a 10	-

Fuente: Tabla 1 norma AASHTO M 29

#### **2.4.1.5 Filler (llenante mineral)**

El filler consiste en material finamente dividido donde sus partículas pasan a través del tamiz 0,075 mm (N° 200), generalmente son provenientes de rocas, cal hidratada, cemento hidráulico, cenizas volantes u otro material adecuado.

El filler o llenante mineral es el material que es incorporado a las mezclas asfálticas con el fin de modificar sus propiedades mecánicas y complementar la fracción granulométrica, para generar una mezcla bien gradada y un mejor comportamiento de esta.

##### **2.4.1.5.1 Influencia del filler en las propiedades de las mezclas asfálticas**

Las principales propiedades de las mezclas asfálticas que determinan su calidad se resumen en tres y son: Resistencia ante la deformación, flexibilidad y durabilidad.

##### **Mejorar el cerrado de la mezcla sin el empleo exagerado de asfalto**

Esto debido a que el filler actúa como rellenedor de vacíos, lo cual permite disminuir espacios libres existentes entre agregados mayores. Esta actividad además depende de los vacíos de la mezcla, ya que cuando el agregado está bien graduado y la forma de sus partículas permiten una ajustada distribución, entonces la necesidad de agregar filler es menor, incluso puede llegar a ser inconveniente por disminuir exageradamente se obtendrían mezclas pobres de ligante de menor durabilidad.

##### **Incrementar la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica**

Se debe a que el filler aumenta de manera importante la viscosidad del asfalto, mejor dicho, la combinación de filler-asfalto es un sistema de alta viscosidad el cual participa de manera importante en la resistencia ante la deformación.

##### **Incrementar la durabilidad de la mezcla**

Esto debido a que el filler actúa como rellenedor de vacíos, lo cual permite disminuir la porosidad dificultando la entrada de agentes agresivos como el agua, aire; además de que es el principal aglomerante dentro de la mezcla asfáltica y mantiene unidos a los agregados.

### 2.4.1.5.2 Ensayos realizados al filler

#### Granulometría del filler (ASTM D 246)

El método tiene por objeto el análisis, por medio de tamices, del filler empleado en materiales componentes de mezclas para pavimentos bituminosos.

#### Índice de plasticidad (ASTM D 4318; AASHTO T 90)

Este método establece el procedimiento para determinar el índice de plasticidad del material fino (filler).

### 2.4.1.5.3 Especificaciones del filler

La granulometría debe cumplir con lo establecido en la siguiente tabla.<sup>6</sup>

**Tabla 2.8 Granulometría que debe cumplir el filler de acuerdo con la norma ASTM**

Tamaño del tamiz	Porcentaje pasante (%)
Nº 16 (1,18 mm)	100,00
Nº 30 (600 µm)	97,00 – 100,00
Nº 50 (300 µm)	95,00 – 100,00
Nº 200 (75 µm)	70,00 – 100,00

Fuente: ASTM D 242 (Standard specification for mineral filler for bituminous paving mixtures)

**Tabla 2.9 Especificaciones que debe cumplir el filler**

Nº	Parámetro	Norma	Especificación
1	Índice de plasticidad	ASTM D 4318 AASHTO T 90	4,00 % máx.

Fuente: ASTM D 242 (Standard specification for mineral filler for bituminous paving mixtures)

<sup>6</sup>Cortez García, J. (2007). Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente. Universidad de El Salvador.

## 2.5 PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)

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

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

El pavimento asfáltico reciclado se obtiene mediante algunos de los siguientes procesos:

- Fresado: Extraer el nivel superior del pavimento.
- Remoción del espesor completo del pavimento, en donde además se extraen las capas granulares bajo el asfalto.
- Trozos de demolición de pavimentos asfálticos.
- Excesos de producción.

**Figura 2.4 Pavimento asfáltico reciclado (RAP)**



Fuente: //es.linkedin.com/pulse/trabajo-reciclaje-de-asfalto-para-bolivia-ramirez-arze

Es importante entender que las partículas de RAP son granulares de distintos tamaños que aún siguen cohesionados por el efecto del cemento asfáltico y que esta cohesión aun seguirá aportando resistencia en la mezcla bituminosa reciclada.

### 2.5.1 Caracterización del RAP

Para la caracterización del RAP se practicarán los ensayos de rigor que normalmente se realizan sobre agregados naturales.

**Tabla 2.10 Ensayos de caracterización de RAP**

<b>Caracterización de RAP</b>	
Análisis granulométrico	ASTM C 1236; AASHTO T27
Desgaste de los ángeles	ASTM E 131; AASHTO T96-99
Peso específico del agregado grueso	ASTM C-127, AASHTO T-85
Peso unitario	ASTM C-29, AASHTO T-19

Fuente: Elaboración Propia

Los ensayos de laboratorio anteriormente mencionados suelen practicarse a los agregados que serán empleados en una mezcla con el objetivo de poder contrastar las propiedades evaluadas en cada ensayo con los parámetros establecidos en las normas. Consecuentemente se valida o no, el uso de agregados según se observe su comportamiento a partir de las pruebas de laboratorio, ya que de estos depende en gran manera la resistencia y durabilidad de la mezcla.

### 2.5.2 Ventajas de utilización del RAP

A continuación, se muestran las principales ventajas de la utilización de pavimento asfáltico reciclado:

**Impacto al medio ambiente**

Debido a que se reutiliza el material, se disminuye el uso de materia prima no renovable (agregado pétreo), lo que contribuye al medio ambiente en un impacto positivo, ya que requiere de menos cantidad de material para producir mezcla asfáltica.

**Ahorro energético**

Debido a que el RAP se comporta como un agregado más en la mezcla, se incurre en una disminución de energía en cuanto a la trituración de material pétreo y a su vez en disminución de emisiones de gases.

**Ahorro económico**

Representa un ahorro económico debido a la reducción de demanda de materias primas no renovables, tales como los agregados pétreos y el asfalto, esto porque el RAP es comercializado a un costo más bajo.

**Disminución de desechos**

Colabora con la disminución en la cantidad de desechos generados por el tratamiento inadecuado de escombros y residuos asfálticos. La carpeta asfáltica que ya cumplió con su vida útil o que presentó problemas de deterioro a corto plazo, los desechos de planta y laboratorio, así como los materiales rechazados en campo, representan una gran cantidad de material de desecho, el cual no cuenta con un plan de tratamiento ni de reutilización adecuado.

**Buen desempeño de los materiales**

El desempeño mecánico y funcional de los materiales que aporta el RAP ha demostrado ser igual o mejor que los materiales provenientes de materias primas convencionales.

**Beneficios técnicos**

Provee beneficios desde el punto de vista técnico en caminos con pavimentos fatigados, deformaciones a nivel de carpeta asfáltica o con cierto grado de envejecimiento del asfalto,

la técnica de reciclaje es apropiada para remover las capas deterioradas y aplicar técnicas de mantenimiento y rehabilitación con el fin de incrementar el nivel de serviciabilidad de la capa de ruedo.

### **2.5.3 Métodos de reciclaje de pavimentos y aplicaciones**

A continuación, se presentan algunos de los métodos de reciclaje de pavimentos, así como las sus aplicaciones:

#### **2.5.3.1 Recuperación a profundidad total**

Esta técnica consiste en la pulverización y mezcla, en sitio, del espesor total de la capa asfáltica y una porción predeterminada de capas inferiores del pavimento (base, subbase, subrasante). Con ello se obtiene una base granular de alto desempeño, que puede ser colocada como tratamiento superficial bituminoso o como una nueva capa de ruedo.

Es importante conocer con detalle las propiedades de la capa asfáltica a reutilizar, ya que de esto dependerá el desempeño del nuevo material.

Dentro de las ventajas de la utilización de esta técnica se tienen: se pueden corregir deficiencias en la subrasante, la capa de base deteriorada se puede reconfigurar y así restaurar el perfil de la superficie y mejorar el drenaje.

**Figura 2.5 Método de recuperación a profundidad total**



Fuente: Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas con RAP.

### 2.5.3.2 Remoción en frío

En este método se remueve controladamente y con un equipo especializado el pavimento existente a una profundidad, perfil longitudinal o pendiente transversal deseada.

La perfiladora en frío utiliza una pequeña cantidad de agua durante la operación de fresado para controlar la cantidad de polvo generado y para extender la vida útil del equipo. El pavimento recuperado se carga en camiones y puede ser reutilizado para reforzar bases granulares o realizar reparaciones en pavimentos.

Dentro de las ventajas en la utilización de este método de reciclaje de pavimento se encuentran: restauración del drenaje, disminución de la fricción, conservación de energía en comparación con otros métodos de reconstrucción, aumento en la eficiencia de los proyectos, mayor productividad con menos interrupciones al tránsito, entre otros.

**Figura 2.6 Metodo de remocion en frio**



Fuente: Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas con Rap.  
pág 20

### 2.5.3.3 Reciclaje en frío

El reciclaje en frío consiste en el reciclado de pavimento sin la aplicación de calor durante el proceso de reciclaje. Se escarifica la capa, se incorpora el material reciclado en una máquina que lo combina con emulsión asfáltica de quiebre medio lento y, de ser necesario, agregado grueso, para confeccionar un nuevo material que se coloca y se compacta inmediatamente después de su combinación.

Las ventajas del método son: permite restaurar el pavimento al perfil deseado, eliminar las irregularidades y los baches, debido a que el material no se traslada hasta la planta, el tiempo de interrupción al tráfico es más corto que la remoción en frío.

#### **2.5.3.4 Reciclaje en sitio en caliente**

Este método de reciclaje se realiza en su totalidad en sitio, por medio de calentamiento y suavizado de la capa asfáltica existente, donde se obtiene su escarificación, mezclado, colocación y compactación con equipo de pavimentación convencional.

El proceso de remezclado de reciclaje en sitio en caliente consiste en calentar el pavimento asfáltico existente, cuando este es suavizado y escarificado se le añade agregado virgen, nuevo asfalto y agentes de reciclaje, adicionalmente se puede colocar una nueva capa de mezcla asfáltica (según sea necesario). Para ello es necesario conocer con detalle las propiedades de la capa asfáltica a reutilizar, ya que de esto dependerán los componentes que se deban de añadir y su concentración.

La ventaja de utilizar este método es: requiere de menos control de tráfico que otras técnicas de reciclaje, el asfalto oxidado se puede rejuvenecer con el uso de agentes de reciclaje para restaurar la flexibilidad del pavimento, el agregado que se ha descubierto de asfalto puede ser remezclado y por ende recubierto, la vía puede quedar en funcionamiento al final del día.

#### **2.5.3.5 Reciclaje en caliente en planta**

El reciclaje en caliente en planta consiste en la combinación de mezcla asfáltica virgen y RAP (que ha sido transportado hasta la planta). Esta es la técnica de reciclaje más utilizada en el mundo, debido a que en muchos de los países donde se practica el reciclaje de pavimentos se producen millones de toneladas de RAP anualmente. El proceso de producción de este método de reciclaje, se obtiene con plantas de mezclado en caliente diseñadas especialmente para ello, o bien modificando las convencionales.

Dentro de las ventajas del reciclaje en caliente se encuentran: conservación de recursos no renovables, los problemas de gradación del agregado existente se pueden corregir con una

adecuada selección de agregados vírgenes y agentes de reciclaje, mantiene o supera las propiedades de los pavimentos construidos con mezcla virgen.<sup>7</sup>

**Figura 2.7 Planta de producción de mezcla asfáltica en caliente**



Fuente: Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas con RAP.  
pág 22

## **2.5.4 Proceso de elaboración del rap**

### **2.5.4.1 Introducción**

Al reciclar el material de las mezclas asfálticas en caliente (HMA, por sus siglas en inglés de “Hot Mix Asphalt”) se obtiene, como resultado, una mezcla reutilizable de agregado y asfalto conocida como pavimento asfáltico recuperado o reciclado (RAP, por sus siglas en inglés de “Reclaimed Asphalt Pavement”). El RAP es el término dado a los pavimentos que contienen materiales tales como asfalto y agregados pétreos que fueron removidos y reprocesados para ser incorporados como materiales en una nueva carpeta asfáltica.

Cuando un pavimento asfáltico está por llegar al final de su vida útil de diseño, una parte importante de los materiales, principalmente los agregados pétreos, mantienen sus propiedades mecánicas y físicas en un valor lo suficientemente aceptable para poder ser reutilizado. Por lo tanto, el reciclaje o reutilización de los pavimentos tiene importantes beneficios económicos, técnicos y ambientales.

---

<sup>7</sup>Murillo Rodriguez, M. (2016). Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas con Rap. Costa Rica.

#### **2.5.4.2 Antecedentes**

En la década de los 70's y 80's, las principales preocupaciones ambientales en la producción de los pavimentos asfálticos habían sido las emisiones y el impacto que podrían tener en la salud de las personas. Algunos años después, se empezó a considerar el impacto que pudieran tener en el medio ambiente y los recursos naturales. En años recientes, las preocupaciones también se han enfocado en las emisiones de efecto invernadero las cuales son precursoras del cambio climático.

En términos generales, el impacto ambiental que genera un pavimento asfáltico está basado en el consumo energético en todo su ciclo de vida. Los consumos aproximados para la producción del asfalto representan entre el 45 al 95%; la transportación al sitio va de 1 al 8%; la colocación y compactación genera del 1 al 12%; los trabajos de mantenimiento en sitio de 0 a 1%; y la disposición al final de su vida útil de 0 a 40%. Del impacto total en la fase de producción, la producción del asfalto representa entre el 56 y el 67%, el transporte de agregados vírgenes a la planta del 13 al 16% y la energía requerida para secar y calentar los agregados de un 11 al 25%.

Una preocupación adicional es la lixiviación de componentes potencialmente peligrosos de los pavimentos que se pueden llegar a dar en el sitio y que podrían afectar el agua potable subterránea.

Para ayudar a la toma de decisiones y la resolución de los principales problemas es necesario abordar el análisis de un pavimento asfáltico en todo el ciclo de su vida, tomando como base los principios de termodinámica, conservación de la energía y recursos no renovables, balance natural, equilibrio ecológico, entre otros. Asimismo, toda iniciativa que pretenda reducir el impacto actual de los pavimentos asfálticos deberá evaluar todo su ciclo de vida, particularmente los impactos ambientales (consumo de recursos y sus externalidades) y los costos que estos representan.

#### **2.5.4.3 Pavimento asfáltico reciclado**

El Pavimento asfáltico reciclado, o RAP, suele ser incorporado a la estructura de la carretera generalmente en el pavimento asfáltico aunque también se puede integrar a la base o sub-base de una nueva estructura de pavimento.

El reciclaje de pavimentos, a pesar de ser una técnica desarrollada desde principios del siglo XX, empezó a emplearse con mayor frecuencia en Estados Unidos durante la década de los setentas. Originalmente el proceso de reciclaje se daba cuando recuperaban el material y lo transportaban a una planta en donde se le adicionaban aditivos tales como: agregado virgen, asfalto y agentes suavizantes o rejuvenecedores. Esto con el fin de recuperar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del asfalto para obtener un desempeño aceptable del mismo. Sin embargo, debido a que este proceso de reciclaje implicaba la generación de distintos viajes que iban desde el sitio hasta la planta, surgió un nuevo método que permite realizar el proceso de reciclaje in situ (en caliente o en frío), mediante la instalación de plantas en la zona de trabajo.

Actualmente, el reciclaje ha ido evolucionado mediante trenes de trabajo que utilizan diferentes maquinarias, comenzando con el fresado y recuperación de material (el cual puede incluir un proceso de ablandamiento con calor), seguido de la mejora de la mezcla, la colocación y la compactación en una sola línea de trabajo, la cual permite la apertura al tránsito en pocas horas.

Las principales metodologías/procesos para reciclar pavimentos asfálticos son:

- Reciclado en caliente (HMA): Mezcla de asfalto realizada a temperaturas de 165°C.
- Reciclado en tibio (WMA): Mezcla de asfalto realizada a temperatura de 100°C por medio de aditivos.
- Reciclado en frío (CMA): Mezcla del pavimento flexible retirado y molido, chancado y/o triturado, puesto de nuevo en sitio, compactado y sellado con una última capa de asfalto mezclado en caliente.

En nuestro caso particular se empleó un Reciclado en frío (CMA); ya que el material mencionado como RAP, primariamente se lo encuentra en las inmediaciones de carreteras nacionales, departamentales o municipales, las cuales en cierto momento de su vida útil fueron reparadas o reemplazadas por diversos motivos particulares en cada caso, por tanto, al contar con las carpetas asfálticas deterioradas o retiradas en calidad de escombros o residuos de obra, nace la primicia de reemplazar este material para fines académicos y técnicos consecuentes a cuidar el medio ambiente evitando así la contaminación del mismo por residuos distribuidos a lo largo de toda la historia de asfaltado en la región.

Este material en calidad de carpeta asfáltica deteriorada y/o desechada (RAP) debe estar visual y técnicamente libre de contaminantes que originalmente no formaron parte de la dosificación de la carpeta asfáltica de la cual provienen, dicha contaminación podría ser consecuencia del medio en el cual fueron depositados o incluso el tiempo que les toco permanecer ahí expuestas a los agentes externos de la zona.

Dicho material en calidad de carpeta asfáltica deteriorada y desechada debe ser sometido a un proceso de chancado o triturado dentro de las condiciones mecánicas óptimas, para así obtener el pavimento asfáltico reciclado (RAP).

#### **2.5.4.4 Calidad de los componentes del RAP triturado**

##### **2.5.4.4.1 Agregados**

###### **a) Agregado Grueso**

El agregado grueso será piedra o grava triturada. El agregado grueso está constituido de fragmentos sanos, duros, durables, libre de terrones de arcilla y sustancias nocivas, debe presentar las siguientes características:

- El porcentaje de desgaste de Los Ángeles de los agregados gruesos no será mayor que 40% a 500 revoluciones, al ser ensayado por el método AASHTO T-96.
- Los agregados gruesos, al ser sometidos a cinco ensayos alternativos de resistencia, mediante sulfato de sodio, empleando el método AASHTO T-104, no podrá tener una pérdida de peso mayor del 12%.

###### **b) Agregado Fino**

La porción de agregados que pase el tamiz No. 10 se designará como agregado fino y se compondrá de arena natural o cerniduras de piedra, o de una combinación de las mismas. Solamente se podrá utilizar cerniduras de piedra calcárea cuando se emplee una cantidad igual de arena natural.

Los agregados finos se compondrán de granos angulares, limpios, compactos, de superficie rugosa carentes de terrones de arcilla u otras sustancias inconvenientes.

- El ensayo de equivalente de arena, de acuerdo al método AASHTO T-176 deberá ser mayor que 45%
- Estos materiales no deberán acusar un hinchamiento mayor a 1.5 % determinado por el método AASHTO T-101.
- Cuando se utilice grava o cantos rodados triturados no menos del 90% en peso de las partículas retenidos por el tamiz n°4, deberá presentar por lo menos una cara fracturada.

**c) Material de Relleno (Filler)**

En caso del material de relleno (Filler), que estará constituido por materiales finamente divididos, inertes en relación de los demás componentes de la mezcla, no plásticos, tales como polvo calcáreo, roca dolomítica, cal apagada, cemento Pórtland, etc., y que llenen las siguientes exigencias granulométricas.

**Tabla 2. 11 Requisitos de Graduación para el Material de Relleno (Filler)**

<b>Tipo de tamiz</b>	<b>Porcentaje en peso que pasa por los tamices (AASHTO T-27)</b>
No.30	100
No.80	95 – 100
No.200	65 –100

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

En el momento de su aplicación deberán estar secos y exentos de grumos.

El polvo mineral será no plástico al ser ensayado por los métodos AASHTO T-91.

Si para cumplir con las especificaciones anteriores, resulta necesario el uso de material de relleno (Filler) que cumpla con las exigencias anteriormente indicadas, no se reconocerá al contratista ningún pago adicional por este concepto.

**Tabla 2. 12 Requisitos de Gradación para la mezcla para el diseño Marshall**

Granulometría para el diseño Marshall						
Malla en Pulg	Porcentaje por peso que pasa por la malla estándar (AASHTO T 27 Y AASHTO T 11)					
	A	B	C	D	E	F
1 ½"	100					
1"	97 a 100	100	100			
¾"	66 a 80 (5)	97 a 100	97 a 100	100	100	
½"	-	76 a 88	76 a 88 (±5)	97 a 100	97 a 100	
3/8"	53 a 70	-		-	(±5)	100
N° 4	40 a 52	49 a 59	49 a 59 (±7)	57 a 69	(±6)	37 a 47
N° 8	-	-	36 a 45 (±5)	-	-	-
N° 16	25 a 39	36 a 45	(±5)	41 a 49	(±5)	7 a 13
N° 30	12 a 22	20 a 28	(±4)	22 a 30	(±4)	-
N° 40	8 a 16	13 a 21	14 a 22 (±3)	13 a 21	(±3)	-
N° 100	-	-		-	-	-
N° 200	3 a 8	3 a 7	3 a 7	3 a 8	3 a 8	2 a 4

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 442

Las tolerancias admitidas en más o menos de la tabla se consignan entre paréntesis.

#### **2.5.4.5 Beneficios ambientales del pavimento asfáltico reciclado**

Como se ha mencionado anteriormente, los beneficios ambientales están acotados principalmente en el consumo de recursos y energía, así como en las externalidades del proceso al comparar la fabricación de un pavimento asfáltico con uno reciclado.

##### **2.5.4.5.1 Recursos naturales**

El reciclaje de pavimentos posibilita la reducción del consumo de recursos naturales, tales como los agregados pétreos. La recuperación del agregado de pavimento existente minimiza la extracción de recursos naturales.

La utilización de RAP reduce la demanda de agregados vírgenes proveniente de los bancos de materiales. Reutilizar el agregado existente en la carpeta puede sólo requerir entre 1% al 3% de asfalto adicional, comparado contra un 6% necesario por una carpeta asfáltica nueva. En un caso de estudio, realizado en Perú sobre rehabilitación, se logró reducir los 93% de agregados vírgenes requeridos en una mezcla nueva.

A su vez, en un estudio realizado en la Universidad de Santander en Colombia, se determinó el índice de consumo de agregados versus el porcentaje de agregado reciclado cuyos resultados se observan en la tabla 2.13.

**Tabla 2. 13 Variación en el consumo de agregados**

<b>% Agregado reciclado</b>	<b>Índice de variación en el consumo de agregado</b>	<b>Consumo de materiales (toneladas)</b>
0	1,12	4,426,240
5	1,06	4,189,120
10	1,00	3,952,000
20	0,89	3,517,280

Fuente: Castillo & Orduz.

#### **2.5.4.5.2 Consumo de energía**

En términos de transportación, el RAP logra disminuir el número de viajes ya que requiere un menor suministro de agregados vírgenes de banco debido al reúso de materiales. Por lo tanto, al reducir los viajes de camión, los cuales para un pavimento nuevo son indispensables para transportar todo el material, se tiene como resultado una menor cantidad de combustible consumido.

Además, esta metodología reduce la demanda de energía para la elaboración de la mezcla asfáltica ya que al agregar un 15% de RAP a una mezcla en caliente o templado de asfalto, la demanda de energía disminuye de un 13 a 14% (ver tabla 2.14).<sup>8</sup>

<sup>8</sup><https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40918>.

**Tabla 2. 14 Reducción del consumo de energía y emisiones mediante el uso del RAP**

	Consumo de energía		Emisiones de CO2	
	[MJ/m3]	[%]	[kgeqCO2/m3]	[%]
<b>Mezcla Virgen</b>				
Agregados	234,15	10,83%	16,58	15,25%
Conglomerante de asfalto	1564,89	72,41%	88,87	81,75%
Bacheo	362,16	16,76%	3,26	3,00%
<b>Total</b>	<b>2161,20</b>	<b>100,00%</b>	<b>108,71</b>	<b>100,00%</b>
<b>Mezcla 30% RAP</b>				
Agregados	182,55	9,79%	12,93	14,81%
Conglomerante de asfalto	1230,69	66,03%	69,89	80,07%
Bacheo	403,97	21,67%	3,64	4,17%
Preparación del RAP	46,74	2,51%	0,83	0,95%
<b>Total</b>	<b>1863,95</b>	<b>100,00%</b>	<b>87,29</b>	<b>100,00%</b>
<b>Diferencia</b>				
Agregados	51,6	22,04%	3,65	22,01%
Conglomerante de asfalto	334,2	21,36%	18,98	21,36%
Bacheo	-41,81	-11,54%	-0,38	-11,66%
<b>Total</b>	<b>343,99</b>	<b>16,00%</b>	<b>22,25</b>	<b>20,0,%</b>

Fuente: Chou, C. P., &amp; Lee, N. (2015)

A su vez, la combinación del RAP con asfalto permite que la rehabilitación se haga en sitio, eliminando así la necesidad de transportar el material a una planta que se traduce en un menor consumo de combustible. Cabe mencionar que se puede obtener una mayor reducción en el consumo de energía, al optar por una mezcla templada WMA o por una CMA para la rehabilitación del pavimento.

### 2.5.4.5.3 Emisiones contaminantes

Las emisiones están directamente ligadas al consumo de energía, tanto en el transporte del material como en la producción de la mezcla asfáltica, pero al mismo tiempo se generan polvos en la obtención de los materiales los cuales son partículas suspendidas. Así también la fabricación de las mezclas emite gases contaminantes derivados de los químicos utilizados. Por lo tanto, ambos casos tienen afectaciones a la salud.

De acuerdo a estudios realizados, el RAP puede ayudar a reducir las emisiones. Los resultados de uno de los estudios realizados a una temperatura de descarga de 300°F por tonelada de HMA [lbs] se muestran en la tabla 2.15.

**Tabla 2. 15 Diferencia en emisiones de CO2 agregados RAP y vírgenes**

Contenido de humedad [%]	Contenido RAP [%]				
	10	20	30	40	50
1	-2,00	0,50	2,90	5,60	9,00
2	-1,90	0,70	3,20	6,10	9,50
3	-1,80	1,00	3,60	6,50	10,10
4	-1,70	1,20	3,90	7,00	10,70
5	-1,60	1,50	4,30	7,40	11,30

Fuente: Frederick, G., & Tario, J. D. (2009)

En la rehabilitación de carreteras, los métodos convencionales generan 55.4% más kilogramos de CO2 que mediante el reciclado de asfalto debido a que el método tradicional requiere de un mayor número de máquinas para su construcción.

### 2.5.4.5.4 Residuos

Al no utilizar el material existente en un pavimento, éste se convierte en desperdicio. Estudios muestran que el método tradicional de rehabilitación genera 1.63 veces más residuos que el método de reciclado en sitio. En este aspecto, no se ha realizado suficiente investigación que permita mostrar más resultados sobre la reducción del desperdicio como subproducto de la reconstrucción de carreteras.

### 2.5.4.6 Cuantificación de los beneficios ambientales del pavimento asfáltico reciclado

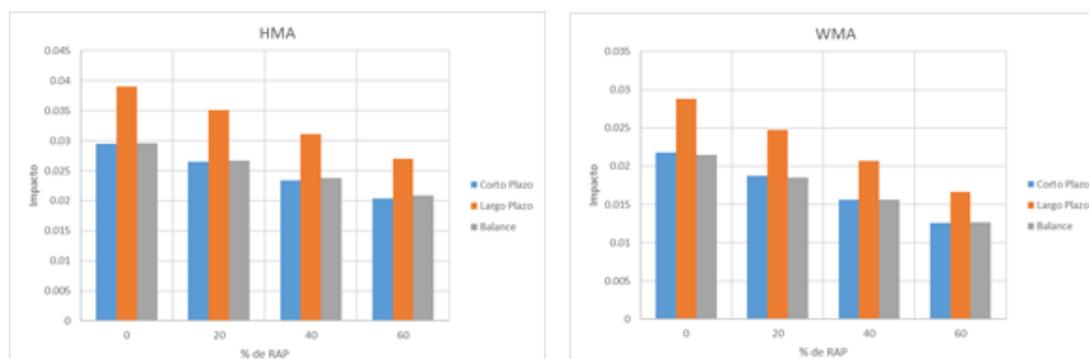
La cuantificación de los impactos generales permite a los tomadores de decisiones contar con herramientas y datos para evaluar los beneficios del RAP. De acuerdo a Blankendaal et al, se pueden construir indicadores para valorar el impacto durante todo el ciclo de vida de un pavimento asfáltico, acorde a distintos factores que respeten la valorización para una visión a corto y largo plazo, así como en un balance entre ambas visiones. Además, se consideró para este tipo de indicadores las mezclas realizadas en caliente (HMA) y tibias (WMA). La tabla 4, muestra las visiones que permiten construir el indicador. En la figura 1 se incluyen dos gráficos que muestran los resultados al comparar el impacto indicado en la matriz.

**Tabla 2. 16 Matriz para la construcción del indicador de impacto del RAP**

Factores	Visión de los efectos a		
	Corto plazo	Largo Plazo	Balance
Calidad del ecosistema	25%	50%	40%
Salud Humana	55%	30%	30%
Recursos	20%	20%	30%

Fuente: Blankendaal et al.

**Figura 2. 8 Comparativa de una HMA y una WMA**

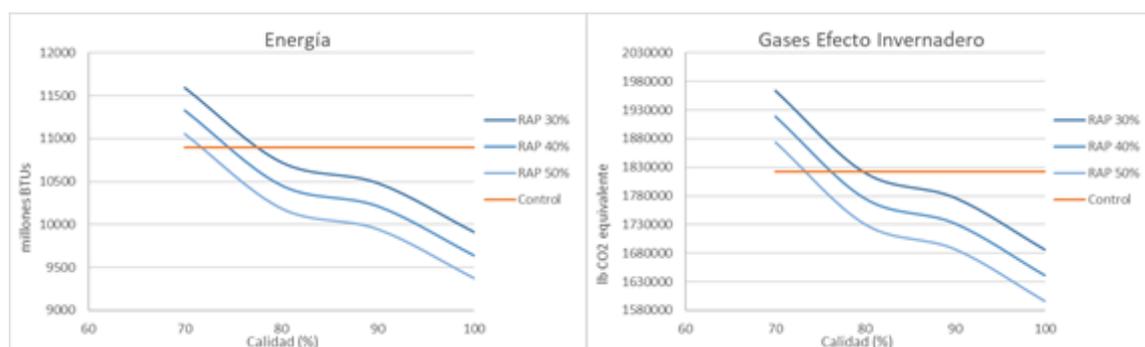


Fuente: Blankendaal et al.

Como se podrá observar en las figuras, el beneficio ambiental es mayor en el largo plazo, pero se puede incrementar si se utilizan mezclas tibias o templadas.

Asimismo, el uso de RAP reduce los impactos en el medio ambiente de manera proporcional ya que, a mayor porcentaje de RAP, menor consumo de energía, combustible y emisión de gases de efecto invernadero en el proceso de construcción. Utilizando los resultados obtenidos de Aurangzeb & Al-Qadi (2014), se obtuvieron gráficos que permiten evaluar los beneficios del consumo de energía y de gases de efecto invernadero con diferentes porcentajes de RAP a largo plazo.

**Figura 2. 9 Cuantificación de los beneficios del RAP**



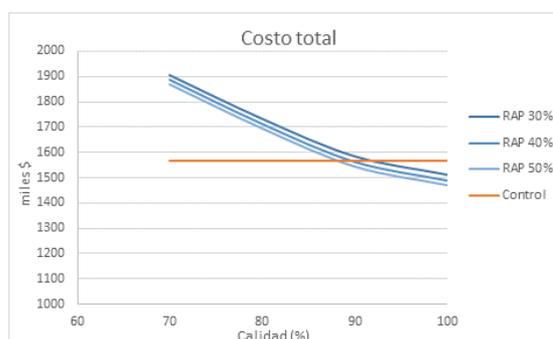
Fuente: Blankendaal et al.

Las gráficas muestran que el uso del RAP, incluso con una calidad del 70%, puede tener un mayor impacto ambiental que una mezcla nueva con agregados vírgenes (representado por la línea naranja Control). Esto debido a que la vida útil sería menor y por tanto demandaría más trabajos de mantenimiento a largo plazo y, la rugosidad de la superficie del pavimento, incrementaría el consumo de combustible de los vehículos en operación.

En relación a los costos Aurangzeb & Al-Qadi (2014), se realizaron estimaciones con calidades y porcentajes distintos de RAP que pueden observarse en la figura 2.10.<sup>9</sup>

<sup>9</sup><https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3141/2084-11>.

**Figura 2. 10 Cuantificación del costo del RAP vs una mezcla virgen**



Fuente: Blankendaal et al.

En la gráfica se puede observar que a mayor porcentaje de material reutilizado, los beneficios en los costos se obtendrán de manera inmediata siempre que se realice de manera adecuada.

En un modelo financiero proyectado a 50 años, se compararon tres posibles métodos de rehabilitación: el método tradicional, el segundo con pavimento reciclado en frío en sitio y el tercero con pavimento reciclado en caliente. Para el primero se consideraron ciclos de rehabilitación cada 18 años mientras que, para el resto, fue cada 15 años. Con esto se puede concluir que, a pesar de requerir menos mantenimiento durante los 50 años, el método tradicional mantuvo un mayor costo en general debido a que genera mayores gastos iniciales que los otros dos métodos, los cuales son principalmente por la compra y traslado de los nuevos materiales.

### 2.5.5 Mezclas asfálticas con RAP

El diseño de mezcla asfáltica consiste en el desarrollo de procedimientos de laboratorio que tienen como propósito determinar (dentro de los límites de las especificaciones de proyecto) una graduación de agregado mineral y un contenido de ligante, que produzcan una mezcla que logre un balance entre todas las propiedades deseadas.

En el diseño de pavimentos es trascendental conocer las propiedades con las que cuentan los materiales que se vayan a utilizar. Es por ello que al desarrollar un diseño de mezcla con RAP y debido a que el mismo se convierte en un agregado más de la mezcla, se vuelve

necesario la caracterización del RAP (agregado) y de esta forma elaborar un diseño capaz de soportar el nivel de tráfico y las condiciones para las que fue diseñado.

Una de las principales preocupaciones en cuanto al uso del RAP es la variabilidad de los materiales que posee, esto porque una muestra de RAP puede incluir pavimentos de proyectos distintos y de estos: el pavimento original, sellos, parches entre otras obras de mantenimiento, así como parte de capas intermedias del pavimento. A esta variabilidad se debe de prestar atención, ya que, si implica parámetros como gradación o contenido de asfalto, la mezcla asfáltica resultante podría ser variable, lo que vuelve más complejo el cumplimiento de especificaciones.

Sin embargo, la investigación ha demostrado que dicha variabilidad puede ser controlada. Por ejemplo, procesar el RAP por medio de trituración o cribado ayuda a reducir la variabilidad. También se pueden extraer núcleos en la calzada para determinar las propiedades que posee el pavimento que se desea remover antes de ser utilizado como RAP.

#### **2.5.5.1 Propiedades del agregado extraído del RAP**

El agregado recuperado después de determinar el contenido de asfalto debe ser analizado para determinar su gradación y algunas de sus propiedades físicas. El agregado debe ser secado en un horno y enfriado por completo antes de su uso.

Debido a que luego de la extracción del asfalto pueden cambiar las propiedades del agregado y también la cantidad del material, provocando cambios a su vez en la gravedad específica bruta, se recomiendan dos aproximaciones: la primera es utilizar la gravedad específica efectiva del agregado extraído y con ello obtener la gravedad específica del conjunto y la segunda es calcular la gravedad específica bruta del agregado extraído, tomando en cuenta un valor de absorción para el mismo y así determinar una gravedad específica para el conjunto.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup>Murillo Rodriguez, M. (2016). Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas con Rap. Costa Rica.

## **2.6 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, MÉTODO MARSHALL**

### **2.6.1 Metodología**

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

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

El método Marshall sólo establece requisitos para la granulometría y los parámetros volumétricos de la mezcla. Los requisitos de calidad del agregado y del asfalto los fijan las dependencias encargadas del desarrollo de la infraestructura.<sup>11</sup>

### **2.6.2 Propósito de la metodología**

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

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25,00 mm (1 plg) o menor. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

### **2.6.3 Descripción general**

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64,00 mm (2,50 plg) de espesor por 102,00 mm (4 plg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada

---

<sup>11</sup> Garnica Anguas, P., y Delgado Alamilla, H. (2004). Aspectos de Diseños Volumétrico de Mezclas Asfálticas. Publicación técnica N°246 .Sanfandilla.

usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica. Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

### **2.6.3.1 Preparación para efectuar los procedimientos Marshall**

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

### **2.6.3.2 Selección de las muestras de material**

La primera preparación para los ensayos consiste en reunir muestras de asfalto y del agregado que van a ser utilizados en la mezcla asfáltica. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple, los datos de los procedimientos de diseño de la mezcla determinan la "receta" para la elaboración de la mezcla final usada en el proceso de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en laboratorio tienen características idénticas a los usados en el producto final.

### **2.6.3.3 Preparación del agregado**

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va ser usado debe ser ya conocida con el propósito de establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar claramente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico y efectuar un análisis granulométrico, con la finalidad de preparar una serie de briquetas que tengan diferentes contenidos de asfalto.

Se prepara una dosificación por el método de tanteo, en función de una faja de trabajo que se adecúe al proyecto, y de una granulometría conocida de los agregados disponibles (grava de 3/4", gravilla de 3/8", arena natural y filler).

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

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

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

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

#### **2.6.3.4 Preparación de las muestras de ensayo (briquetas)**

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

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan por separado y se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén recubiertas (esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta).
- La mezcla se vierte en los moldes pre-calentados, luego se procede a la compactación con el martillo, el número de golpes se especifica en la tabla 2.18.

Después de completar la compactación, las briquetas se dejan enfriar para luego proceder a su extracción de los moldes.

#### 2.6.4 Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de cemento asfáltico depende de muchos criterios. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4 %. El rango de vacíos de aire es de 3 % al 5 %. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas Tabla 2.19. Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

#### 2.6.5 Granulometría

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. En la siguiente tabla presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la norma AASHTO.

**Tabla 2.17 Granulometrías que deben cumplir los agregados para el diseño Marshall**

Granulometría para el diseño Marshall						
Malla en Pulg	Porcentaje por peso que pasa por la malla estándar (AASHTO T 27 Y AASHTO T 11)					
	A	B	C	D	E	F
1 ½"	100					
1"	97 a 100	100	100			
¾"	66 a 80 (5)	97 a 100	97 a 100	100	100	
½"	-	76 a 88	76 a 88 (±5)	97 a 100	97 a 100	
3/8"	53 a 70	-		-	(±5)	100
N° 4	40 a 52	49 a 59	49 a 59 (±7)	57 a 69	(±6)	37 a 47
N° 8	-	-	36 a 45 (±5)	-	-	-
N° 16	25 a 39	36 a 45	(±5)	41 a 49	(±5)	7 a 13
N° 30	12 a 22	20 a 28	(±4)	22 a 30	(±4)	-
N° 40	8 a 16	13 a 21	14 a 22 (±3)	13 a 21	(±3)	-
N° 100	-	-		-	-	-
N° 200	3 a 8	3 a 7	3 a 7	3 a 8	3 a 8	2 a 4

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 442

### 2.6.6 Golpes de compactación

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

**Tabla 2.18 Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo**

Número de golpes			
Condición de tránsito que resultan en un diseño (millones)	Alto	Medio	Bajo
	> 10 hasta 30	Entre 0,30 hasta 30,00	< 0,30
Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo	75,00	50,00	35,00

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 414

### 2.6.7 Parámetros volumétricos de diseño Marshall

La volumetría de la mezcla para encontrar el contenido de asfalto óptimo debe cumplir los parámetros establecidos en las tablas 2.18 y 2.19. El flujo y estabilidad Marshall se tienen que medir de acuerdo con el método AASHTO T 245.

**Tabla 2.19 Requisitos para la mezcla asfáltica Marshall (AASHTO T 2459)**

Criterios para mezclas método Marshall	Tránsito liviano Carpeta y base		Tránsito mediano Carpeta y base		Tránsito pesado Carpeta y base	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35,00	35,00	50,00	50,00	75,00	75,00
Estabilidad N (lb)	336,00 (750,00)	-	5358,00 (1200,00)	-	8006,00 (1800,00)	-
Flujo, 0,25 mm (0,01 plg)	8,00	18,00	8,00	16,00	8,00	14,00
% de vacíos	3,00	5,00	3,00	5,00	3,00	5,00
% VMA	Ver tabla 2.13					
% VFA	70,00	80,00	65,00	78,00	65,00	75,00

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 414

**Tabla 2.20 Porcentajes mínimos de vacíos en el agregado mineral (VMA)**

Tamaño máximo en mm		VMA mínimo, por ciento		
		Vacíos de diseño, por ciento		
mm	plg	3,00	4,00	5,00
1,18	N° 16	21,50	22,50	23,50
2,36	N° 8	19,00	20,00	21,00
GENERALIDAD ES	GENERALIDAD ES	GENERALIDAD ES	GENERALIDAD ES	GENERALIDAD ES
9,50	3/8	14,00	15,00	16,00
12,50	1/2	13,00	14,00	15,00
19,00	3/4	12,00	13,00	14,00
25,00	1.00	11,00	12,00	13,00
37,50	1,50	10,00	11,00	12,00
50,00	2,00	9,50	10,50	11,50
63,00	2,50	9,00	10,00	11,00

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 415

### 2.6.8 Ensayos realizados a la mezcla asfáltica compactada

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

#### 2.6.8.1 Determinación de la gravedad específica bulk

El ensayo de gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas, utilizando especímenes saturados superficialmente secos puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado. Este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma AASHTO T 166-05, para la gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas usando especímenes cubiertos con parafina la norma AASHTO T 275 es aplicada. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2 %, se utiliza la norma AASHTO T 166-05, en caso contrario, se recurre a la norma AASHTO T 275.

#### 2.6.8.2 Ensayo de estabilidad y flujo

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

Las briquetas confeccionadas con cemento asfáltico se deben sumergir en un baño María a  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1,8\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Remueva el espécimen de ensayo del baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y

centrándolo en la mordaza inferior, se procede a colocar la mordaza superior y se centra completamente en el aparato de carga. Posteriormente, se aplica la carga de prueba al espécimen a una velocidad constante de  $50 \pm 1$  mm/min (2 plg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen debe registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que el ensayo de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía; y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0,25 mm (1/100") será el valor del flujo Marshall. El procedimiento completo de estabilidad y fluencia, comenzando desde el momento en que se retira la probeta del agua, no debe durar más de 30 segundos.

### **2.6.8.3 Análisis de densidad y vacíos**

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos ( $V_a$ ); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup>Cortez García, J. (2007). Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente. Universidad de El Salvador.

## **I. MARCO REFERENCIAL**

El presente trabajo corresponde al tipo de investigación experimental, a un nivel de investigación descriptiva, mediante el ensayo de Marshall donde se observan los resultados en su contexto natural para después analizarlos, se diagnostica el estado del comportamiento mecánico y la influencia de la compactación en las mezclas en caliente con RAP.

A continuación se citan trabajos de investigación los cuales son consecuentes con el proyecto realizado.

\* Buitrago Zarabanda, J. F. (2016), “Caracterización del Rap e identificación de su influencia en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente” en Bogotá D.C., donde el objetivo es realizar una caracterización del RAP e identificar la influencia de la heterogeneidad del material en el comportamiento mecánico de las mezclas en caliente, donde el RAP es un material que día a día es más usado en mezclas asfálticas nuevas teniendo en cuenta que no se conoce a ciencia cierta las propiedades de este, actualmente se carece de estudios que profundicen en las propiedades y características de este material.

En esta investigación se realiza la caracterización del RAP encontrado en la ciudad de Bogotá D.C., se identifican sus propiedades y se establece las principales variaciones que se presenta entre diferentes muestras. Posteriormente se identifica la influencia del contenido presente en el material reciclado, en una mezcla asfáltica nueva en caliente con diferentes porcentajes de adición del mismo, por el método Marshall. Finalmente se evaluó su comportamiento en comparación con la mezcla óptima.

La caracterización realizada muestra un alto grado de heterogeneidad en el RAP y una influencia del contenido de asfalto, donde con contenidos de asfalto en el RAP cercanos al promedio obtenido en la caracterización realizada al RAP (6.74%) se cumplen todos los requisitos y se presentan las mejores condiciones mecánicas.

En conclusión los resultados obtenidos en este trabajo de investigación sirven como guía para que basados en determinadas propiedades del RAP, se puedan elegir las proporciones adecuadas de materiales nuevos y de reciclado, con el fin obtener mezclas resultantes con buenos comportamientos mecánicos y que cumplan con los requisitos de la norma INVIAS.

\* Chacón Oviedo, D. (2013), “Influencia de la Energía de Compactación y Granulometría del Agregado en el Desempeño de Mezclas Asfálticas para Pavimentos de Bajo Tránsito Mediante el uso de Marshall” en Costa Rica, donde el objetivo es evaluar el efecto de la energía de compactación, la granulometría y el tamaño máximo del agregado en la dosificación de asfalto requerido para mezclas asfálticas en caliente diseñadas para alto y bajo volumen de tránsito, por medio de su influencia en la susceptibilidad al fisuramiento, la deformación permanente y la trabajabilidad, con el fin de determinar los mejores criterios de diseño para pavimentos de bajo tránsito.

Debido a la importancia de las carreteras en la calidad de la vida de las personas y que un alto porcentaje de la red vial nacional puede considerarse de bajo o medio tránsito, es necesario definir la influencia que tienen las variables en el diseño de mezclas asfálticas en caliente en el desempeño final del producto. En el presente trabajo, se determinaron experimentalmente las variaciones en el comportamiento de la mezcla asfáltica mediante pruebas con la metodología Marshall. Estos diseños abarcan dos tamaños máximos nominales del agregado, granulometrías gruesas y finas para cada tamaño y energías de compactación especificadas por las normativas nacionales para alto y medio-bajo tránsito.

Finalmente se determinó que el asfalto efectivo y el esqueleto granular de la mezcla, definen en gran parte el desempeño final de la mezcla y que este comportamiento se puede optimizar dependiendo de los requerimientos específicos de cada diseño, mediante la manipulación de las variables y el conocimiento teórico de su influencia en el comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente.

\* Murillo Rodríguez M. (2016), “Evaluación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfálticas densas con Rap”, en Costa Rica, donde el objetivo es evaluar las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas con diversos contenidos de material reciclado, con el propósito de generar un criterio para la implementación del uso de pavimentos reciclados en Costa Rica, lo cual el RAP, está compuesto por una serie de materiales del pavimento que fueron removidos por diferentes motivos como la rehabilitación, reconstrucción o recarpeteo de vías existentes y fueron debidamente procesados para su reutilización en nuevas mezclas asfálticas.

Con la presente investigación se evaluaron las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas con contenidos de RAP de 15%, 22,5% y 30% y se compararon con las de una mezcla de control (0% de RAP).

En el trabajo experimental desarrollado comprende el diseño de la mezcla, dónde fue necesario realizar previamente la caracterización de todos los materiales a utilizar, se efectuó la verificación del diseño de mezcla utilizada en el proyecto de daño por humedad del LanammeUCR según la metodología Superpave con un número de giros de diseño de 100.

La caracterización del RAP puede ser variable, esto producto de su combinación con distintos tipos de mezclas asfálticas recuperadas, ya que podría estar compuesto por mezclas de distintos proyectos y zonas, en tiempos diferentes, con distintas vidas de servicio y niveles de deterioro. Por ello las propiedades de cada RAP varían. Las mezclas con mayor contenido de RAP poseen valores mayores de módulo dinámico. Para los contenidos de RAP utilizados no existe susceptibilidad a la acción del agua en ninguna de las mezclas. A mayor contenido de RAP la mezcla es menos resistente al daño por fatiga.

Con este proyecto final de graduación se busca realizar una evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas con diferentes contenidos de RAP, con el fin de comparar los resultados obtenidos para cada porcentaje de RAP utilizado; así como para la condición de referencia donde no se incluye RAP.

\* Ochoa, L. (2019), “Influencia de la compactación en el desempeño mecánico de mezclas asfálticas con Rap”, en Santiago de Querétaro México, donde tiene como objetivo ampliar la vida útil de las mezclas asfálticas en caliente elaboradas con RAP, a partir de establecer en el diseño volumétrico la energía de compactación adecuada que permita en conjunto con la dosificación apropiada de un aditivo rejuvenecedor incrementar el diseño mecánico, logrando así, un equilibrio entre rigidez y flexibilidad.

El uso de RAP en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente ha demostrado ser una alternativa exitosa para obtener importantes beneficios económicos y ambientales. Sin embargo la falta de una metodología bien definida para incorporar este material en el diseño volumétrico no ha permitido que la utilización de RAP sea una práctica habitual. Por ello

que en el presente trabajo se analiza la influencia de la compactación en la determinación del contenido de asfalto que permitiera a la mezcla reciclada alcanzar índices de flexibilidad. Se evaluaron tres porcentajes de RAP, (15, 30 y 45%) aplicando cada uno de ellos tres energías de compactación diferentes (75, 100 y 125 giros superpave). Además para cada tasa de RAP fijada en la mezcla una dosis particular de rejuvenecedor. Mediante la aplicación de 75 giros en combinación con la incorporación de rejuvenecedor fue posible diseñar mezcla recicladas de alta calidad con hasta 45% de RAP, exhibiendo esta última en un mejor desempeño en comparación con una mezcla virgen. Por otro lado, 125 giros fue la energía de compactación adecuada para la mezcla diseñada con 15% de RAP.

## **II. MARCO NORMATIVO**

Considerar la norma AASHTO (American Association of State Highways and Transportation Officials), para la guía del procedimiento se tomará en cuenta los manuales denominados “Manual de Diseño de Conservación Vial - Volumen V”, “Manual de Ensayos y Materiales de suelos - Volumen IV” y “Manual de Especificaciones Técnicas Generales de Construcción - Volumen VII ” de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras). Como también “Guía Basica de Diseño, Control de Producción y Colocación de Mezclas Asfálticas en Caliente - Universidad de el Salvador”, y “Normas y Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá-Colombia” del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Todos los ensayos de caracterización de materiales empleados en el diseño de la mezcla deben cumplir ciertas especificaciones, y son las siguientes:

- Granulometría (AASHTO T-27); (ASTM C-1236)
- Desgaste de los Ángeles (AASHTO T-96); (ASTM C-131)
- Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (AASHTO T-85); (ASTM C-127)
- Peso específico y absorción de agua del agregado fino (AASHTO T-84); (ASTM C-128)
- Peso unitario de los agregados (AASHTO T-19); (ASTM C-29)
- Equivalente de arena (AASHTO T-176); (ASTM D-2419)

- Ensayo del porcentaje de caras fracturadas de los agregados (ASTM D-5821)
- Método para determinar el contenido de ligante de mezcla asfáltica por centrifugación-ensayo de extracción (AASHTO T-164)
- Granulometría RAP (AASHTO T-27); (ASTM C-1236)
- Ensayo de penetración (AASHTO T49-97) (ASTM D-5)
- Ensayo de punto de inflamación (AASHTO T-48); (ASTM D-92)
- Ensayo de peso específico del asfalto (AASHTO T-43); (ASTM D-70)
- Ensayo punto de ablandamiento (AASHTO T-53); (ASTM D-36)
- Ensayo ductilidad (AASHTO T51-00); (ASTM D-113)

Para el diseño de las mezclas asfálticas por el método Marshall se empleo las especificaciones de la norma AASHTO.

### CAPÍTULO III

## INFLUENCIA DE LA COMPACTACIÓN EN EL DESEMPEÑO MECANICO DE MEZCLAS EN CALIENTE CON RAP

Este capítulo describe el proceso para realizar el reciclado en diferentes porcentajes de RAP y la influencia de la compactación en el diseño de carpetas asfálticas, donde no existe en la actualidad un método mundialmente aceptado y estandarizado para diseñar mezclas recicladas en caliente cuando se utilizan mezclas en caliente como aditivo reciclador, pero actualmente es una alternativa de rehabilitación altamente conveniente donde se expondrá los beneficios que se obtienen al aplicar este proceso, y los principales factores que afectan la viabilidad del reciclado en caliente en un proyecto específico.

### 3.1 SELECCIÓN DE MATERIAL A UTILIZAR

#### 3.1.1 Pavimento asfáltico reciclado (RAP)

El pavimento asfáltico reciclado a emplear para este proyecto de investigación es un material reciclado de carpeta asfáltica deterioradas o que cumplieron con su vida útil, encontrados en yacimientos de pavimentos asfáltico reciclado en el Departamento de Tarija, la localidad de Canaletas entre las progresivas 29+480 y 28+450.

#### Muestra

Para la obtención de la carpeta asfáltica a reciclar de la muestra, ubicada en Entre Ríos – Canaletas perteneciente a la red fundamental, se procedió a levantar la muestra de RAP para la investigación.

**Figura 3.1 Ubicación de la muestra**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.2 Extracción de la muestra Entre Ríos – Canaletas**

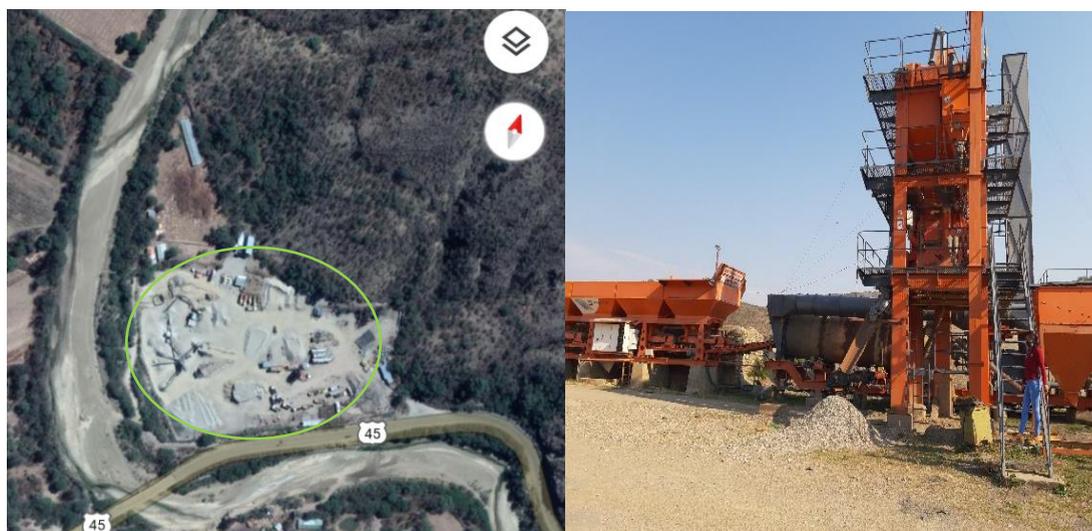


Fuente: Elaboración propia

### **3.1.2 Criterios de selección del banco de materiales**

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales ubicados en diferentes ríos de esta zona los cuales proporcionan seguridad para el diseño que se realice, para el presente proyecto de investigación se utilizara los agregados de la chancadora de Charaja la cual provee áridos a SEDECA, la misma cuenta con una gran cantidad de áridos que cumple con las especificaciones propuestas por las normas ASTM y AASHTO.

**Figura 3.3 Zona de muestreo chancadora de (Charaja)**



Fuente: Elaboración propia

La planta de acopio de agregados de la chancadora de Charaja se encuentra ubicada en el Km 45 carretera a Uriondo - Chaguaya, en la comunidad de San José de Charajá de la provincia Arce.

**Figura 3.4 Agregado pétreo de la planta**



Fuente: Elaboración propia

### **3.1.3 Criterios de selección de asfalto**

El cemento asfáltico que se utiliza para los ensayos es el convencional 85-100 BETUNEL de Industria Brasileira, que cumple con las especificaciones propuestas por las normas ASTM y AASHTO. Es un producto de buena calidad que actualmente es usado por el Servicios Departamental de Caminos (SEDECA) en los diferentes proyectos que se ejecutan en nuestro departamento.

**Figura 3.5 Cemento asfáltico 85-100**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 1 Especificación técnica del cemento asfáltico convencional Betunel 85-100**

<b>Especificaciones técnicas formulario c-1 (llenado por la entidad)-ensayos de verificación de calidad de material solicitando (ensayos AASHTO)</b>	<b>Límites</b>	<b>Método</b>	<b>Encontradas</b>
Penetración a 25 °C, 100 gr, 0,1 mm (T-201)	85 a 100	NBR-6576/ASTM D5/AASHTO T201	91
Viscosidad Saybolt furol a 135 °C seg (T-72)	85 min	NBR-14950/ASTM D88/AASHTO T72	120
Ensayo de mancha 20 % heptaxilol (T-102)	Negativo	ASTM D2770/AASHTO T102	Negativo
Punto de ablandamiento °C (T-53)	43 a 46	NBR-6560/ASTM D36/AASHTO T53	45
Ductilidad a 25 °C 5 cm/min cm (T-51)	100 min	NBR-6293/ASTM D113/AASHTO T51	> 100
Viscosidad Brookfield a 135 °C	214 min	NBR-15184/ASTM D4402/AASHTO T316	290
Viscosidad Brookfield a 150 °C	97 min	NBR-15184/ASTM D4402/AASHTO T316	152
Viscosidad Brookfield a 177 °C	28 a 114	NBR-15184/ASTM D4402/AASHTO T316	58
Temperatura de mistura °C	Indicativo	Cálculo	141 a147
Temperatura de compactación °C	Indicativo	Cálculo	130 a 136
Índice de penetración de pfeiffer	-1,5 a 0,5	Cálculo/Cálculo	-1,10
Punto de inflamación C.O.C °C (T-48)	230 min	NBR-11341/ASTM D92/AASHTO T48	235
Solubilidad en tricloroetileno (T-44)	99 min	NBR-14855/ASTM D2042/AASHTO T44	99,9
Densidad a 25 °C C/25 °C (T-228)	0,99 min	NBR-6296/AASHTO T228	1,012

Ensayos sobre el residuo película delgada (TFOT) 32 mn, 163 °C (AASHTO T240)

(R) TFOT-Pérdida de masa (T-240)	1 max	NBR-15235/ASTM D2872/AASHTO T240	0,41
(R) TFOT-Penetración del residuo % de la penetración	50 min	Cálculo	55,00
(R) TFOT-Perdida por calentamiento (t-179) %	1 max	Cálculo/AASHTOT-179	0,42
Densidad a 25 °C c/25 °C (T-228)	1 a 1,05	NBR-6296/AASHTO T228	1

Fuente: Especificaciones técnicas del fabricante

## **3.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS**

Los agregados pétreos a utilizar en la investigación, provienen de la planta chancadora de Charaja ubicada en la comunidad de Charajas.

Todos los ensayos de materiales empleados en los diseños de mezclas asfálticas se realizarán de acuerdo al manual técnico para el diseño de carreteras propuesta por la ABC la misma que deben cumplir ciertas especificaciones propuestas por las normas ASTM y AASHTO.

Para la caracterización de los agregados utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas de este proyecto, se utilizó las instalaciones del Laboratorio de Hormigones de la Universidad Autónoma Juan Misael Sarachodonde se realizarán los ensayos de caracterización que se detallan a continuación.

### **3.2.1 Granulometría (AASHTO T-27); (ASTM C-1236)**

Este método de ensayo, permite determinar la distribución cuantitativa y granulación de los tamaños de las partículas de agregado grueso y fino de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente. Este método también se puede aplicar usando mallas de laboratorio de abertura redonda.

Se entiende por granulometría o análisis granulométrico de un agregado todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños; de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregados en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentaje retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de los valores de material (granulometría).

Las mallas de prueba que se usan comúnmente para los proyectos de carreteras son aquellas con abertura de 2½", 2", 1½", 1, ¾", ½, 3/8" de pulgada cuadrada para las fracciones grandes y con N° 4, N° 10, N° 40, N° 80, N° 100 y N° 200 para las fracciones más pequeñas.

A la porción de material agregado que queda retenido en la malla N° 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) se le conoce como agregado fino. El material que pasa por la malla N° 200 se llama fino y corresponde a impurezas, limos y arcillas.

**Figura 3.6 Proceso de tamizado del agregado**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.7 Peso retenido de cada tamiz**



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de este ensayo de granulometría realizado en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad se pueden ver a continuación.

### Granulometría de agregados pétreos de la chancadora (Charaja)

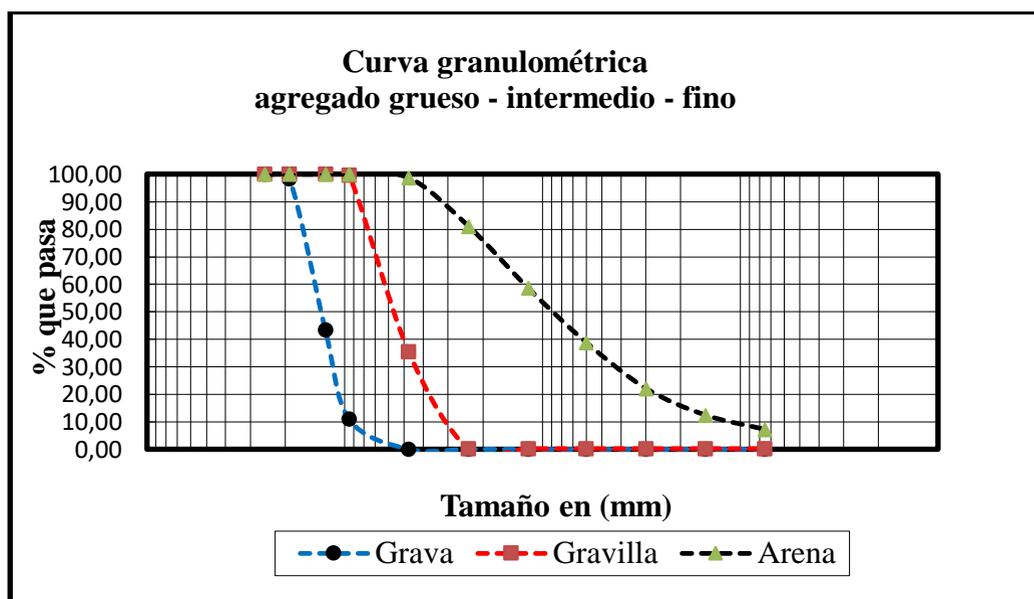
- Ensayo 1

Tabla 3.2 Granulometrías de la grava, gravilla y arena

Peso total seco	5000,00 gr		1000,00 gr		500,00 gr	
Tamiz	Grava (Charaja)		Gravilla (Charaja)		Arena (Charaja)	
Nº	Peso Ret. Acum	% que pasa	Peso Ret. Acum	% que pasa	Peso Ret. Acum	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	83,40	98,33	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	2832,60	43,35	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	4447,30	11,05	2,80	99,72	0,00	100,00
Nº4	4998,10	0,04	644,20	35,58	6,30	98,74
Nº8	4998,10	0,04	997,10	0,29	94,70	81,06
Nº16	4998,10	0,04	997,10	0,29	207,00	58,60
Nº30	4998,10	0,04	997,10	0,29	305,90	38,82
Nº50	4998,10	0,04	997,10	0,29	389,50	22,10
Nº100	4998,10	0,04	997,10	0,29	438,00	12,40
Nº200	4998,10	0,04	997,10	0,29	464,10	7,18

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1 Curva granulométrica de la grava, gravilla y arena



Fuente: Elaboración propia

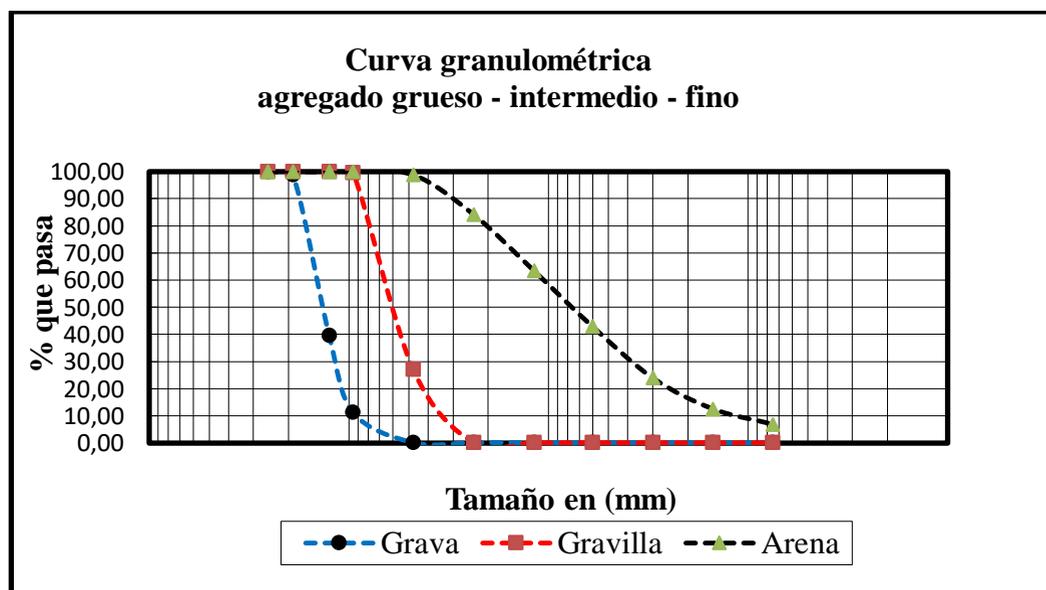
- Ensayo 2

Tabla 3.3 Granulometrías de la grava, gravilla y arena

Peso total seco	5000,00 gr		1000,00 gr		500,00gr	
Tamiz	Grava (Charaja)		Gravilla (Charaja)		Arena (Charaja)	
Nº	Peso Ret. Acum	% que pasa	Peso Ret. Acum	% que pasa	Peso Ret. Acum	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	55,80	98,88	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	3024,50	39,51	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	4437,20	11,26	4,50	99,55	0,00	100,00
Nº4	4995,00	0,10	729,20	27,08	5,70	98,86
Nº8	4995,00	0,10	999,40	0,06	79,30	84,14
Nº16	4995,00	0,10	999,40	0,06	182,70	63,46
Nº30	4995,00	0,10	999,40	0,06	285,90	42,82
Nº50	4995,00	0,10	999,40	0,06	380,50	23,90
Nº100	4995,00	0,10	999,40	0,06	437,60	12,48
Nº200	4995,00	0,10	999,40	0,06	466,00	6,80

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2 Curva granulométrica de la grava, gravilla y arena



Fuente: Elaboración propia

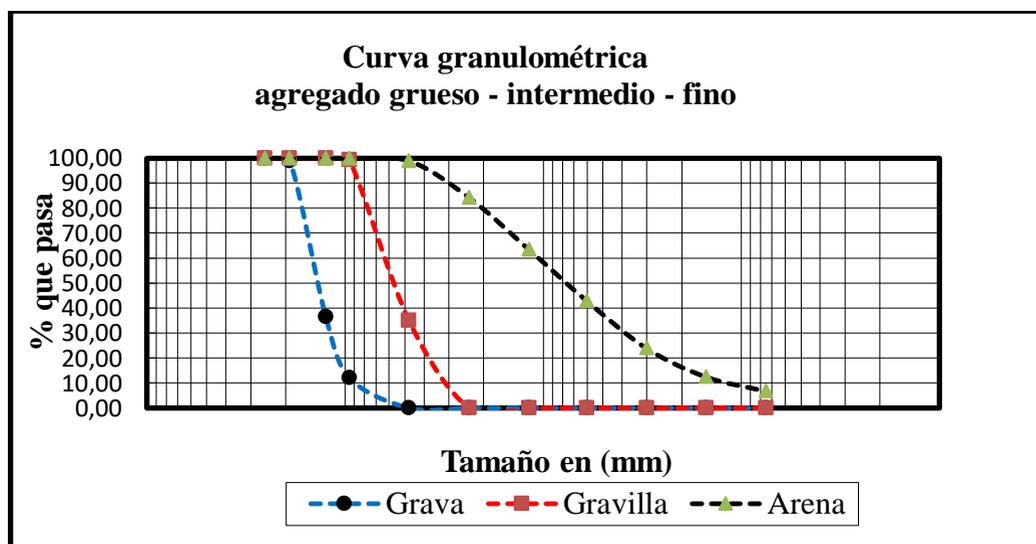
- Ensayo 3

Tabla 3.4 Granulometrías de la grava, gravilla y arena

Peso total seco	5000,00 gr		1000,00 gr		500,00 gr	
Tamiz	Grava (Charaja)		Gravilla (Charaja)		Arena (Charaja)	
Nº	Peso Ret. Acum	% que pasa	Peso Ret. Acum	% que pasa	Peso Ret. Acum	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	57,10	98,86	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	3178,00	36,44	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	4396,50	12,07	8,00	99,20	0,00	100,00
Nº4	4997,00	0,06	650,60	34,94	5,70	98,86
Nº8	4997,00	0,06	999,60	0,04	79,30	84,14
Nº16	4997,00	0,06	999,60	0,04	182,70	63,46
Nº30	4997,00	0,06	999,60	0,04	285,90	42,82
Nº50	4997,00	0,06	999,60	0,04	380,50	23,90
Nº100	4997,00	0,06	999,60	0,04	437,60	12,48
Nº200	4997,00	0,06	999,60	0,04	466,00	6,80

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.3 Curva granulométrica de la grava, gravilla y arena



Fuente: Elaboración propia

### **3.2.2 Desgaste de los Ángeles (AASHTO T-96); (ASTM C-131)**

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y de degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras civiles de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento cuando estas son sometidas a los efectos del tráfico vehicular.

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

Por esta razón los agregados que están en la superficie, como son los materiales de base y carpetas asfálticas, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores, sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de cargas del tránsito.

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los Ángeles, ASTM C-131 o AASHTO T-96, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37,50 mm (1 ½”) y agregados gruesos de tamaños mayores de 19,00 mm (¾”), por medio de la máquina de los Ángeles.

La cantidad de material a ensayar y el número de esferas a incluir depende de la granulometría del agregado grueso a continuación se muestra el procedimiento para la realización en los métodos AASHTO T-96 y ASTM C-131.

#### **Ensayo de Desgaste de agregados pétreos (Charaja)**

##### **Para material grueso de ¾”**

En función a la granulometría, se determinó que el material correspondía al Tipo B en base a los resultados que continuo con el procedimiento del ensayo.

**Tabla 3.5 Pesos de agregado grueso y N° de esferas para el desgaste de los Ángeles**

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
<b>Peso Total</b>		<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>
Numero De Esferas		12	11	8	6
N° de Revoluciones		500	500	500	500
Tiempo De Rotación		15	15	15	15

Fuente: Norma AASHTO T-96

**Figura 3.8 Proceso del ensayo de desgaste por medio de la máquina de los Ángeles**



Fuente: Elaboración propia

Finalmente se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la siguiente tabla de agregados pétreos (Charaja).

**Tabla 3.6 Datos del ensayo de desgaste para la grava 3/4"**

<b>Gradación B</b>		
<b>Diámetro</b>		<b>Cantidad de material (gr)</b>
<b>Pasa tamiz</b>	<b>Retenido tamiz</b>	
3/4"	1/2"	2500,00
1/2"	3/8"	2500,00
Peso Total Inicial (gr)		5000,00
Numero de esferas		11,00
N° de revoluciones		500,00
Tiempo de rotación		15,00
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,70mm)		3840,20
Diferencia		1159,80

Fuente: Elaboración propia

#### Cálculos:

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

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1159,80}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 23,20 \%$$

**Tabla 3.7 Resultado de desgaste de los Ángeles**

<b>Gradación</b>	<b>Peso inicial</b>	<b>Peso final</b>	<b>% de desgaste</b>	<b>Especificacion AASHTO</b>
<b>B</b>	5000,00	3840,20	23,20	35% MAX

Fuente: Elaboración propia

#### Para material intermedio

En función a la granulometría, se determinó que el material corresponde al Tipo C en base a estos resultados que continuo en el procedimiento del ensayo.

Finalmente se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla 3.8 Datos del ensayo de desgaste para gravilla 3/8"**

<b>Gradación C</b>		
<b>Diámetro</b>		<b>Cantidad de material (gr)</b>
<b>Pasa tamiz</b>	<b>Retenido tamiz</b>	
3/8"	1/4"	2500,00
1/4"	N°4	2500,00
Peso Total Inicial (gr)		5000,00
Numero de esferas		8,00
N° de revoluciones		500,00
Tiempo de rotación		15,00
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,70mm)		3886.30
Diferencia		1113.70

Fuente: Elaboración propia

**Cálculos:**

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

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1113,70}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 22,27\%$$

**Tabla 3. 9 Resultado de desgaste de los Ángeles**

<b>Gradación</b>	<b>Peso inicial</b>	<b>Peso final</b>	<b>% de desgaste</b>	<b>Especificacion AASHTO</b>
<b>B</b>	5000,00	3886,30	22,27	35% MAX

Fuente: Elaboración propia

En función a los resultados se establece que son satisfactorios y los agregados son aptos para la elaboración de la mezcla asfáltica según especificaciones como se observan en los resultados.

### 3.2.3 Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (AASHTO T-85); (ASTM C-127)

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. Se define como la relación del peso al aire de un volumen unitario de un material permeable a una temperatura establecida. 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 – 110 °C. Después se la sumerge en agua y se la seca, además se secan las partículas redondas sobre un paño, a continuación se determina el peso de la muestra en el estado de saturación con superficie seca (S.S.S.).

Posteriormente, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se especifica su peso sumergida en el agua, a una temperatura ambiente de 25 °C.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-85 y ASTM C-127.

**Figura 3.9 Muestra saturada durante 24 hs.**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.10 Muestra colocada en la canastilla**

Fuente: Elaboración propia

### Ensayo de peso específico y absorción de agua a los agregados pétreos (Charaja)

**Tabla 3.10 Datos y resultados del ensayo de peso específico para agregado grueso**

Determinación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
A (Peso en el aire de la muestra seca)	4950,80	4931,50	4929,40	
B (Peso en el aire muestra saturada-superficie seca)	5000,00	5000,00	5000,00	
Peso canastillo + muestra sumergida en agua	3120,00	3209,90	3211,20	
Peso canastillo sumergido en agua	0,00	0,00	0,00	
C (Peso sumergido en agua de la muestra saturada)	3120,00	3209,90	3211,20	
D = B - C	1880,00	1790,10	1788,80	
E = A - C	1830,80	1721,60	1718,20	
F = B - A	49,20	68,50	70,60	
Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	2,70	2,86	2,87	
Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	2,63	2,75	2,76	<b>2,71</b>
Peso específico saturado y superficie seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,79	2,80	<b>2,75</b>
(%) Porcentaje de absorción	0,99	1,39	1,43	<b>1,27</b>

Fuente: Elaboración propia

**Muestra 1****Cálculos:**

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

$$\text{Peso específico aparente} = 2,70 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Peso específico a granel} = 2,63 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico saturado y superficie seca} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Peso específico saturado y superficie seca} = 2,66 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\% \text{ de absorción} = 0,99\%$$

**Tabla 3.11 Datos y resultados del ensayo de peso específico para agregado intermedio**

Muestra N°	Peso muestra Seca "A" (gr)	Peso muestra Saturada con sup. Seca "B" (gr)	Peso muestra Saturada dentro del agua "C" (gr)	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> )	Absorción (%)
1	4918,30	5000,00	3102,50	2,59	2,64	2,71	1,66
2	4917,90	5000,00	3109,00	2,60	2,64	2,72	1,67
3	4920,00	5000,00	3227,00	2,77	2,82	2,91	1,63
<b>PROMEDIO</b>				<b>2,66</b>	<b>2,70</b>	<b>2,78</b>	<b>1,65</b>

Fuente: Elaboración propia

Se realizó tres veces el ensayo para el agregado grueso e intermedio y se sacó un promedio para determinar el que se utilizará.

### 3.2.4 Peso específico y absorción de agua del agregado fino (AASHTO T-84); (ASTM C-128)

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente y del específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un período de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

El peso específico aparente es la relación entre el peso del agua correspondiente a su volumen aparente; este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos finos.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-84 y ASTM C-128.

**Figura 3.11 Muestra saturada por 24hs. y verificación de la condición de saturación**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.12 Muestra colocada con agua en el matraz y pesada**



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.13 Muestra sacada del matraz



Fuente: Elaboración propia

## Ensayo de peso específico y absorción de agua de los agregados pétreos (Charaja)

Tabla 3.12 Datos y resultados del ensayo de peso específico del agregado fino

Determinación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Matraz	1,00	2,00	3,00	
Temperatura	25,00	25,00	25,00	
Peso de la muestra (gr)	500,00	500,00	500,00	
Peso del matraz (gr)	200,90	196,00	197,2	
Peso del matraz + agua + muestra(gr)	1006,30	989,5	998,30	
W (Peso del agua agregado al matraz)	311,60	310,10	313,50	
A (Peso de la muestra secada al horno)	492,20	490,10	494,20	
V (Volumen del matraz)	500,00	500,00	500,00	
P. E. a Granel ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,61	2,58	2,65	
P. E. Saturado con sup. seca ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,65	2,63	2,68	<b>2,66</b>
P. E. Aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,73	2,72	2,73	<b>2,73</b>
(%) Porcentaje de absorción	1,58	2,02	1,17	1,59
				<b>2,40</b>

Fuente: Elaboración propia

**Muestra 1****Cálculos:**

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{V - W}$$

$$\text{Peso específico a granel} = 2,61 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico saturado y sup. seca} = \frac{500}{V - W}$$

$$\text{Peso específico saturado y sup. seca} = 2,65 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,73 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{500 - A}{A} \times 100$$

$$\% \text{ de absorción} = 1,58\%$$

Se realizó tres veces el ensayo para el agregado fino y se sacó un promedio para determinar el que se utilizará.

**3.2.5 Peso unitario de los agregados (AASHTO T-19); (ASTM C-29)**

Este método de ensayo cubre la determinación del peso unitario de unos áridos dados que puede determinar como el volumen suelto o sobre volumen compactado. Para ello, se emplea un recipiente cilíndrico de volumen conocido.

Los volúmenes empleados son normalmente 0,10 – 0,50 1,00 pies<sup>3</sup> (2,83 -14,16 - 28,31litros), 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 un 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 con una varilla según el tamaño de los áridos en el ensayo. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T19 y ASTM C29.

**Figura 3.14 Llenado y enrasado del recipiente**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.15 Realizando el varillado y registro del peso de la muestra más recipiente**



Fuente: Elaboración propia

**Ensayo de peso unitario de los agregados pétreos (Charaja)**

**Tabla 3.13 Datos y resultados del peso unitario suelto de la grava  $\frac{3}{4}$**

<b>Descripción</b>		<b>Unidad</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Peso unitario suelto</b>	Peso muestra + Recipiente	gr	20240,00	20060,00	20105,00
	Peso del recipiente	gr	5725,00	5725,00	5725,00
	Peso del agregado seco	gr	14515,00	14335,00	14380,00
	Volumen recipiente	cm <sup>3</sup>	9890,00	9890,00	9890,00
	Peso unitario seco	gr/cm <sup>3</sup>	1,47	1,45	1,45
	Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,46</b>		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.14 Datos y resultados del peso unitario compactado de la grava ¾**

Descripción		Unidad	1	2	3
<b>Peso unitario compactado</b>	Peso muestra + Recipiente	gr	20900,00	20775,00	20803,00
	Peso del recipiente	gr	5725,00	5725,00	5725,00
	Peso del agregado seco	gr	15175,00	15040,00	15078,00
	Volumen recipiente	cm <sup>3</sup>	9890,00	9890,00	9890,00
	Peso unitario seco	gr/cm <sup>3</sup>	1,53	1,52	1,52
	Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,53</b>		
Peso unitario de la grava		gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,50</b>		

Fuente: Elaboración propia

### Muestra1

### Cálculos:

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

$$\text{Peso unitario} = \frac{14515,00}{9890,00}$$

$$\text{Peso unitario} = 1,47\text{gr/cm}^3$$

Para los demás ensayos se realizó el mismo procedimiento de cálculo con tres muestras y posteriormente el promedio.

**Tabla 3.15 Datos y resultados del peso unitario suelto de la gravilla 3/8"**

Descripción		Unidad	1	2	3
<b>Peso unitario suelto</b>	Peso muestra + Recipiente	gr	6900,00	6880,00	6883,00
	Peso del recipiente	gr	2610,00	2610,00	2610,00
	Peso del agregado seco	gr	4290,00	4270,00	4273,00
	Volumen recipiente	cm <sup>3</sup>	3010,00	3010,00	3010,00
	Peso unitario seco	gr/cm <sup>3</sup>	1,43	1,42	1,42
	Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,42</b>		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.16 Datos y resultados del peso unitario compactado de la gravilla**

<b>Descripción</b>		<b>Unidad</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Peso unitario compactado</b>	Peso muestra + Recipiente	gr	7210,00	7175,00	7205,00
	Peso del recipiente	gr	2610,00	2610,00	2610,00
	Peso del agregado seco	gr	4600,00	4565,00	4595,00
	Volumen recipiente	cm <sup>3</sup>	3010,00	3010,00	3010,00
	Peso unitario seco	gr/cm <sup>3</sup>	1,53	1,52	1,53
	Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,52</b>		
Peso unitario de la grava		gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,47</b>		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.17 Datos y resultados del peso unitario suelto de la arena**

<b>Descripción</b>		<b>Unidad</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Peso unitario suelto</b>	Peso muestra + Recipiente	gr	7185,00	7240,00	7250,00
	Peso del recipiente	gr	2610,00	2610,00	2610,00
	Peso del agregado seco	gr	4575,00	4630,00	4640,00
	Volumen recipiente	cm <sup>3</sup>	3010,00	3010,00	3010,00
	Peso unitario seco	gr/cm <sup>3</sup>	1,52	1,54	1,54
	Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,53</b>		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.18 Datos y resultados del peso unitario compactado de la arena**

<b>Descripción</b>		<b>Unidad</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Peso unitario compactado</b>	Peso muestra + Recipiente	gr	7625,00	7965,00	8025,00
	Peso del recipiente	gr	2610,00	2610,00	2610,00
	Peso del agregado seco	gr	5015,00	5355,00	5415,00
	Volumen recipiente	cm <sup>3</sup>	3010,00	3010,00	3010,00
	Peso unitario seco	gr/cm <sup>3</sup>	1,67	1,78	1,80
	Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,75</b>		
Peso unitario de la grava		gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,64</b>		

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.6 Equivalente de arena (AASHTO T-176); (ASTM D-2419)

El ensayo de equivalente de arena y agregados finos asigna un valor empírico a la cantidad relativa, figura y características del material fino que está presente en una muestra de ensayo granular que pasa el tamiz N° 4 (4,75 mm). El equivalente de arena es una relación de la altura de arena con respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje. Primeramente, se debe de tener una muestra del material y tamizarlo por el tamiz N° 4, posteriormente colocarlo en un recipiente.

Luego se debe de vaciar la muestra de arena en el cilindro; se vierte 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 minutos.

Posteriormente se coloca el tubo irrigador en la parte superior del cilindro y se lava el material de las paredes del cilindro. Se deja el cilindro y el contenido en reposo por 20 min  $\pm$  15 segundos, se debe medir el tiempo inmediatamente después de retirar el tubo irrigador. Al final los 20 minutos del periodo de sedimentación, se lee y anota los niveles alcanzados.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-176 y ASTM D-2419.

**Figura 3.16 Muestra y colocacion de la solución**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.17 Lectura de las alturas de separación de los finos**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 19 Datos y resultados del ensayo de equivalente de arena**

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,50	12,30	77,24
2	9,30	11,80	78,81
3	9,60	12,00	80,00
<b>Promedio</b>			<b>78,68</b>

Fuente: Elaboración propia

### Muestra 1

#### Cálculos:

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

$$\text{Equivalente de la arena} = \frac{9,50}{12,30} * 100$$

$$\text{Equivalente de la arena} = 77,24 \%$$

El resultado final obtenido del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla asfáltica según las especificaciones se puede observar en la tabla anterior el valor es mayor al 45%.

### 3.2.7 Ensayo del porcentaje de caras fracturadas de los agregados (ASTM D-5821)

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

La muestra para el ensayo debe ser representativa de la granulometría promedio del agregado, y se obtiene mediante un cuidadoso cuarteo del total de la muestra recibida.

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

A continuación, se separa con el borde de la espátula, las partículas que tengan una o más caras fracturadas. Si una partícula de árido redondeada presenta una fractura muy pequeña, no se clasificará como “partícula fracturada”. Una partícula se considera como fracturada cuando un 20 % o más del área de la superficie aparece fracturada. Las fracturas deben ser únicamente las recientes, aquellas que no han sido producidas por la naturaleza, sino por procedimiento mecánicos.

Luego se pesa las partículas fracturadas y se registra este valor.

**Figura 3.18 Ensayo del porcentaje de caras fracturadas de los agregados**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.20 Datos y resultados del ensayo del porcentaje de cara fracturadas**

Tamaño del agregado		Muestra retenida	Material triturado	Material natural	Mat. C/ caras Fract. D (%)	Material natural E (%)
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	A (gr)	B (gr)	C (A-B)		
1"	3/4"	1500,70	1257,70	243,00	83,81	16,19
3/4"	1/2"	1200,10	1021,40	178,70	85,11	14,89
1/2"	3/8"	300,10	234,20	65,90	78,04	21,96
<b>PROMEDIO</b>					<b>82,31</b>	<b>17,68</b>

Fuente: Elaboración propia

Donde:

A= Peso exacto de las porciones de la muestra tomadas para el ensayo.

B= Peso con material con caras fracturadas para cada tamaño.

C= Peso con material natural para cada tamaño.

D= Representa el porcentaje de las caras fracturadas para cada tamaño.

**Calculos:**

$$C=A-B$$

$$C=1500,70-1257,70 = 243,00 \text{ gr}$$

$$D=\frac{B}{A} * 100$$

$$D=\frac{1257,70}{1500,70} * 100 = 83,81 \%$$

### 3.2.8 Resultados del agregado

Se presenta los siguientes resultados, los mismos que son comparados con su respectiva especificación exigida por la norma.

**Tabla 3.21 Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados pétreos y comparación con la Norma**

<b>Ensayo</b>	<b>AASHTO</b>	<b>Agregado</b>	<b>Especificación</b>	<b>Resultado</b>
Desgaste mediante la máquina de los ángeles	T-96	Grava	35 % max	23,20
Desgaste mediante la máquina de los ángeles	T-96	Gravilla	35 % max	22,27
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	T-85	Grava	-	2,81
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	T-85	Gravilla	-	2,78
Peso específico y absorción de agua del agregado fino	T-84	Arena	-	2,73
Peso unitario de los agregados	T-19	Grava	-	1,50
		Gravilla	-	1,47
		Arena	-	1,64
Equivalente de arena	T-176		45 % min	78,68
Porcentaje de caras fracturadas	NTL 358	Grava	75% min	82,31

Fuente: Elaboración propia

### **3.3 CARACTERIZACIÓN DEL RAP**

#### **3.3.1 Antecedentes del RAP utilizado**

El material mencionado como RAP, primariamente se lo encuentra en las inmediaciones de carreteras nacionales, departamentales o municipales, las cuales en cierto momento de su vida util fueron reparadas o reemplazadas por diversos motivos particulares en cada caso, por tanto, al contar con las carpetas asfálticas deterioradas o retiradas en calidad de escombros o residuo de obra, nace la primicia de reemplazar este material para fines académicos y técnicos consecuentes a cuidar el medio ambiente evitando así la contaminación del mismo por residuos distribuidos a lo largo de toda la historia de asfaltado en la región.

Este material en calidad de carpeta asfáltica deteriorada y/o desechada (RAP) debe estar visual y tecnicamente libre de contaminantes que originalmente no formaron parte de la dosificación de la carpeta asfáltica de la cual provienen, dicha contaminación podría ser consecuencia del medio en el cual fueron depositados o incluso el tiempo que les toco permanecer ahí expuestas a los agentes externos de la zona.

Dicho material en calidad de carpeta asfáltica deteriorada y desechada debe ser sometido a un proceso de chancado o triturado dentro de las condiciones mecanicas optimas, para así obtener el pavimento asfáltico reciclado (RAP).

El tramo de Canaletas –Entre Rios de donde se obtuvo el material RAP responde al pavimento que ha sido inicialmente ejecutado en el año 2011 con el cual ya ha tenido una vida útil de mas de 10 años por deterioros que se han producido en el pavimento.

En algunos casos se ha sacado la carpeta por otra carpeta nueva y producto de este material se saco de algunos lugares hemos obtenido una mezcla reciclada.

### **3.3.2 Método para determinar el contenido de ligante de mezcla asfáltica por centrifugación-ensayo de extracción**

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

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

En el arranque va incrementando gradualmente su velocidad hasta 3600 r.p.m.

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

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

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

Una vez secada la muestra se lleva a pesar y así luego restar a la muestra original, obteniéndose de esta manera el peso de cemento asfáltico extraído.

En el procedimiento de cálculo se divide el peso del cemento asfáltico entre el peso del agregado pétreo y multiplicando por 100, nos da el porcentaje del cemento asfáltico que esta presente en la mezcla ensayada.

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

**Figura 3.19 Muestra pesada antes de entrar al horno para que sea manipulable**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.20 Muestra en el horno y luego reposada con el solvente**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.21 Colocado de la muestra en el crisol**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.22 Funcionamiento de la máquina centrifuga**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.23 Resultado de la muestra lavada**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.24 Muestra sacada del horno y sin ligante asfáltico**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.22. Contenido de asfalto Canaletas-Entre Rios**

N° Muestra	Masa seca de la muestra (g) (con ligante asfáltico)	Masa seca de la muestra lavada (g) (sin ligante asfáltico)	% de ligante asfáltico
1	2579,30	2426,20	5,94
2	2890,70	2721,88	5,84
3	3217,8	3024,41	6,01
<b>Promedio</b>			<b>5,94</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3 Análisis granulométrico de áridos provenientes de extracciones.

En este ensayo se realizó el análisis granulométrico para determinar la distribución de tamaños de las partículas del resultado del agregado después del centrífugo.

**Figura 3.25 Material reciclado seco**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.26 Tamizado del material y obtención de pesos retenidos**



Fuente: Elaboración propia

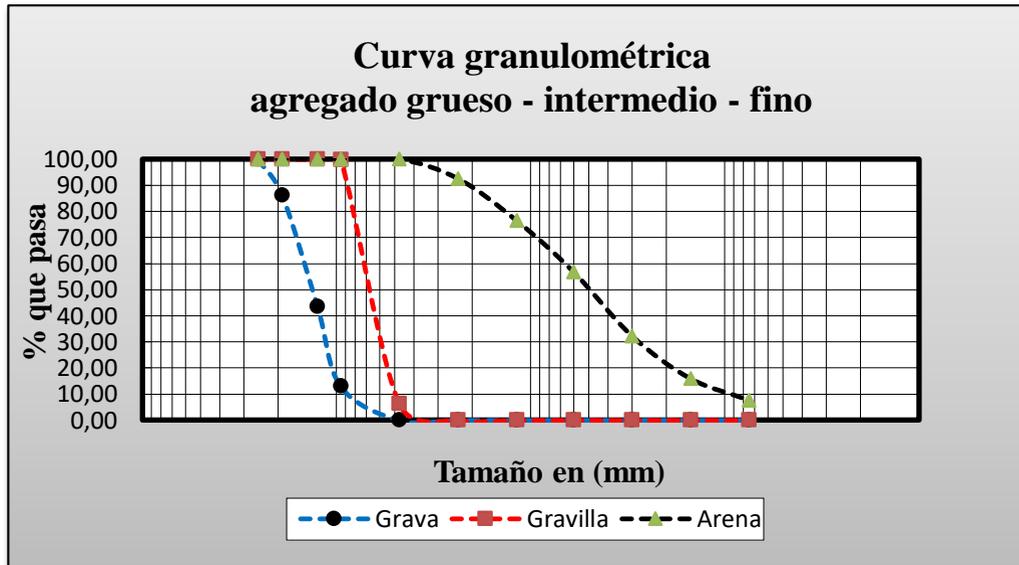
### Resultados del Ensayo

**Tabla 3.23 Curva Granulométrica de la grava, gravilla y grena (reciclado)**

Peso total seco	4645,00 gr		1000,00 gr		500,00 gr	
Tamiz	Grava (Charaja)		Gravilla (Charaja)		Arena (Charaja)	
N°	Peso Ret. Acum	% que pasa	Peso Ret. Acum	% que pasa	Peso Ret. Acum	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	639,60	86,23	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	2621,20	43,57	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	4040,40	13,02	1,40	99,86	0,00	100,00
N°4	4645,00	0,00	935,50	6,45	0,00	100,00
N°8	4645,00	0,00	1000,00	0,00	37,80	92,44
N°16	4645,00	0,00	1000,00	0,00	117,80	76,44
N°30	4645,00	0,00	1000,00	0,00	216,00	56,80
N°50	4645,00	0,00	1000,00	0,00	338,90	32,22
N°100	4645,00	0,00	1000,00	0,00	420,50	15,90
N°200	4645,00	0,00	1000,00	0,00	461,90	7,62

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.4 Curva Granulométrica de la grava, gravilla y arena (reciclado)**



Fuente: Elaboración propia

### 3.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Para realizar el diseño óptimo, se realizó la evaluación y la caracterización del cemento asfáltico 85-100 con los equipos necesarios para realizar los ensayos, los mismos que se llevó a cabo en el Laboratorio de Asfaltos de la Universidad y se detallan a continuación.

#### 3.4.1 Ensayo de penetración (AASHTO T49-97) (ASTM D-5)

La penetración se define como la distancia expresada en décimas 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 lleva a cabo a 25 °C 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 cuanto más blando sea el betún asfáltico, mayor será la cifra que indique su penetración. Los materiales que tienen penetración debajo de los 350 pueden ser probados por el aparato normal. Para los materiales que tienen penetración entre 350 y 500 se debe usar un aparato especial (una aguja más larga).

Primeramente se coloca una muestra a calentar en un recipiente hasta que esté fluido y se lo vierte en los moldes.

Se deja enfriar por una hora a temperatura ambiente y se la coloca en baño María por una hora a 25 °C.

Una vez transcurrido 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 específico.

Finalmente, se lee y anota la distancia expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.

Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el Método AASHTO T49-97 y en el ASTM D-5.

**Figura 3.27 Muestra calentada y vertida en los recipientes de ensayo**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.28 Ensayo de penetración**



Fuente: Elaboración propia

Datos obtenidos del ensayo:

**Tabla 3.24 Datos y resultados del ensayo de penetración**

Descripción		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Penetración a 25 °C, 5seg AASHTO T- 49	Lectura N° 1	0,1 mm	91,00	89,00	94,00
	Lectura N° 2	0,1 mm	87,00	92,00	97,00
	Lectura N° 3	0,1 mm	91,00	95,00	85,00
	Promedio	0,1 mm	89,67	92,00	92,00
<b>Penetración promedio</b>		0,1 mm	<b>91,22</b>		

Fuente: Elaboración propia

### Muestra 1

#### Cálculos:

Promedio de la muestra 1:

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

$$\text{Promedio} = \frac{91,00 + 87,00 + 91,00}{3}$$

$$\text{Promedio} = 89,67 \text{ mm}$$

Promedio de las tres muestras:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Prom1} + \text{Prom2} + \text{Prom3}}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{89,67 + 92,00 + 92,00}{3}$$

$$\text{Promedio} = 91,22 \text{ mm}$$

### 3.4.2 Ensayo de punto de inflamación (AASHTO T-48); (ASTM D-92)

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta.

El punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a que el material ardería. Esta última temperatura se

llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos.

Para este ensayo, se llena la copa con el cemento asfáltico y se aplica calor, inicialmente, de tal manera que se incremente la temperatura; luego se pasa la llama de ensayo a través del centro de la copa. Se registra como punto de inflamación, a temperatura cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie.

Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de punto de inflamación se describen en el Método AASHTO T-48 y en el ASTM D-92.

**Figura 3.29 Punto de inflamación en proceso de ensayo**



Fuente: Elaboración propia

Datos obtenidos:

**Tabla 3.25 Datos del ensayo punto de inflamación**

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	280,00	281,00	278,00
<b>Promedio</b>		<b>280,00</b>		

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

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

$$\text{Promedio} = \frac{280,00 + 281,00 + 278,00}{3}$$

$$\text{Promedio} = 280,00^{\circ}\text{C}$$

### 3.4.3 Ensayo de peso específico del asfalto (AASHTO T-43); (ASTM D-70)

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen de material al peso de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. Como ejemplo, una sustancia con un peso específico de 1,6 pesa 1,6 veces más que el agua.

Hay dos razones las cuales se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando es enfriado. Esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas.

El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos (espacios de aire) de un pavimento compactado.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-43 y ASTM D-70.

**Figura 3.30 Picnómetros con agua destilada manteniendo un baño maría a 25 °C**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.31 Picnómetros con cemento asfáltico y agua destilada**



Fuente: Elaboración propia

Datos obtenidos:

**Tabla 3.26 Datos y resultados de peso específico**

<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 2</b>
Peso picnómetro	gr	33,70	36,70	33,80
Peso picnómetro + agua (25 °C)	gr	84,24	87,84	83,73
Peso picnómetro + muestra	gr	62,50	71,20	62,00
Peso picnómetro + agua + muestra	gr	86,90	87,10	84,40
Peso específico	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1,099</b>	<b>0,976</b>	<b>1,021</b>
<b>Promedio</b>	gr/cm <sup>3</sup>		<b>1,032</b>	

Fuente: Elaboración propia

### **Muestra 1**

Donde:

a = Peso picnómetro

b = Peso del picnómetro más agua

c = Peso del picnómetro más cemento asfáltico

d = Peso del picnómetro, cemento asfáltico y agua

**Cálculos:**

$$\text{Peso específico C.A.} = \frac{(c-a)}{(b+a)+(d-c)} * 0,997077$$

$$\text{Peso específico CA.} = \frac{(62,50\text{gr}-33,70\text{gr})}{(84,24\text{gr}-33,70\text{gr})-(86,90\text{gr}-62,50\text{gr})} * 0,997077$$

$$\text{Peso Esp. del cemento asfáltico} = 1,099 \text{ gr/cm}^3$$

De la misma manera se calcula el peso específico del cemento asfáltico con los datos de los ensayos 2y 3.

Resultado:

El resultado final del peso específico del cemento asfáltico será el promedio de los tres ensayos realizados.

Peso específico del C.A = 1,032 gr/cm<sup>3</sup>

#### **3.4.4 Ensayo punto de ablandamiento (AASHTO T-53); (ASTM D-36)**

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentra en el rango de 30 °C a 200 °C, por medio del aparato de anillo y esfera sumergida en agua destilada.

En general, con materiales de este tipo, el ablandamiento no ocurre a una temperatura definida; a medida que la temperatura aumenta, el material cambia gradual e imperceptiblemente, de un estado quebradizo o excesivamente espeso y de poca fluidez, a líquidos blandos y menos viscosos.

Por esta razón, la determinación del punto de ablandamiento se debe efectuar mediante un método arbitrario, pero bien definido, con el fin de comparar resultados. Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una

velocidad determinada y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se llama punto de ablandamiento del asfalto que se define como la temperatura que necesita el asfalto para alcanzar un determinado estado de fluidez.

Los procedimientos y equipos a utilizar se describen con detalle en los métodos AASHTO T53 y ASTM D36.

**Figura 3.32 Cemento asfáltico en los anillos**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.33 Muestra a baño María**



Fuente: Elaboración propia

Datos:

**Tabla 3.27 Datos del ensayo de punto de ablandamiento**

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de ablandamiento	°C	43,00	44,00	47,00

Fuente: Elaboración propia

### Cálculos:

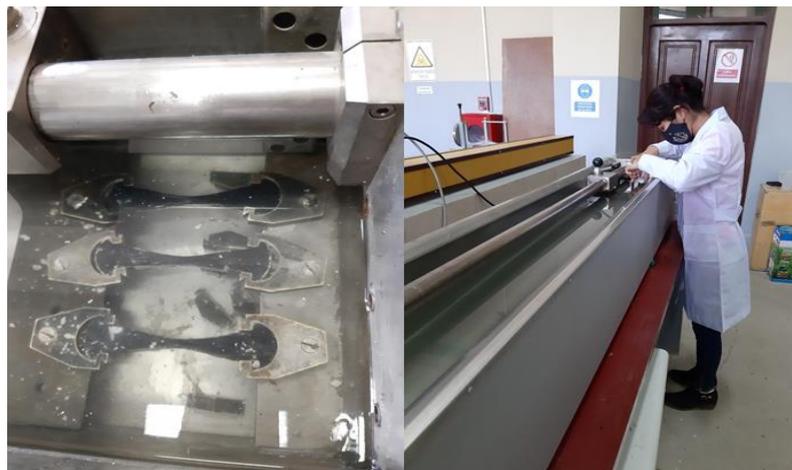
Se realizó un promedio de ambas muestras y se obtuvo como resultado del ensayo 44,67°C.

### 3.4.5 Ensayo ductilidad (AASHTO T51-00); (ASTM D-113)

La ductilidad es una medida en cm, es la longitud de cuanto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida mediante una prueba de "extensión", en donde una probeta de cemento asfáltico es expandida o estirada a una velocidad y una temperatura especificada. Salvo indicación contraria, el ensayo se realizará a una temperatura de  $25\text{ °C} \pm 0,50\text{ °C}$  y a una velocidad de  $5,00\text{ cm/min} \pm 5,00\%$ .

Los procedimientos y equipos a utilizar se describen con detalle en los métodos AASHTO T51 y ASTM D-113.

**Figura 3.34 Ensayo de ductilidad**



Fuente: Elaboración propia

Datos:

**Tabla 3.28 Resultados del ensayo de ductilidad**

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Ductilidad	cm	105,00	95,00	120,00

Fuente: Elaboración propia

**Cálculo:**

Se realizó un promedio de ambas muestras y se obtuvo como resultado 106,67 cm.

**3.4.6 Resultados de los ensayos realizados al cemento asfáltico**

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que siguen las especificaciones propuestas por la norma AASHTO.

**Tabla 3.29 Resultados de los ensayos de caracterización del C.A (85-100)**

Ensayo	Norma	Especificaciones		Resultado
		Mínimo	Máximo	
Peso específico	AASHTO T-43	0,99	-	1,032
Punto de ablandamiento	AASHTO T-53	43,00	46,00	44,67
Punto de inflamación	AASHTO T-48	230,00	-	280,00
Penetración	AASHTO T-49	85,00	100,00	91,22
Ductilidad	AASHTO T-51	100,00	-	106,67

Fuente: Elaboración propia

### 3.5 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO DE MARSHALL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

No existe en la actualidad un método de diseño de reciclado de mezclas asfálticas en caliente, mundialmente aceptado. No obstante, la mayoría de los métodos de diseño de mezclas recicladas que se están aplicando actualmente están basados en el método Marshall, por lo que en esta investigación se buscaba un método que cubra la mayoría de las necesidades y que permitiera diseñar mezclas recicladas.

#### 3.5.1 Granulometría formada de los agregados

A continuación, se presentan los resultados de la granulometría de los agregados para realizar la combinación.

#### Agregados pétreos (Charaja)

**Tabla 3.30 Granulometría de la grava de 3/4"**

Muestra	% que pasa por tamiz										
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°40	N°100	N°200
1	100,00	98,33	43,35	11,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
2	100,00	98,88	39,51	11,26	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
3	100,00	98,86	36,44	12,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
<b>Promedio</b>	100,00	98,69	39,77	11,46	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.31 Granulometría de gravilla de 3/8"**

Muestra	% que pasa por tamiz										
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
1	100,00	100,00	100,00	99,72	35,58	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
2	100,00	100,00	100,00	99,55	27,08	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
3	100,00	100,00	100,00	99,20	34,94	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
<b>Promedio</b>	100,00	100,00	100,00	99,49	32,53	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.32 Granulometría de la arena**

Muestra	% que pasa por tamiz										
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
<b>1</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	98,74	81,06	58,60	38,82	22,10	12,40	7,18
<b>2</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	98,86	84,14	63,46	42,82	23,90	12,48	6,80
<b>3</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	98,86	84,14	63,46	42,82	23,90	12,48	6,80
<b>Promedio</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	98,82	83,11	61,84	41,49	23,30	12,45	6,93

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2 Combinación de los agregados pétreos para el diseño de la mezcla convencional

Con los agregados provenientes de la chancadora de Charajas, se realizó una combinación para lo cual se ha determinado que la faja granulométrica de mezcla es de tipo C de las especificaciones de la norma AASHTO.

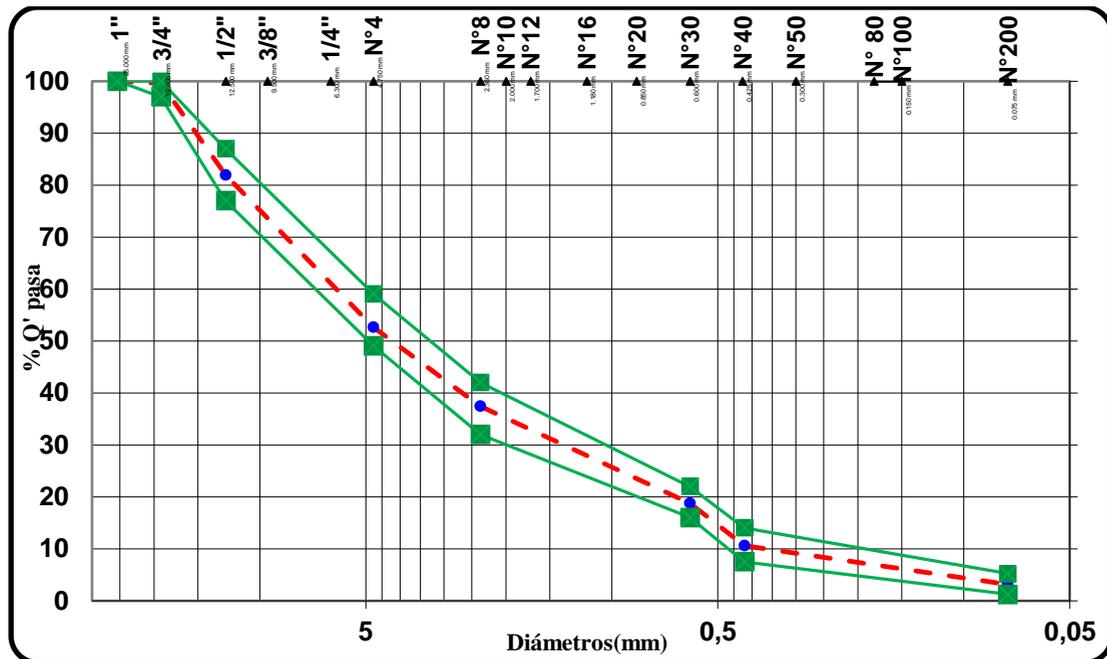
Para el diseño de dicha faja se mezcló los agregados gruesos y finos mediante tanteos, haciendo variar los porcentajes de cada material de manera que la curva granulométrica esté dentro de los parámetros establecidos por las especificaciones.

**Tabla 3.33 Dosificación de agregados pétreos**

Agregado		Grava (Charaja)		Gravilla (Charaja)		Arena (Charaja)		% que pasa	Faja C	
% usado		30%		25%		45%			Especif. Grad.	
Tamices		% total	% enc.	% total	% enc.	% total	% enc.		Inf.	Sup.
Pulg	mm									
<b>1"</b>	25,40	100,00	30,00	100,00	25,00	100,00	45,00	100,00	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>3/4"</b>	19,10	98,69	29,61	100,00	25,00	100,00	45,00	99,61	<b>97</b>	<b>100</b>
<b>1/2"</b>	12,50	39,77	11,93	100,00	25,00	100,00	45,00	81,93	<b>76</b>	<b>88</b>
<b>3/8"</b>	9,50	11,46	3,44	99,49	24,87	100,00	45,00	73,31		
<b>N° 4</b>	4,75	0,07	0,02	32,53	8,13	98,82	44,47	52,62	<b>49</b>	<b>59</b>
<b>N° 8</b>	2,36	0,07	0,02	0,13	0,03	83,11	37,40	37,45	<b>36</b>	<b>45</b>
<b>N° 16</b>	1,18	0,07	0,02	0,13	0,03	61,84	27,83	27,88		
<b>N° 30</b>	0,60	0,07	0,02	0,13	0,03	41,49	19,97	20,02	<b>20</b>	<b>28</b>
<b>N° 40</b>	0,43	0,07	0,02	0,13	0,03	23,30	13,29	13,34	<b>13</b>	<b>21</b>
<b>N° 100</b>	0,15	0,07	0,02	0,13	0,03	12,45	5,60	5,66		
<b>N° 200</b>	0,08	0,07	0,02	0,13	0,03	6,93	3,12	3,17	<b>3</b>	<b>7</b>

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.5 Curva granulométrica de agregados pétreos (Charajas)**



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados de la combinación de agregados, se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 30% de grava de 3/4'', 25% de gravilla de 3/8'' y 45% de arena.

### 3.5.3 Determinación del contenido mínimo de cemento asfáltico basado en la distribución de tamaño de partículas

Para la determinación se hace uso de la siguiente ecuación:

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

Donde:

p= Porcentaje de C.A expresado con respecto al peso del material

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

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

c= Porcentaje que pasa de la malla N° 200

d= Coeficiente asfáltico 0,3 que corresponde a rocas trituradas de absorción mediana de acuerdo a las características del material.

**Calculo:**

$$p = 0,020 * 62,60 + 0,045 * (37,40 - 3,08) + 3,08 * 0,3$$

$$p = 3,80\%$$

De acuerdo al resultado el contenido neto de cemento asfáltico es de 3,80%.

**3.5.4 Dosificación de los especímenes (briquetas)**

Para realizar el diseño de la mezcla asfáltica con C.A (85-100), se determina el contenido óptimo del cemento asfáltico partiendo del contenido mínimo calculado, lo cual se procede a realizar el diseño de 18 briquetas para cada compactación mediante el método de Marshall, con porcentajes diferentes de cemento asfáltico y así conocer el porcentaje óptimo a utilizar.

Peso total de briqueta	1200gr
Porcentaje de grava	30%
Porcentaje de gravilla	25%
Porcentaje de arena	45%

**Tabla 3.34 Peso de los agregados a diferentes porcentajes de cemento asfáltico**

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	3,30%	3,80%	4,30%	4,80%	5,30%	5,80%
Porcentaje de Agregado (%)	96,70%	96,20%	95,70%	95,20%	94,70%	94,20%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	39,60	45,60	51,60	57,60	63,60	69,60
Peso de Grava (gr)	348,12	346,32	344,52	342,72	340,92	339,12
Peso de Gravilla (gr)	290,10	288,60	287,10	285,60	284,10	282,60
Peso de Arena (gr)	522,18	519,48	516,78	514,08	511,38	508,68
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

La tabla mostrada anteriormente muestra las cantidades de agregados y cemento asfáltico con las que se realizará el diseño obteniendo diferentes puntos, y así poder obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico mediante gráficas.

### 3.5.5 Desarrollo de la elaboración de las briquetas mediante el procedimiento de Marshall

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

Luego se prosigue a mezclar los agregados con el cemento asfáltico, y seguidamente se mezcla completamente con una cuchara durante el calentamiento de la mezcla para evitar sobrecalentamientos locales y evitar un envejecimiento prematuro de la mezcla asfáltica.

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

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

Para el diseño de la mezcla, se aplicara a 75,50 y 35 golpes por cada cara de la briketa, proyectadas para vías de tránsito pesado, mediano y liviano.

Se fabricaron 18 briketas para cada diseño haciendo un total de 54 briketas, con las dosificaciones indicadas en la Tabla 3.34. Finalmente, se extraen las probetas compactadas del molde con la ayuda de un gato hidráulico.

**Figura 3.35 Preparación de la dosificación**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.36 Proceso de elaboración de las briquetas**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.37 Se extraen las probetas de sus moldes**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.38 Briquetas finalizadas**



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.6 Ensayo de Marshall

Una vez extraídas las briquetas de los moldes, se procede a dejar reposar para luego realizar el ensayo de flujo y estabilidad en la prensa.

Primero se debe medir con un vernier las alturas en cuatro puntos de cada una de las briqueta y de esta manera determinar su altura promedio que será corregida mediante un factor de corrección.

Después es necesario determinar el peso seco de cada una de las briquetas, en una balanza de gran precisión y así registrando ese valor.

**Figura 3.39 Medición de alturas y determinación del peso seco de las briquetas**



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se registra el peso superficialmente seco, se coloca las briquetas en una fuente o en el horno lleno de agua a 25°C que estén cubiertas completamente por un tiempo de 5 minutos para luego sacarlas a secar superficialmente con trapos limpios y después llevarlas a pesar en una balanza de gran precisión y así registrar el valor obtenido.

**Figura 3.40 Peso superficialmente seco**



Fuente: Elaboración propia

Luego se procede a determinar el peso específico sumergido a través de una balanza especialmente para este ensayo y así registrar el valor.

### **Figura 3.41 Determinación del peso de las briquetas saturadas**



Fuente: Elaboración propia

### **Determinación de la estabilidad y fluencia**

Antes del ensayo se coloca las muestras sumergidas en baño de agua a  $60\text{ °C} \pm 0.5\text{ °C}$  ( $140 \pm 1.8\text{ °F}$ ) durante un tiempo de 30 o 40 minutos.

Posteriormente se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre  $21\text{ °C}$  y  $38\text{ °C}$  ( $70$  a  $100\text{ °F}$ ), se deberá calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior se deslice fácilmente sin pegarse como también se puede envolver las probetas con periódico. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Luego se retira una probeta del baño de agua ya cumpliendo los 30 minutos, se coloca la briqueta en las mordazas y se sitúa en el centro de la prensa. Se coloca el medidor del flujo en posición firmemente, se ajusta a cero los medidores y se aplica la carga de ensayo a una velocidad de deformación constante de  $50.8\text{ mm por minuto}$  ( $2''$  /minuto) hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a  $60\text{ °C}$  ( $150\text{ °F}$ ) se anota como valor de Estabilidad Marshall.

Mientras se realiza el ensayo de estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (Flujo) en posición sobre la varilla de guía y se lo quita cuando se obtiene la carga máxima; se lee y anota esta lectura en el instante que se produce la carga máxima como valor de flujo de la probeta, expresado en centésimas de pulgada.

El procedimiento del sacado de la probeta del baño de agua no debe ser mayor a 30 segundos eso se debe realizar con todas las probetas.

**Figura 3.42 Probetas sumergidas a baño de agua a 60°C**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.43 Colocado de las probetas en la mordaza de Marshall**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.44 Ensayo Marshall de estabilidad y fluencia**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.45 Probetas ensayadas**



Fuente: Elaboración propia

### **3.5.7 Proceso de cálculo y resultado de propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica**

A continuación, se desarrollará el proceso de cálculo para una briqueta, en el cual se indicará paso a paso cómo se obtuvo los resultados que posteriormente se muestra en una tabla.

La demostración de cálculo se realiza con las briquetas elaboradas con el 3,30 % de cemento asfáltico a una compactación de 75 golpes.

### 3.5.7.1 Identificaciones de probetas

Para la respectiva identificación de las probetas, se las enumeró e identificó con letras en el caso del porcentaje en estudio 3,30 % se identificó como 1, 2 y 3 para las que se analizarán en el desarrollo del documento.

### 3.5.7.2 Altura de las probetas

Se realiza la compactación de las briquetas con el martillo mecánico, para luego extraer las probetas de los moldes y así se deja enfriar para posteriormente realizar las mediciones de la altura con el vernier, obteniendo de esta manera cuatro alturas de cada briketa obteniendo el promedio.

Para el porcentaje de asfalto de 3,30 %, sus alturas correspondientes son las siguientes:

Identificación	Altura de probetas (cm)				Promedio de las probetas (cm)
1	6,16	6,15	6,14	6,15	6,15
2	6,23	6,22	6,21	6,23	6,22
3	6,14	6,13	6,13	6,14	6,14

### 3.5.7.3 Porcentaje de asfalto

Base de la mezcla: El porcentaje de asfalto es de 3,30 % para elaborar las 3 briquetas para este cálculo.

Base de agregado: Mediante la siguiente ecuación

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

$$\text{Base del agregado} = \frac{3,30 * 100}{100 - 3,30}$$

$$\text{Base del agregado} = 3,41$$

### 3.5.7.4 Peso de la briketa al aire

El peso en el aire es el peso seco que se obtiene pesando directamente las briquetas en una balanza.

Identificación	Peso (gr)
1	1181,00
2	1191,20
3	1182,40

### 3.5.7.5 Peso de la briqueta en el aire saturada superficialmente seco (SSS)

Se mide el peso de la briqueta SSS saturando la briqueta en el agua durante 30 min. a 25 °C y secándola superficialmente con trapos.

Identificación	Peso (gr)
1	1182,70
2	1193,50
3	1183,50

### 3.5.7.6 Peso de la briqueta sumergida en agua

El peso sumergido se mide cuando se sumerge la briqueta en el agua a 25 °C.

Identificación	Peso (gr)
1	675,00
2	683,00
3	675,00

### 3.5.7.7 Volumen de la briqueta

Vol. briqueta=Peso S.S.S.-Peso sumergido en agua

$$\text{Vol. briqueta}=1182,70- 675,00$$

$$\text{Vol. briqueta}=507,70 \text{ cm}^3$$

Cálculo realizado para la briqueta de identificada como “1”

### 3.5.7.8 Densidad de la briqueta

**Densidad real:**

$$\text{Densidad real}=\frac{\text{Peso briqueta en aire}}{\text{Volumen de briqueta}}$$

$$\text{Densidad real}=\frac{1181,00}{507,70}$$

$$\text{Densidad real}=2,33 \text{ gr/cm}^3$$

**Densidad promedio:** Cálculo de las briquetas identificadas

$$\text{Densidad promedio} = \frac{\text{Briq. 1} + \text{Briq. 2} + \text{Briq. 3}}{3}$$

$$\text{Densidad promedio} = \frac{2,33 + 2,33 + 2,33}{3} = 2,33 \text{ gr/cm}^3$$

**Densidad máxima teórica de la briqueta.**

$$D.\max.T.=\frac{100}{\left(\frac{\%asfalto}{\text{Peso esp asf}}\right)+\left(\frac{100-\%asf}{\text{Peso esp agr grueso}}\right)}$$

$$D\max T=\frac{100}{\left(\frac{3,30}{1,0320}\right)+\left(\frac{100-3,30}{2,76}\right)}$$

$$D\max T=2,61 \text{ gr/cm}^3$$

**3.5.7.9 Porcentaje de vacíos****Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv)**

$$V_v=\left(\frac{D\max T-Dens \text{ prom}}{D\max T}\right)*100$$

$$V_v=\left(\frac{2,61-2,33}{2,61}\right)*100$$

$$V_v=10,85\%$$

**Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM)**

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

$$VAM=\left(\frac{3,30*2,33}{1,0320}\right)+10,85\%$$

$$VAM=18,30 \%$$

**Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV)**

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

$$RBV=\left(\frac{18,30-10,85}{18,30}\right)*100$$

$$RBV=40,69\%$$

### 3.5.7.10 Estabilidad y fluencia

Identificación	Lectura dial	
	Estabilidad	Fluencia
1	700,00	8,00
2	665,00	9,00
3	723,00	10,00

Se debe realizar la corrección con la fórmula de calibración de la prensa Marshall.

#### Estabilidad

$$\text{Carga} = (\text{Lectura dial} * 0,012 - 0,0812) * 102 * 2,2$$

$$\text{Carga} = (700 * 0,012 - 0,0812) * 102 * 2,2 = 1866,74 \text{ lb}$$

Identificación	Estabilidad (dial)	Carga(lb)
1	700,00	1866,74
2	665,00	1772,49
3	600,00	1597,46

#### Factor de corrección por altura

El factor de corrección por la altura para las briquetas se lo realiza con la tabla que se encuentra en anexos.

Identificación	Factor de corrección	Estabilidad real(lb)
1	1,06	1971,28
2	1,04	1834,53
3	1,06	1691,71
<b>Estabilidad promedio</b>		1832,50

$$\text{Estabilidad real corregida} = \text{Carga} * \text{Factor de c}$$

$$\text{Estabilidad real corregida} = 1866,74 * 1,06 = 1971,28 \text{ lb}$$

#### Fluencia

Identificación	Factor de corrección
1	8,00
2	9,00
3	10,00
<b>Promedio</b>	9,00

**Nota:** De igual manera se realiza los cálculos para los demás datos, a continuación se presenta planillas generales de cálculos y resultados para 75,50 y 35 golpes.

**Tabla 3.35 Resultados de la dosificación para el diseño de la mezcla asfáltica convencional a 75 golpes**

PESOS ESPECIFICOS			% agregado		
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,80	47,40			
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2.,73	52,60			
Peso Especifico Total	2,76	100,00			

TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO: CONVENCIONAL BETUNEL	85/100
NÚMERO DE GOLPES POR CARA	75
TEMPERATURA DE MEZCLADO (°C)	140
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228 (gr/cm3)	1,0320

Agregado	P.E.	%
Grava	2,81	30,00
Gravilla	2,78	25,00
Arena	2,73	45,00
Filler	0,00	0,00

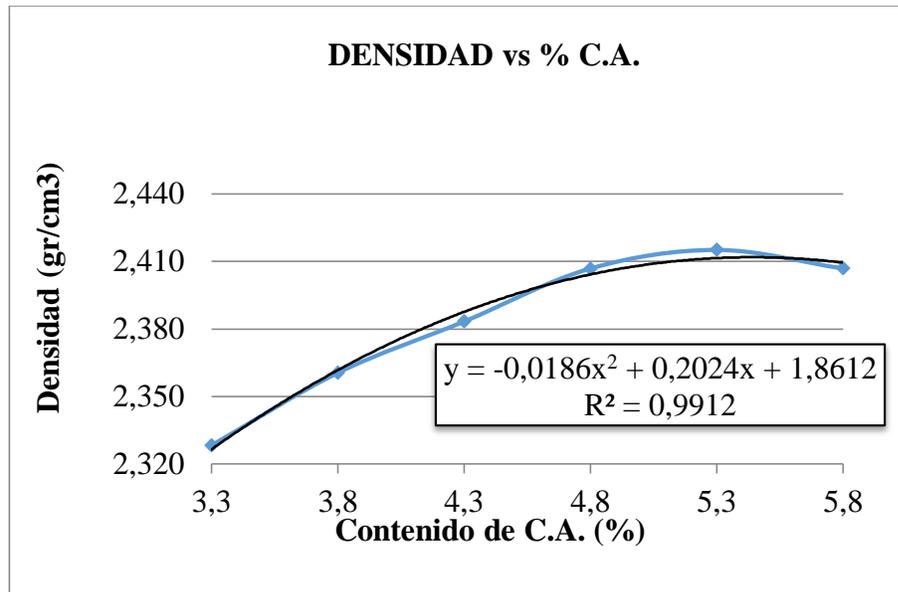
  

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall					Fluencia		
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	carga	factor de correccion de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm3	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1			6,15	1181,00	1182,70	675,00	507,70	2,33					700,00	1866,74	1,06	1971,28		8,00			
2	3,30	3,41	6,22	1191,20	1193,50	683,00	510,50	2,33	2,33	2,61	10,85	18,30	40,69	665,00	1772,49	1,04	1834,53	1832,50	9,00	9,00	
3			6,14	1182,40	1183,50	675,00	508,50	2,33						600,00	1597,46	1,06	1691,71		10,00		
4			6,22	1188,20	1188,70	688,00	500,70	2,37						868,00	2319,13	1,04	2400,30		11,00		
5	3,80	3,95	6,15	1176,20	1179,50	680,00	499,50	2,35	2,36	2,59	8,85	17,54	49,55	850,00	2270,66	1,06	2397,82	2501,15	9,00	10,00	
6			6,19	1178,50	1180,70	680,00	500,70	2,35						970,00	2593,79	1,04	2705,33		10,00		
7			6,11	1176,00	1178,10	685,00	493,10	2,38						995,00	2661,11	1,07	2842,07		11,00		
8	4,30	4,49	6,24	1167,10	1169,30	680,00	489,30	2,39	2,38	2,57	7,18	17,11	58,03	1078,00	2884,62	1,03	2968,27	2862,10	11,00	11,33	
9			6,20	1178,00	1180,00	685,00	495,00	2,38						998,00	2669,19	1,04	2775,96		12,00		
10			6,08	1153,90	1157,10	677,00	480,10	2,40						1008,00	2696,12	1,08	2906,42		14,00		
11	4,80	5,04	6,10	1178,00	1180,10	692,00	488,10	2,41	2,41	2,55	5,46	16,66	67,20	1137,00	3043,49	1,07	3259,58	3058,5	13,00	13,00	
12			6,25	1186,20	1188,50	695,00	493,50	2,40						1095,00	2930,39	1,03	3009,52		12,00		
13			6,10	1184,30	1185,60	693,00	492,60	2,40						1174,00	3143,13	1,07	3366,29		14,00		
14	5,30	5,60	6,17	1187,20	1188,70	697,00	491,70	2,41	2,42	2,52	4,33	16,73	74,14	1150,00	3078,50	1,05	3229,35	3219,08	15,00	14,00	
15			6,20	1193,70	1194,90	703,00	491,90	2,43						1100,00	2943,86	1,04	3061,61		13,00		
16			6,09	1180,10	1180,40	690,00	490,40	2,41						1166,00	3121,58	1,07	3352,58		16,00		
17	5,80	6,16	6,12	1171,40	1172,50	685,00	487,50	2,40	2,41	2,50	3,83	17,36	77,92	1016,00	2717,66	1,07	2894,31	3040,68	16,00	16,33	
18			6,40	1186,20	1186,90	695,00	491,90	2,41						1088,00	2911,55	0,99	2875,15		17,00		
ESPECIFICACIONES			Minimo						3,00	13,00	65,00						1800,00			8,00	
			Maximo						5,00	-	75,00						-			14,00	

Fuente: Elaboración propia

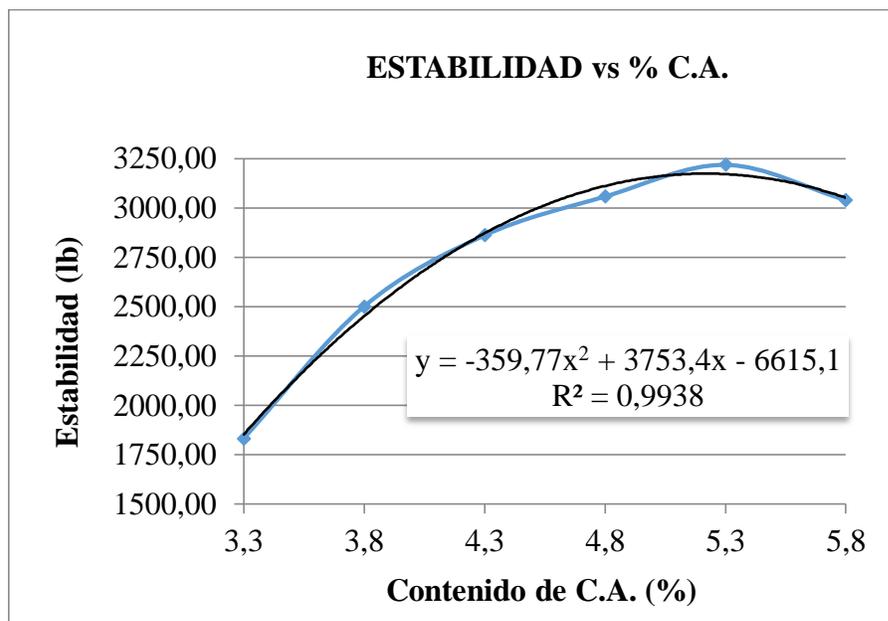
Con los valores obtenidos de la tabla de resultados se procede a graficar las curvas de diseño de la mezcla asfáltica, correspondientes a las siguientes relaciones:

**Gráfico 3.6 Porcentaje de cemento asfáltico vs densidad (85-100) (75 golpes)**



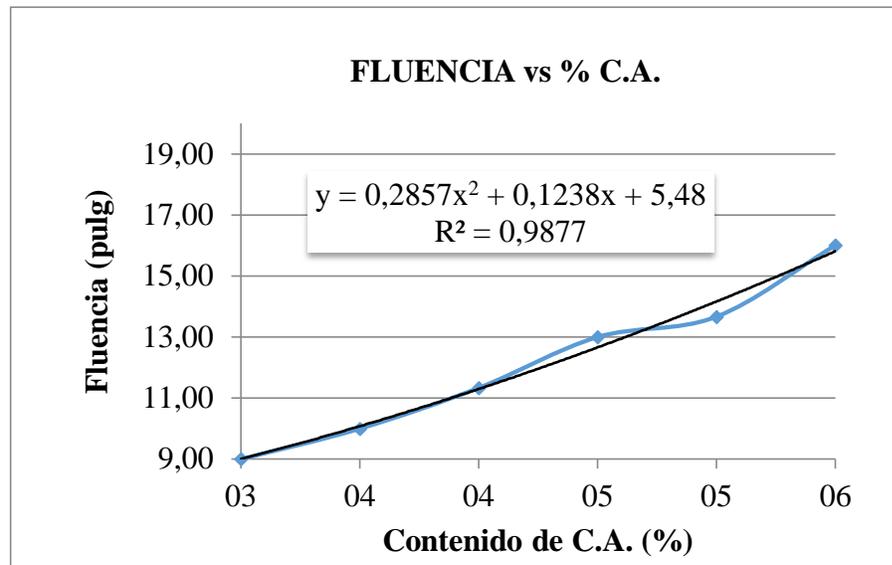
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.7 Porcentaje de cemento asfáltico vs estabilidad (85-100) (75 golpes)**



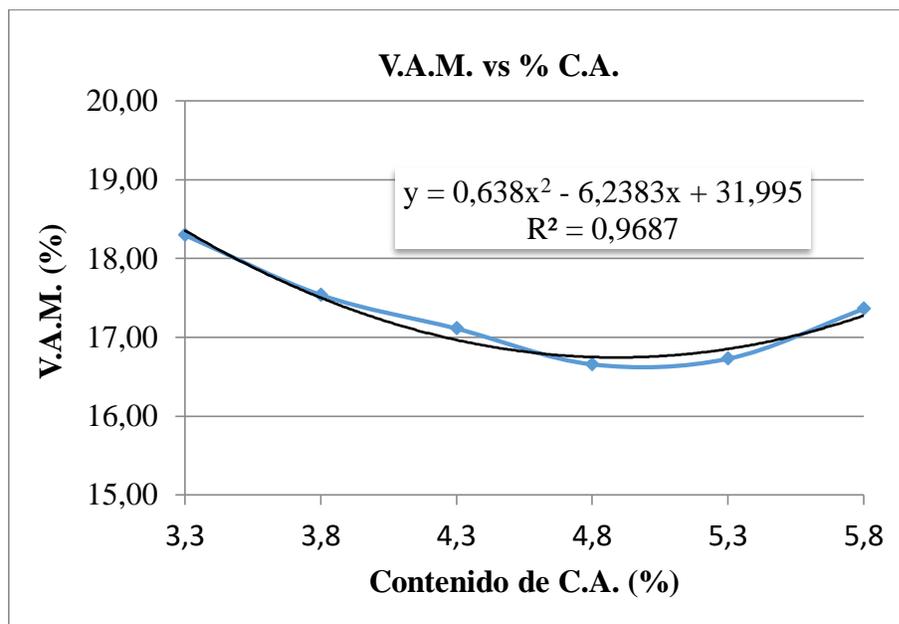
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.8 Porcentaje de cemento asfáltico vs fluencia (85-100) (75 golpes)**



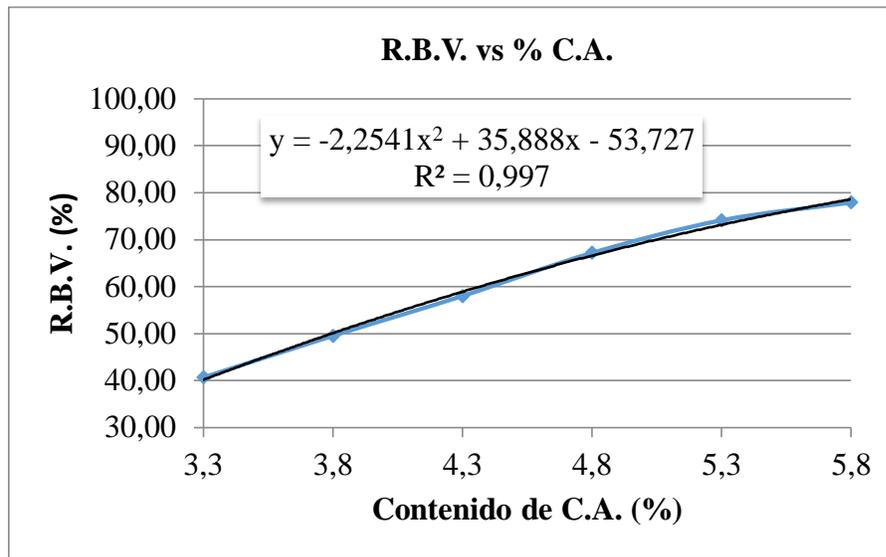
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.9 Porcentaje de cemento asfáltico vs V.A.M. (85-100) (75 golpes)**



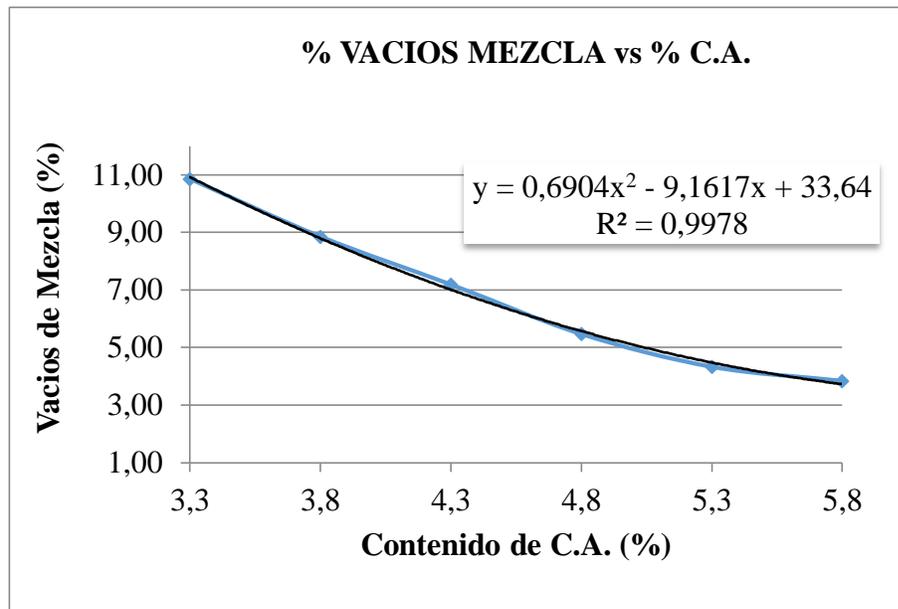
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.10 Porcentaje de cemento asfáltico vs R.B.V. (85-100) (75 golpes)**



Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.11 Porcentaje de cemento asfáltico vs % de vacíos (85-100) (75 golpes)**



Fuente: Elaboración propia

Con la ayuda de las gráficas se determino el contenido óptimo de cemento asfáltico; el criterio para determinar el contenido óptimo se obtiene del promedio de los óptimos parciales de tres parámetros fundamentales de cada gráfica como se muestra en la tabla a continuación:

**Tabla 3.36 Resultados del contenido óptimo de la mezcla asfáltica a 75 golpes**

	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de diseño</b>	<b>% de C.A.</b>
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	3174,09	5,25
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,41	5,44
	Vacios de la mezcla (%)	4,00	5,65
	<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio (%)</b>	<b>5,45</b>

Fuente: Elaboración propia

Con la ayuda de las mismas gráficas y con el contenido óptimo de cemento asfáltico, se puede encontrar los valores de las características de la mezcla asfáltica como se muestra en la tabla.

**Tabla 3.37 Resultados del diseño óptimo de los ensayos C.A. a 75 golpes**

<b>Valores obtenidos diseño Marshall</b>				
<b>Características</b>	<b>% de asfalto óptimo</b>	<b>Valores con él % óptimo</b>	<b>Especificaciones técnicas</b>	
Densidad	5,45	2,41	-----	-----
% vacíos	5,45	4,14	<b>3</b>	<b>5</b>
R.B.V.	5,45	74,91	<b>65</b>	<b>75</b>
V.A.M	5,45	16,95	<b>13</b>	-----
Estabilidad (lb)	5,45	3154,86	<b>&gt; 1800 Lb</b>	
Fluencia 1/100"	5,45	13,29	<b>8</b>	<b>14</b>
<b>% óptimo de asfalto propuesto</b>			<b>5,45</b>	

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.8 Diseño de mezcla para transito mediano

Posteriormente se realiza el mismo procedimiento de cálculo para el diseño de la mezcla a 50 golpes por cada cara de la briqueta lo cual está proyectada para vías de transito mediano, que se puede observar a continuación:

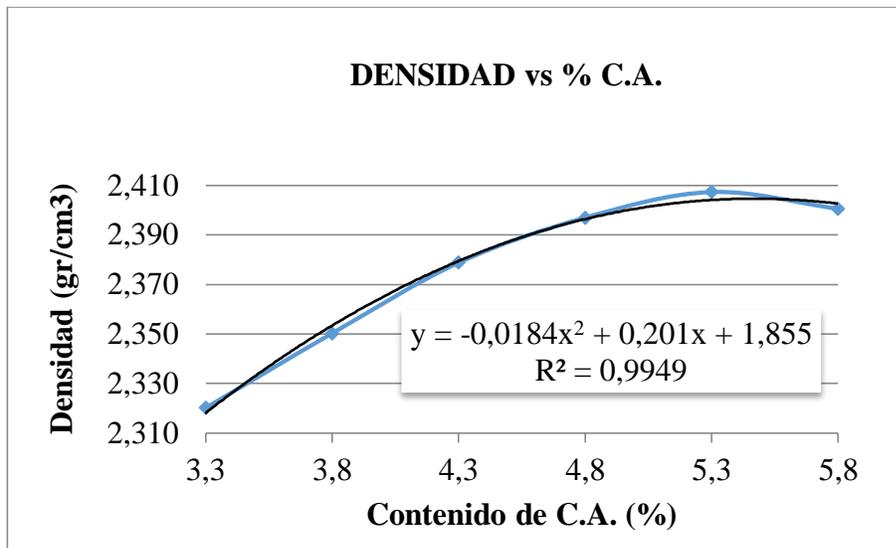
**Tabla 3. 38 Resultados de la dosificación para el diseño de la mezcla asfáltica convencional a 50 golpes**

PESOS ESPECIFICOS			% agregado			TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO: CONVENCIONAL			85/100			Agregado			P.E.			%			
Mat. Retenido Tamiz N° 4		2,80	47,40			NÚMERO DE GOLPES POR CARA			50			Grava			2,81			30,00			
Mat. Pasa Tamiz N° 4		2,73	52,60			TEMPERATURA DE MEZCLADO (°C)			140			Gravilla			2,78			25,00			
Peso Especifico Total		2,76	100,00			PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-229 (gr/cm3)			1,0320			Arena			2,73			45,00			
												Filler			0,00			0,00			
N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall					Fluencia		
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	carga	factor de correccion de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm3	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	3,30	3,41	6,26	1186,00	1186,70	678,00	508,70	2,33	2,32	2,61	11,16	18,58	39,93	516,00	1371,26	1,02	1404,17	1350,17	10,00	10,67	
2			6,35	1190,40	1192,40	680,00	512,40	2,32						500,00	1328,18	1,00	1328,18		12,00		
3			6,30	1183,20	1185,10	672,00	513,10	2,31						490,00	1301,25	1,01	1318,17		10,00		
4	3,80	3,95	6,33	1198,40	1201,20	692,00	509,20	2,35	2,35	2,59	9,24	17,90	48,36	600,00	1597,46	1,01	1605,45	1586,08	13,00	12,00	
5			6,27	1195,40	1196,10	687,00	509,10	2,35						590,00	1570,53	1,02	1603,51		12,00		
6			6,37	1192,80	1192,70	685,00	507,70	2,35						585,00	1557,07	1,00	1549,28		11,00		
7	4,30	4,49	6,40	1198,30	1201,10	697,00	504,10	2,38	2,38	2,57	7,36	17,27	57,40	700,00	1866,74	0,99	1843,40	1722,66	14,00	13,33	
8			6,45	1173,70	1180,90	685,00	495,90	2,37						630,00	1678,24	0,98	1636,29		12,00		
9			6,55	1198,50	1199,90	699,00	500,90	2,39						665,00	1772,49	0,95	1688,30		14,00		
10	4,80	5,04	6,32	1191,10	1193,40	695,00	498,40	2,39	2,40	2,55	5,85	17,00	65,59	705,00	1880,20	1,01	1895,24	1855,40	14,00	14,00	
11			6,53	1199,00	1200,10	700,00	500,10	2,40						690,00	1839,81	0,96	1759,41		13,00		
12			6,26	1197,10	1200,00	702,00	498,00	2,40						700,00	1866,74	1,02	1911,54		15,00		
13	5,30	5,60	6,26	1186,70	1188,10	698,00	490,10	2,42	2,41	2,52	4,63	17,00	72,74	718,00	1915,21	1,02	1961,17	1885,18	16,00	15,00	
14			6,24	1173,70	1180,90	691,00	489,90	2,40						695,00	1853,27	1,03	1907,02		15,00		
15			6,30	1183,80	1185,20	693,00	492,20	2,41						662,00	1764,41	1,01	1787,35		14,00		
16	5,80	6,16	6,28	1195,80	1196,80	698,00	498,80	2,40	2,40	2,50	4,08	17,58	76,77	655,00	1745,56	1,02	1778,73	1797,95	16,00	17,67	
17			6,30	1185,50	1188,60	695,00	493,60	2,40						685,00	1826,35	1,01	1850,09		17,00		
18			6,25	1171,40	1172,50	685,00	487,50	2,40						645,00	1718,63	1,03	1765,04		20,00		
ESPECIFICACIONES			minimo								3,00	13	65,00						1200,00	8	
			maximo								5,00	-	78,00						-	16	

Fuente: Elaboración propia

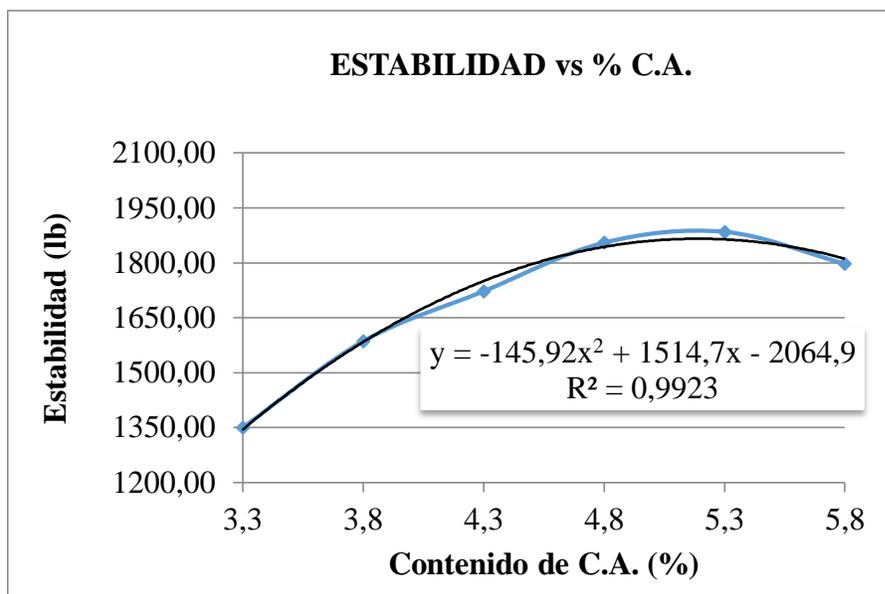
Con los valores obtenidos de la tabla de resultados se procede a graficar las curvas de diseño de la mezcla asfáltica, correspondientes a las siguientes relaciones:

**Gráfico 3.12 Porcentaje de cemento asfáltico vs densidad (85-100) (50 golpes)**



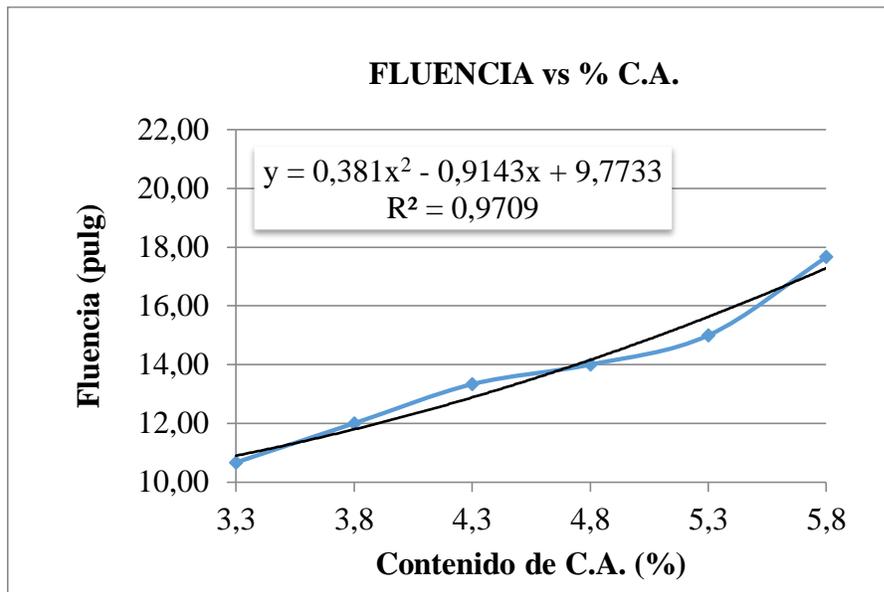
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.13 Porcentaje de cemento asfáltico vs estabilidad (85-100) (50 golpes)**



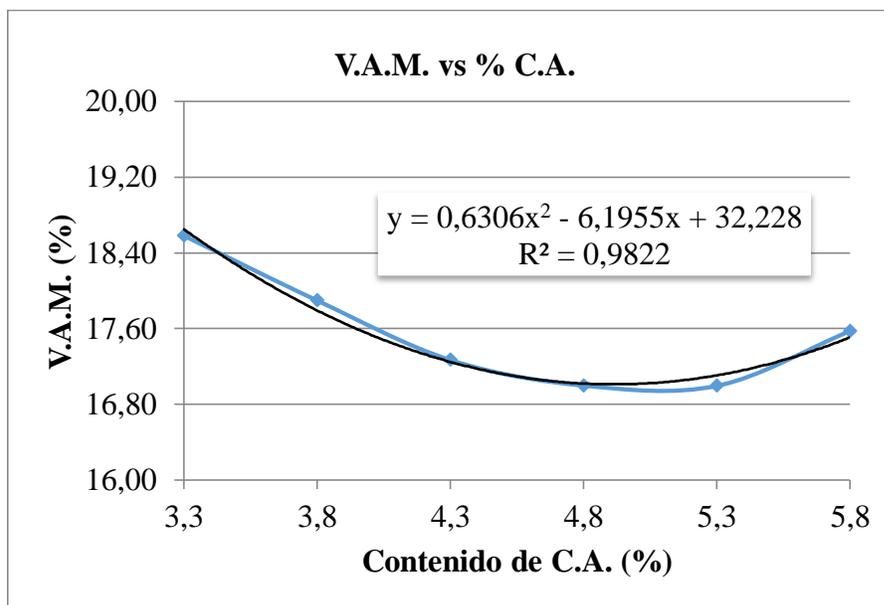
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.14 Porcentaje de cemento asfáltico vs fluencia (85-100) (50 golpes)**



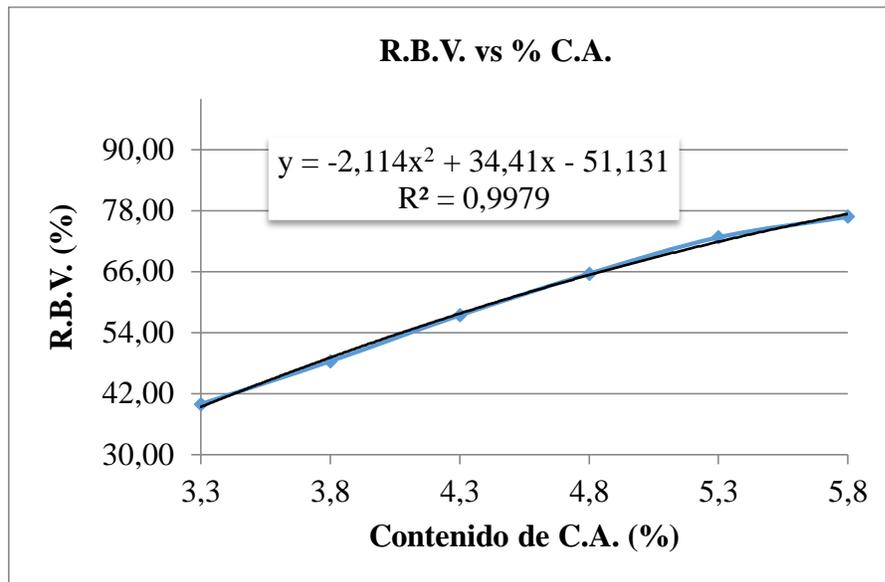
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.15 Porcentaje de cemento asfáltico vs V.A.M. (85-100) (50 golpes)**



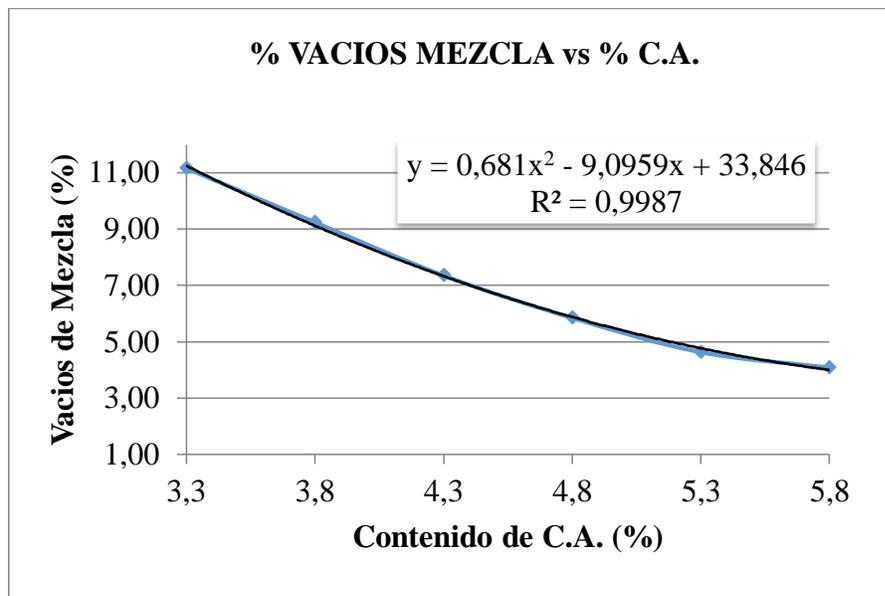
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.16 Porcentaje de cemento asfáltico vs R.B.V. (85-100) (50 golpes)**



Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.17 Porcentaje de cemento asfáltico vs % de vacios (85-100) (50 golpes)**



Fuente: Elaboración propia

Con las respectivas gráficas se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico; como se muestra en la tabla a continuación:

**Tabla 3.39 Resultados del contenido óptimo de la mezcla afáltica a 50 golpes**

	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de diseño</b>	<b>% de C.A.</b>
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	1865,88	5,20
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,40	5,46
	Vacios de la mezcla (%)	4,00	5,70
	<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio (%)</b>	<b>5,45</b>

Fuente: Elaboración propia

Con la ayuda de las mismas gráficas y con el contenido óptimo de cemento asfáltico, se puede encontrar los valores de las características de la mezcla asfáltica como se muestra en la tabla.

**Tabla 3.40 Resultados del diseño óptimo de los ensayos a 50 golpes**

<b>Valores obtenidos diseño Marshall</b>				
<b>Características</b>	<b>% de asfalto óptimo</b>	<b>Valores con él % óptimo</b>	<b>Especificaciones técnicas</b>	
Densidad	5,45	2,40	-----	-----
% vacíos	5,45	4,42	<b>3</b>	<b>5</b>
R.B.V.	5,45	73,61	<b>65</b>	<b>78</b>
V.A.M	5,45	17,19	<b>13</b>	-----
Estabilidad (lb)	5,45	1856,03	<b>&gt; 1200 Lb</b>	
Fluencia 1/100"	5,45	16,00	<b>8</b>	<b>16</b>
<b>% óptimo de asfalto propuesto</b>			<b>5,45</b>	

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.9 Diseño de mezcla asfáltica para transito liviano

Posteriormente se sigue el mismo procedimiento de cálculo para el diseño de la mezcla a 35 golpes por cada cara de la briqueta lo cual está proyectada para vías de transito liviano, que se puede observar a continuación:

**Tabla 3. 41 Resultados de la dosificación para el diseño de la mezcla asfáltica convencional a 35 golpes**

PESOS ESPECIFICOS			% agregado		
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,80	47,40			
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,73	52,60			
Peso Especifico Total	2,76	100,00			

TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO: CONVENCIONAL	85/100
NÚMERO DE GOLPES POR CARA	35
TEMPERATURA DE MEZCLADO (°C)	140
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-229 (gr/cm3)	1,0320

Agregado		P.E.	%
Grava		2,81	30,00
Gravilla		2,78	25,00
Arena		2,73	45,00
Filler		0,00	0,00

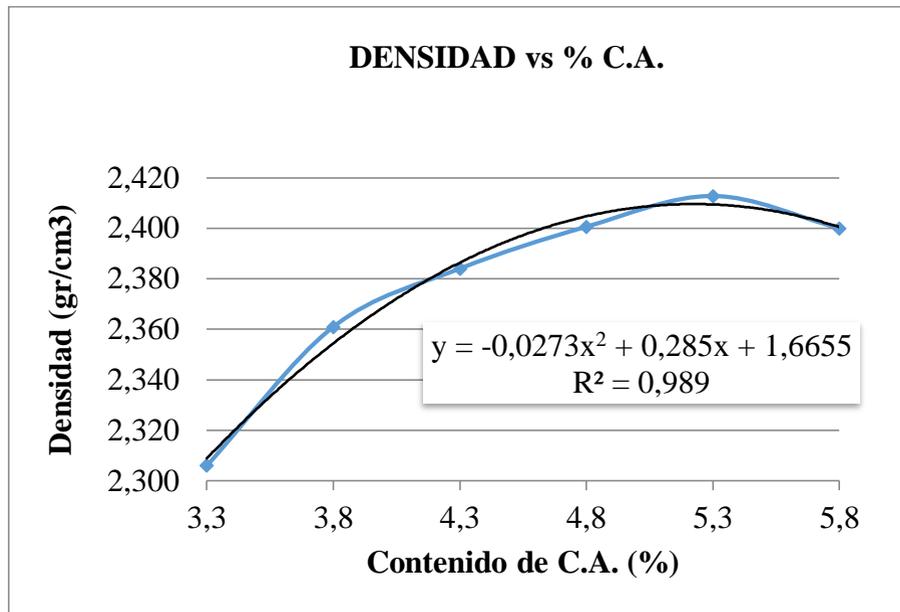
  

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall					Fluencia		
	base Mezcla	base Agregados		seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	carga	factor de correccion de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	Fluencia promedio	
	%	%		grs.	grs.	grs.		cm3	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1			6,53	1199,10	1200,10	680,00	520,10	2,31													
2	3,30	3,41	6,35	1198,30	1201,30	683,00	518,30	2,31	2,31	2,61	11,71	19,08	38,65	620,00	1651,31	0,96	1579,15	1576,06	10,00	11,67	
3			6,40	1192,60	1193,40	675,00	518,40	2,30						620,00	1651,31	1,00	1651,31	12,00			
4			6,34	1190,90	1191,90	685,00	506,90	2,35						570,00	1516,67	0,99	1497,72	13,00			
5	3,80	3,95	6,33	1199,00	1201,10	693,00	508,10	2,36	2,36	2,59	8,83	17,53	49,61	623,00	1659,39	1,00	1664,37	1694,30	13,00	12,33	
6			6,35	1198,50	1199,90	695,00	504,90	2,37						615,00	1637,85	1,01	1646,04	10,00			
7			6,44	1194,90	1198,60	699,00	499,60	2,39						665,00	1772,49	1,00	1772,49	14,00			
8	4,30	4,49	6,44	1194,90	1198,60	699,00	499,60	2,39						676,00	1802,11	0,98	1761,56	1798,74	11,00	13,33	
9			6,35	1182,70	1183,80	690,00	493,80	2,40	2,38	2,57	7,16	17,09	58,13	680,00	1812,88	1,00	1812,88	15,00			
10			6,36	1183,80	1185,50	685,00	500,50	2,37						685,00	1826,35	1,00	1821,78	14,00			
11	4,80	5,04	6,36	1182,60	1184,70	691,00	493,70	2,40						709,00	1890,97	1,00	1886,25	1822,17	13,00	15,67	
12			6,53	1199,00	1200,10	700,00	500,10	2,40	2,40	2,55	5,71	16,88	66,16	688,00	1834,43	0,96	1754,26	16,00			
13			6,38	1185,13	1186,98	695,00	491,98	2,41						690,00	1839,81	0,99	1826,01	18,00			
14	5,30	5,60	6,31	1171,90	1173,70	690,00	483,70	2,42						695,00	1853,27	1,01	1873,66	1831,03	18,00	17,67	
15			6,41	1181,80	1184,40	695,00	489,40	2,41	2,41	2,52	4,42	16,81	73,70	700,00	1866,74	0,99	1838,74	17,00			
16			6,45	1173,70	1180,90	692,00	488,90	2,40						685,00	1826,35	0,98	1780,69	18,00			
17	5,80	6,16	6,20	1177,60	1178,50	685,00	493,50	2,39						661,00	1761,72	1,04	1832,19	19,00		18,67	
18			6,26	1161,30	1164,40	678,00	486,40	2,39	2,40	2,50	4,11	17,60	76,65	645,00	1718,63	1,02	1759,88	1836,78	17,00		
			6,30	1185,50	1188,60	700,00	488,60	2,43						710,00	1893,67	1,01	1918,28	20,00			
ESPECIFICACIONES			minimo									3	13	70						750	8
			maximo									5	-	80						-	18

Fuente: Elaboración propia

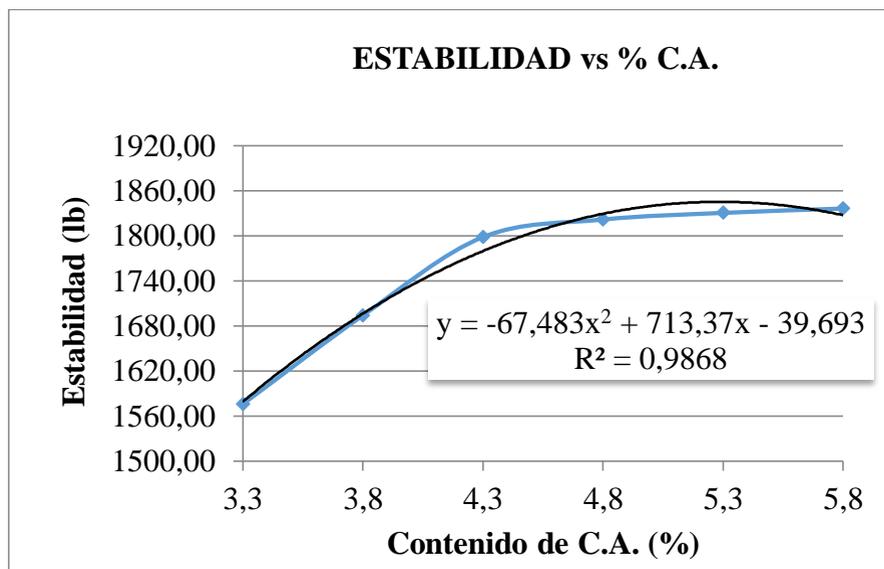
Con los valores obtenidos de la tabla de resultados se procede a graficar las curvas de diseño de la mezcla asfáltica, correspondientes a las siguientes relaciones:

**Gráfico 3.18 Porcentaje de cemento asfáltico vs densidad (85-100) (35 golpes)**



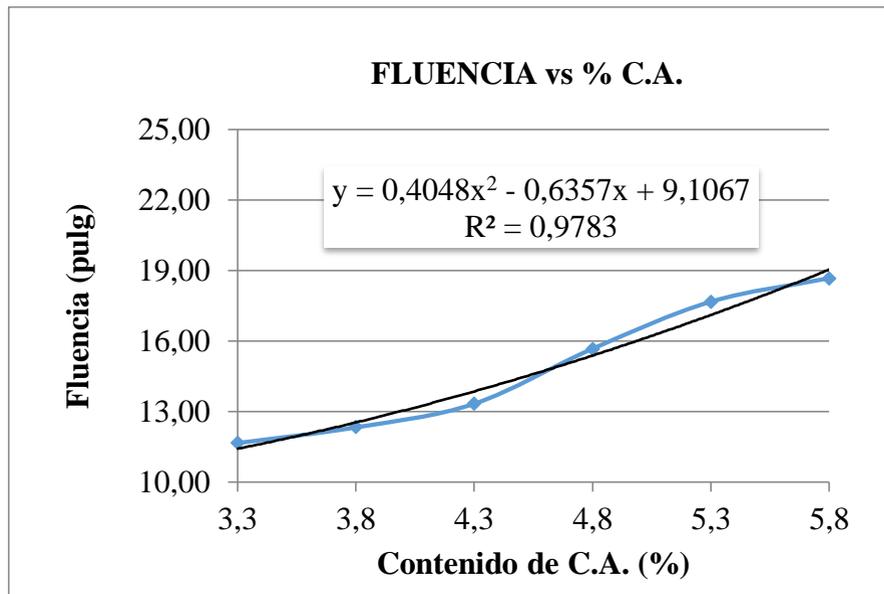
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.19 Porcentaje de cemento asfáltico vs estabilidad (85-100) (35 golpes)**



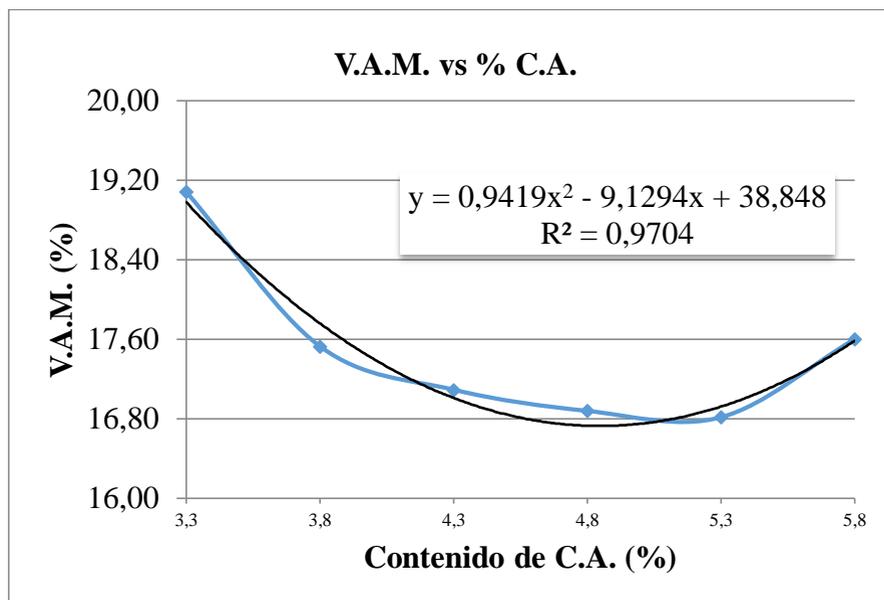
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.20 Porcentaje de cemento asfáltico vs fluencia (85-100) (35 golpes)**



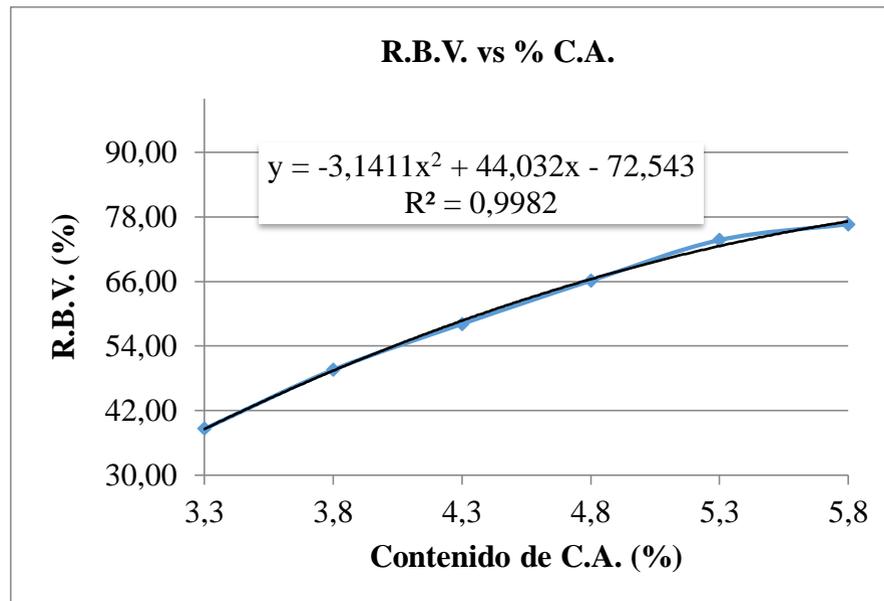
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.21 Porcentaje de cemento asfáltico vs V.A.M. (85-100) (35 golpes)**



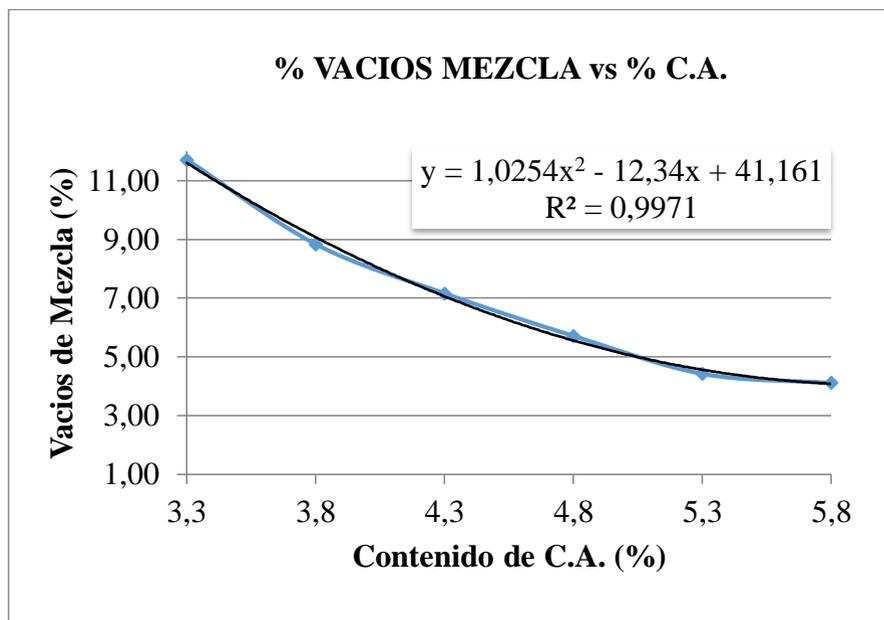
Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.22 Porcentaje de cemento asfáltico vs R.B.V. (85-100) (35 golpes)**



Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.23 Porcentaje de cemento asfáltico vs % de vacios (85-100) (35 golpes)**



Fuente: Elaboración propia

Con las respectivas gráficas se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico; como se muestra en la tabla a continuación:

**Tabla 3. 42 Resultados del contenido óptimo de la mezcla afáltica a 35 golpes**

	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de diseño</b>	<b>% de C.A.</b>
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	1845,58	5,29
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,41	5,25
	Vacios de la mezcla (%)	4,00	5,80
	<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio (%)</b>	<b>5,45</b>

Fuente: Elaboración propia

Con la ayuda de las mismas gráficas y con el contenido óptimo de cemento asfáltico, se puede encontrar los valores de las características de la mezcla asfáltica como se muestra en la tabla.

**Tabla 3. 43 Resultados del contenido óptimo de la mezcla afáltica a 35 golpes**

<b>Valores obtenidos diseño Marshall</b>				
<b>Características</b>	<b>% de asfalto óptimo</b>	<b>Valores con él % óptimo</b>	<b>Especificaciones técnicas</b>	
Densidad	5,45	2,41	-----	-----
% vacíos	5,45	4,28	<b>3</b>	<b>5</b>
R.B.V.	5,45	75,17	<b>70</b>	<b>80</b>
V.A.M	5,45	17,07	<b>13</b>	-----
Estabilidad (lb)	5,45	1843,76	<b>&gt; 750 Lb</b>	
Fluencia 1/100"	5,45	17,67	<b>8</b>	<b>18</b>
<b>% óptimo de asfalto propuesto</b>			<b>5,45</b>	

Fuente: Elaboración propia

### 3.6 DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON % ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO Y RAP.

Una vez determinados los contenidos óptimos de cemento asfáltico de cada diseño de la mezcla asfáltica a diferentes compactaciones, se elaboró 4 briquetas de cada diseño para realizar un análisis de los resultados.

#### 3.6.1 Diseño de la mezcla asfáltica con Rap y % óptimo de cemento asfáltico a 75 golpes.

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico obtenido es de 5,45 %. Con el aumento de Rap en la mezcla va disminuyendo la cantidad de cemento asfáltico como también de agregados ya que el Rap cuenta con agregado y cemento asfáltico lo cual hace que se reste al C.A. óptimo.

Al 0% de Rap = 5,45 % de cemento asfáltico

Al 15% de Rap = 4,56% de cemento asfáltico

**Calculo:** Realizando una regla de tres simple

$$\frac{100 \text{ Rap} \rightarrow 5,94\%C. A.}{15\text{Rap} \rightarrow X}$$

$$X = 0,89\%C. A.$$

$$C. A. \text{optimo } 5,45\% - 0,89\%C. A = \mathbf{4,56\%C. A. efectivo}$$

Al 30% de Rap = 3,37% de cemento asfáltico

**Calculo:** Realizando una regla de tres simple

$$\frac{100 \text{ Rap} \rightarrow 5,94\%C. A.}{30\text{Rap} \rightarrow X}$$

$$X = 1,78\%C. A.$$

$$C. A. \text{optimo } 5,45\% - 1,78\%C. A = \mathbf{3,37\%C. A. efectivo}$$

Al 50% de Rap = 2,48% de cemento asfáltico

**Calculo:** Realizando una regla de tres simple

$$\frac{100 \text{ Rap} \rightarrow 5,94\% \text{ C. A.}}{50 \text{ Rap} \rightarrow X}$$

$$X = 2,97\% \text{ C. A.}$$

$$\text{C. A. } \textit{optimo} \text{ } 5,45\% - 2,97\% \text{ C. A.} = \mathbf{2,48\% \text{ C. A. } \textit{efectivo}}$$

Se realiza el diseño de la mezcla asfáltica a una compactación de 75 golpes con sus respectivos porcentajes de Rap como se muestra a continuación:

Peso total de briqueta	1200gr
Porcentaje de grava	30%
Porcentaje de gravilla	25%
Porcentaje de arena	45%

**Tabla 3. 44 Dosificación a diferentes porcentajes de RAP con el contenido óptimo de C.A. (85-100)**

Porcentaje de Cemento asfáltico óptimo (%)	<b>5,45 %</b>	<b>5,45%</b>	<b>5,45%</b>	<b>5,45%</b>
Porcentaje de C. A. Efectivo (%)	<b>0,00</b>	<b>4,56%</b>	<b>3,67%</b>	<b>2,48%</b>
RAP (%)	<b>0,00</b>	<b>15,0%</b>	<b>30,0%</b>	<b>50,0%</b>
Porcentaje de Agregado (%)	94,55%	80,44%	66,33%	47,52%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	65,40	54,72	44,04	29,76
Peso de Grava (gr) *	340,38	289,58	238,79	171,07
Peso de Gravilla (gr) *	283,65	241,32	198,99	142,56
Peso de Arena (gr) *	510,57	434,38	358,18	256,61
Peso de RAP (gr) *	0,00	180,00	360,00	600,00
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Se elaboró un total de 16 briquetas como se puede observar a continuación:

**Tabla 3. 45 Datos obtenidos del ensayo Marshall de la mezcla asfáltica convencional C.A (85-100) a 75 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,20	1193,70	1194,90	700,00	1342,00	9,00
2	5,45	6,17	1187,20	1188,70	699,00	1749,00	9,00
3	5,45	6,14	1181,50	1182,70	693,00	1582,00	10,00
4	5,45	6,17	1182,10	1183,70	690,00	1557,00	12,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 46 Resultados de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional C.A (85-100)**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,20	2,41	4,27	16,98	74,86	3739,34	9,00
2	5,45	6,17	2,42				4921,37	9,00
3	5,45	6,14	2,41				4492,05	10,00
4	5,45	6,17	2,39				4379,02	12,00
<b>Promedio</b>			<b>2,41</b>	<b>4,27</b>	<b>16,98</b>	<b>74,86</b>	<b>4382,94</b>	<b>10,00</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 47 Datos obtenidos del ensayo Marshall al 15% de RAP C.A (85-100) a 75 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,27	1184,70	1187,50	689,00	1797,00	11,00
2	5,45	6,30	1194,70	1197,40	695,00	1720,00	13,00
3	5,45	6,37	1189,90	1195,00	691,00	1632,00	10,00
4	5,45	6,33	1197,40	1201,60	695,00	1716,00	12,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 48 Resultados de las propiedades mecánicas al 15 % de RAP C.A (85-100) a 75 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,27	2,38	5,00	18,39	67,92	4921,98	11,00
2	5,45	6,30	2,38				4673,37	13,00
3	5,45	6,37	2,36				4354,55	10,00
4	5,45	6,33	2,36				4625,64	12,00
<b>Promedio</b>			<b>2,37</b>	<b>5,00</b>	<b>18,39</b>	<b>67,92</b>	<b>4643,88</b>	<b>11,50</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 49 Datos obtenidos del ensayo Marshall al 30% de RAP C.A (85-100) a 75 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,18	1189,40	1190,10	696,00	1470,00	13,00
2	5,45	6,18	1192,70	1193,90	699,00	1436,00	10,00
3	5,45	6,19	1192,90	1194,00	695,00	1589,00	13,00
4	5,45	6,19	1197,80	1199,30	697,00	1498,00	14,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 50 Resultados de las propiedades mecánicas al 30 % de RAP C.A (85-100) a 75 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,18	2,41	4,77	17,42	72,59	4121,44	13,00
2	5,45	6,18	2,41				4025,68	10,00
3	5,45	6,19	2,39				4443,85	13,00
4	5,45	6,19	2,38				4188,26	14,00
<b>Promedio</b>			<b>2,40</b>	<b>4,77</b>	<b>17,42</b>	<b>72,59</b>	<b>4194,81</b>	<b>11,75</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 51 Datos obtenidos del ensayo Marshall al 50% de RAP C.A (85-100) a 75 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,24	1201,00	1202,20	704,00	1266,00	13,00
2	5,45	6,16	1191,50	1192,40	702,00	1433,00	10,00
3	5,45	6,15	1188,50	1189,40	700,00	1295,00	13,00
4	5,45	6,27	1191,00	1193,30	692,00	1330,00	14,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 52 Resultados de las propiedades mecánicas al 50 % de RAP C.A (85-100) a 75 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,24	2,41	4,26	16,97	74,92	3489,20	13,00
2	5,45	6,16	2,43				4044,11	10,00
3	5,45	6,15	2,43				3663,22	13,00
4	5,45	6,27	2,38				3638,03	14,00
<b>Promedio</b>			<b>2,41</b>	<b>4,26</b>	<b>16,97</b>	<b>74,92</b>	<b>3708,64</b>	<b>12,50</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.6.2 Diseño de la mezcla asfáltica con Rap y % óptimo de cemento asfáltico a 50 golpes.

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico obtenido es de 5,45 %. Con el aumento de Rap en la mezcla va disminuyendo la cantidad de cemento asfáltico como también de agregados ya que el Rap cuenta con agregado y cemento asfáltico lo cual hace que se reste al C.A. optimo.

Se realiza el diseño de la mezcla asfáltica a una compactación de 50 golpes con sus respectivos porcentajes de Rap como se demostró anteriormente:

Peso total de briqueta	1200gr
Porcentaje de grava	30%
Porcentaje de gravilla	25%
Porcentaje de arena	45%

**Tabla 3. 53 Dosificación a diferentes porcentajes de RAP con el contenido óptimo de C.A. (85-100)**

Porcentaje de Cemento asfaltico optimo (%)	<b>5,45%</b>	<b>5,45%</b>	<b>5,45%</b>	<b>5,45%</b>
Porcentaje de C. A. efectivo (%)	<b>0,00</b>	<b>4,56%</b>	<b>3,67%</b>	<b>2,48%</b>
Rap (%)	<b>0,00</b>	<b>15,0%</b>	<b>30,0%</b>	<b>50,0%</b>
Porcentaje de agregado (%)	94,55%	80,44%	66,33%	47,52%
Peso del Cemento asfáltico (gr) *	65,40	54,72	44,04	29,76
Peso de grava (gr) *	340,38	289,58	238,79	171,07
Peso de gravilla (gr) *	283,65	241,32	198,99	142,56
Peso de arena (gr) *	510,57	434,38	358,18	256,61
Peso de rap (gr) *	0,00	180,00	360,00	600,00
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Se elaboró un total de 16 briquetas como se puede observar a continuación:

**Tabla 3. 54 Datos obtenidos del ensayo Marshall de la mezcla asfaltica convencional C.A.(85-100) a 50 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,18	1177,60	1179,60	691,00	1379,00	10,00
2	5,45	6,23	1190,10	1191,60	692,00	1342,00	10,00
3	5,45	6,28	1193,80	1197,50	699,00	1248,00	13,00
4	5,45	6,23	1180,20	1181,80	687,00	1323,00	11,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 55 Resultados de las propiedades mecánicas de la mezcla asfaltica convencional C.A (85-100) a 50 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,18	2,41	4,96	17,60	71,82	3865,13	10,00
2	5,45	6,23	2,38				3710,57	10,00
3	5,45	6,28	2,39				3405,90	13,00
4	5,45	6,23	2,39				3657,77	11,00
<b>Promedio</b>			<b>2,39</b>	<b>4,96</b>	<b>17,60</b>	<b>71,82</b>	<b>3659,84</b>	<b>11,00</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 56 Datos obtenidos del ensayo Marshal all 15% de RAP C.A (85-100) a 50 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,30	1182,10	1185,80	691,00	1677,00	10,00
2	5,45	6,37	1195,70	1198,20	701,00	1489,00	13,00
3	5,45	6,30	1183,80	1187,40	685,00	1447,00	11,00
4	5,45	6,33	1190,30	1192,30	700,00	1420,00	13,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 57 Resultados de las propiedades mecánicas al 15 % de RAP C.A (85-100) a 50 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,30	2,39	5,00	17,63	71,64	4556,07	10,00
2	5,45	6,37	2,40				3971,40	13,00
3	5,45	6,30	2,36				3928,68	11,00
4	5,45	6,33	2,42				3824,58	13,00
<b>Promedio</b>			<b>2,39</b>	<b>5,00</b>	<b>17,63</b>	<b>71,64</b>	<b>4070,18</b>	<b>11,75</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 58 Datos obtenidos del ensayo Marshall al 30% de RAP C.A (85-100) a 50 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,19	1184,80	1185,80	685,00	1242,00	10,00
2	5,45	6,24	1183,40	1186,10	686,00	1171,00	11,00
3	5,45	6,29	1193,60	1196,00	694,00	1142,00	15,00
4	5,45	6,30	1195,10	1197,30	700,00	1185,00	12,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 59 Resultados de las propiedades mecánicas al 30 % de RAP C.A (85-100) a 50 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,19	2,37	5,55	18,11	69,37	3469,26	10,00
2	5,45	6,24	2,37				3225,96	11,00
3	5,45	6,29	2,38				3105,87	15,00
4	5,45	6,30	2,40				3213,99	12,00
<b>Promedio</b>			<b>2,38</b>	<b>5,55</b>	<b>18,11</b>	<b>69,37</b>	<b>3253,77</b>	<b>12,00</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 60 Datos obtenidos del ensayo Marshall al 50% de RAP C.A (85-100) a 50 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,33	1191,50	1195,00	696,00	1076,00	14,00
2	5,45	6,30	1189,20	1191,50	694,00	1116,00	15,00
3	5,45	6,32	1199,20	1201,60	701,00	1144,00	15,00
4	5,45	6,30	1185,60	1187,30	690,00	1100,00	13,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 61 Resultados de las propiedades mecánicas al 50 % de RAP C.A (85-100) a 50 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,33	2,39	5,10	17,72	71,21	2893,63	14,00
2	5,45	6,30	2,39				3025,77	15,00
3	5,45	6,32	2,40				3089,84	15,00
4	5,45	6,30	2,38				2982,13	13,00
<b>Promedio</b>			<b>2,39</b>	<b>5,10</b>	<b>17,72</b>	<b>71,21</b>	<b>2997,09</b>	<b>14,25</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.6.3 Diseño de la mezcla asfáltica con Rap y % óptimo de cemento asfáltico a 35 golpes.

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico obtenido es de 5,45 %. Con el aumento de Rap en la mezcla va disminuyendo la cantidad de cemento asfáltico como también de agregados ya que el Rap cuenta con agregado y cemento asfáltico lo cual hace que se reste al C.A. óptimo.

Se realiza el diseño de la mezcla asfáltica a una compactación de 35 golpes con sus respectivos porcentajes de Rap como se demostró anteriormente:

Peso total de briqueta	1200gr
Porcentaje de grava	30%
Porcentaje de gravilla	25%
Porcentaje de arena	45%

**Tabla 3. 62 Dosificación a diferentes porcentajes de RAP con el contenido óptimo de C.A. (85-100)**

Porcentaje de Cemento asfáltico óptimo (%)	<b>5,45 %</b>	<b>5,45%</b>	<b>5,45%</b>	<b>5,45%</b>
Porcentaje de C. A. efectivo (%)	<b>0,00</b>	<b>4,56%</b>	<b>3,67%</b>	<b>2,48%</b>
RAP (%)	<b>0,00</b>	<b>15,0%</b>	<b>30,0%</b>	<b>50,0%</b>
Porcentaje de Agregado (%)	94,55%	80,44%	66,33%	47,52%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	65,40	54,72	44,04	29,76
Peso de Grava (gr) *	340,38	289,58	238,79	171,07
Peso de Gravilla (gr) *	283,65	241,32	198,99	142,56
Peso de Arena (gr) *	510,57	434,38	358,18	256,61
Peso de RAP (gr) *	0,00	180,00	360,00	600,00
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

Se elaboró un total de 16 briquetas como se puede observar a continuación:

**Tabla 3. 63 Datos obtenidos del ensayo Marshall de la mezcla asfáltica convencional C.A (85-100) a 35 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,33	1197,50	1199,30	701,00	1149,00	10,00
2	5,45	6,31	1181,70	1183,70	693,00	1148,00	10,00
3	5,45	6,34	1194,50	1196,40	695,00	1078,00	9,00
4	5,45	6,35	1182,30	1185,00	688,00	1100,00	11,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 64 Resultados de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional C.A (85-100) a 35 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,33	2,40	4,95	17,59	71,84	3091,18	10,00
2	5,45	6,31	2,41				3106,92	10,00
3	5,45	6,34	2,38				2893,27	9,00
4	5,45	6,35	2,38				2943,86	11,00
<b>Promedio</b>			<b>2,39</b>	<b>4,95</b>	<b>17,59</b>	<b>71,84</b>	<b>3008,81</b>	<b>10,00</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 65 Datos obtenidos del ensayo Marshal al 15% de RAP C.A (85-100) a 35 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,41	1192,90	1197,90	692,00	1167,00	11,00
2	5,45	6,41	1190,90	1195,50	699,00	1240,00	9,00
3	5,45	6,34	1198,60	1200,90	701,00	1442,00	12,00
4	5,45	6,30	1185,80	1187,60	695,00	1216,00	13,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 66 Resultados de las propiedades mecánicas al 15 % de RAP C.A (85-100) a 35 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,41	2,36	5,06	17,69	71,37	3077,41	11,00
2	5,45	6,41	2,40				3271,04	9,00
3	5,45	6,34	2,40				3876,39	12,00
4	5,45	6,30	2,41				3298,55	13,00
<b>Promedio</b>			<b>2,39</b>	<b>5,06</b>	<b>17,69</b>	<b>71,37</b>	<b>3380,85</b>	<b>11,25</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 67 Datos obtenidos del ensayo Marshal al 30% de RAP C.A (85-100) a 35 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,45	1198,20	1199,90	698,00	935,00	15,00
2	5,45	6,44	1191,50	1196,40	692,00	1040,00	15,00
3	5,45	6,08	1169,90	1172,90	684,00	1050,00	14,00
4	5,45	6,51	1197,50	1201,90	700,00	998,00	12,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 68 Resultados de las propiedades mecánicas al 30 % de RAP C.A (85-100) a 35 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia (0,01pulg)
1	5,45	6,45	2,39	5,39	17,97	69,99	2437,06	15,00
2	5,45	6,44	2,36				2719,69	15,00
3	5,45	6,08	2,39				3028,34	14,00
4	5,45	6,51	2,39				2562,43	12,00
<b>Promedio</b>			<b>2,38</b>	<b>5,39</b>	<b>17,97</b>	<b>69,99</b>	<b>2686,88</b>	<b>14,00</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 69 Datos obtenidos del ensayo Marshal al 50% de RAP C.A (85-100) a 35 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,45	6,42	1207,00	1209,40	701,00	847,00	13,00
2	5,45	6,24	1188,20	1190,20	696,00	950,00	15,00
3	5,45	6,29	1190,00	1191,30	694,00	923,00	14,00
4	5,45	6,23	1191,50	1192,70	685,00	905,00	16,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 70 Resultados de las propiedades mecánicas al 50 % de RAP C.A (85-100) a 35 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,45	6,42	2,37	5,49	18,06	69,58	2222,99	13,00
2	5,45	6,24	2,40				2613,60	15,00
3	5,45	6,29	2,39				2506,71	14,00
4	5,45	6,23	2,35				2496,16	16,00
<b>Promedio</b>			<b>2,38</b>	<b>5,49</b>	<b>18,06</b>	<b>69,58</b>	<b>2459,86</b>	<b>14,50</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.6.4 Diseño de las mezclas asfálticas con 100% de RAP

**Tabla 3. 71 Datos obtenidos del ensayo Marshall 100% de RAP a 75 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,94	6,60	1182,5	1187,30	672,00	1228,00	13,00
2	5,94	6,70	1186,60	1196,40	673,00	1216,00	15,00
3	5,94	6,60	1199,00	1200,10	700,00	1246,00	15,00
4	5,94	6,64	1187,10	1193,50	675,00	1186,00	13,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 72 Resultados de las propiedades mecánicas 100% de RAP a 75 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,94	6,60	2,29	7,40	20,70	64,28	3101,75	13,00
2	5,94	6,70	2,27				3003,87	15,00
3	5,94	6,60	2,40				3147,47	15,00
4	5,94	6,64	2,29				2971,26	13,00
<b>Promedio</b>			<b>2,31</b>	<b>7,40</b>	<b>20,70</b>	<b>64,28</b>	<b>3056,08</b>	<b>14,00</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 73 Datos obtenidos del ensayo Marshall 100% de RAP a 50 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,94	6,65	1199,80	1200,7	681,00	871,00	14,00
2	5,94	6,64	1177,10	1184,10	651,00	886,00	15,00
3	5,94	6,68	1188,00	1197,50	666,00	901,00	15,00
4	5,94	6,78	1193,50	1198,40	661,00	909,00	16,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 74 Resultados de las propiedades mecánicas 100% de RAP a 50 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,94	6,65	2,31	10,16	23,07	55,96	2173,15	14,00
2	5,94	6,64	2,21				2215,36	15,00
3	5,94	6,68	2,24				2233,41	15,00
4	5,94	6,78	2,22				2192,65	16,00
<b>Promedio</b>			<b>2,24</b>	<b>10,16</b>	<b>23,07</b>	<b>55,96</b>	<b>2203,64</b>	<b>15,00</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 75 Datos obtenidos del ensayo Marshall 100% de RAP a 35 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
1	5,94	6,80	1197,40	1200,90	674,00	768,00	13,00
2	5,94	6,81	1196,60	1199,20	653,00	765,00	15,00
3	5,94	6,83	1187,70	1197,60	650,00	733,00	16,00
4	5,94	6,65	1191,10	1199,30	660,00	751,00	17,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 76 Resultados de las propiedades mecánicas 100% de RAP a 35 golpes**

Identificación	% de Asfalto	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm <sup>3</sup> )	% vacíos en la mezcla total (Vv)	% vacíos de agregado total (VAM)	% vacíos llenos de asfalto total (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,94	6,80	2,27	11,48	24,20	52,56	1839,74	13,00
2	5,94	6,81	2,19				1827,38	15,00
3	5,94	6,83	2,17				1740,48	16,00
4	5,94	6,65	2,21				1871,40	17,00
<b>Promedio</b>			<b>2,21</b>	<b>11,48</b>	<b>24,20</b>	<b>52,56</b>	<b>1819,75</b>	<b>15,25</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Estadística descriptiva de mezcla asfáltica a una compactación de 75 golpes

**Tabla 3. 77 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica convencional C.A. (85-100) a una compactación de 75 golpes**

Variable	Media	Mediana	Moda	Desv. Est.	Varianza
Estabilidad (Lb)	4382,94	4435,54	0,00	488,55	238683,86
Flujo (1/100")	10,00	9,50	9,00	1,41	2,00
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	2,41	2,41	0,00	0,01	0,00
% Vacíos (%)	4,27	4,21	0,00	0,49	0,24
% VAM (%)	16,98	16,92	0,00	0,43	0,18
% RBV (%)	74,86	75,14	0,00	2,24	5,03

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 78 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 15 % RAP C.A (85-100) a una compactación de 75 golpes**

Variable	Media	Mediana	Moda	Desv. Est.	Varianza
Estabilidad (Lb)	4643,88	4649,50	0,00	232,56	54084,59
Flujo (1/100")	11,50	11,50	0,00	1,29	1,67
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	2,37	2,37	0,00	0,01	0,00
% Vacíos (%)	5,00	5,89	0,00	0,35	0,12
% VAM (%)	18,39	18,38	0,00	0,30	0,09
% RBV (%)	67,92	67,98	0,00	1,36	1,86

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 79 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 30 % RAP C.A (85-100)  
a una compactación de 75 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	4194,81	4154,85	0,00	178,93	32016,69
<b>Flujo (1/100")</b>	11,75	11,50	10,00	2,06	4,25
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,40	2,40	0,00	0,01	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	4,77	4,74	0,00	0,49	0,24
<b>% VAM (%)</b>	17,42	17,39	0,00	0,43	0,18
<b>% RBV (%)</b>	72,59	72,75	0,00	2,15	4,64

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 80 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 50 % RAP C.A (85-100)  
a una compactación de 75 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	3708,64	3650,62	0,00	236,46	55914,78
<b>Flujo (1/100")</b>	12,50	13,00	13,00	1,73	3,00
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,41	2,42	0,00	0,03	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	4,26	3,92	0,00	1,00	0,99
<b>% VAM (%)</b>	16,97	16,68	0,00	0,86	0,75
<b>% RBV (%)</b>	74,92	76,52	0,00	4,46	19,85

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 81 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 100 % RAP a una  
compactación de 75 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	3056,08	3052,81	0,00	82,38	6785,94
<b>Flujo (1/100")</b>	14,00	14,00	13,00	1,15	1,33
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,31	2,29	0,00	0,06	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	7,40	8,31	0,00	2,32	5,40
<b>% VAM (%)</b>	20,70	21,51	0,00	1,99	3,96
<b>% RBV (%)</b>	64,28	61,34	0,00	8,50	72,25

Fuente: Elaboración propia

**Estadística descriptiva de mezcla asfáltica a una compactación de 50 golpes**

**Tabla 3. 82 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica convencional C.A. (85-100) a una compactación de 50 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	3659,84	3684,17	0,00	190,79	36402,34
<b>Flujo (1/100")</b>	11,00	10,50	10,00	1,41	2,00
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,39	2,39	0,00	0,01	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	4,96	5,08	0,00	0,50	0,25
<b>% VAM (%)</b>	17,60	17,70	0,00	0,43	0,19
<b>% RBV (%)</b>	71,82	71,31	0,00	2,18	4,76

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 3. 83 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 15 % RAP C.A (85-100) a una compactación de 50 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	4070,18	3950,04	0,00	329,74	108730,16
<b>Flujo (1/100")</b>	11,75	12,00	13,00	1,50	2,25
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,39	2,40	0,00	0,03	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	5,00	4,80	0,00	1,06	1,11
<b>% VAM (%)</b>	17,63	17,46	0,00	0,91	0,84
<b>% RBV (%)</b>	71,64	72,51	0,00	4,42	19,56

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 3. 84 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 30% RAP C.A (85-100) a una compactación de 50 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	3253,77	3219,98	0,00	153,48	23556,14
<b>Flujo (1/100")</b>	12,00	11,50	0,00	2,16	4,67
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,38	2,37	0,00	0,02	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	5,55	5,79	0,00	0,69	0,48
<b>% VAM (%)</b>	18,11	18,32	0,00	0,60	0,36
<b>% RBV (%)</b>	69,37	68,38	0,00	2,89	8,37

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 85 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 50 % RAP C.A (85-100) a una compactación de 50 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	2997,09	3003,95	0,00	81,25	6602,08
<b>Flujo (1/100")</b>	14,25	14,50	15,00	0,96	0,92
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,39	2,39	0,00	0,00	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	5,10	5,12	0,00	0,19	0,04
<b>% VAM (%)</b>	17,72	17,73	0,00	0,17	0,03
<b>% RBV (%)</b>	71,21	71,15	0,00	0,81	0,66

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 86 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 100 % RAP a una compactación de 50 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	2203,64	2204,01	0,00	26,30	691,45
<b>Flujo (1/100")</b>	15,00	15,00	15,00	0,82	0,67
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,24	2,23	0,00	0,05	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	10,16	10,88	0,00	1,80	3,24
<b>% VAM (%)</b>	23,07	23,70	0,00	1,54	2,38
<b>% RBV (%)</b>	55,96	54,11	0,00	5,13	26,27

Fuente: Elaboración propia

**Estadística descriptiva de mezcla asfáltica a una compactación de 35 golpes**

**Tabla 3. 87 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica convencional C.A. (85-100) a una compactación de 35 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	3008,81	3017,52	0,00	106,42	11326,21
<b>Flujo (1/100")</b>	10,00	10,00	10,00	0,82	0,67
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,39	2,39	0,00	0,01	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	4,95	4,97	0,00	0,58	0,34
<b>% VAM (%)</b>	17,59	17,58	0,00	0,51	0,26
<b>% RBV (%)</b>	71,84	71,77	0,00	2,51	6,31

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 88 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 15 % RAP C.A (85-100) a una compactación de 35 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	3380,85	3284,80	0,00	344,71	118822,12
<b>Flujo (1/100")</b>	11,25	11,50	0,00	1,71	2,92
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,39	2,40	0,00	0,02	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	5,06	4,76	0,00	0,87	0,76
<b>% VAM (%)</b>	17,69	17,40	0,00	0,76	0,58
<b>% RBV (%)</b>	71,37	72,66	0,00	3,59	12,89

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 89 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 30 % RAP C.A (85-100)  
a una compactación de 35 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	2686,88	2641,06	0,00	255,32	65189,94
<b>Flujo (1/100")</b>	14,00	14,50	15,00	1,41	2,00
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,38	2,39	0,00	0,01	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	5,39	5,21	0,00	0,54	0,29
<b>% VAM (%)</b>	17,97	17,79	0,00	0,47	0,22
<b>% RBV (%)</b>	70,00	70,70	0,00	2,18	4,74

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 90 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 50 % RAP C.A (85-100)  
a una compactación de 35 golpes**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	2459,86	2501,44	0,00	166,59	27752,49
<b>Flujo (1/100")</b>	14,50	14,50	0,00	1,29	1,67
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,38	2,38	0,00	0,03	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	5,49	5,34	0,00	1,00	0,99
<b>% VAM (%)</b>	18,06	17,90	0,00	0,86	0,75
<b>% RBV (%)</b>	69,58	70,22	0,00	4,01	16,06

Fuente: Elaboración propia

*Tabla 3. 91 Estadística descriptiva en la mezcla asfáltica al 100 % RAP a una  
compactación de 35 golpes*

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
<b>Estabilidad (Lb)</b>	1819,75	1833,56	0,00	56,00	3136,25
<b>Flujo (1/100")</b>	15,25	15,50	0,00	1,71	2,92
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,21	2,20	0,00	0,04	0,00
<b>% Vacíos (%)</b>	11,48	12,01	0,00	1,78	3,18
<b>% VAM (%)</b>	24,20	24,67	0,00	1,53	2,33
<b>% RBV (%)</b>	52,56	51,32	0,00	4,54	20,64

Fuente: Elaboración propia

### 3.8 USO DE LOS TRÁFICOS MEDIANTE LOS GOLPES DE COMPACTACIÓN

Mediante una serie de golpes con el martillo Marshall sobre ambas caras de la muestra, se consigue el propósito para el tránsito esperado de la mezcla que se ha diseñando.

Como tambien el flujo y estabilidad Marshall se tienen que medir de acuerdo con el método AASHTO T 245.

**Tabla 3. 92 Requisitos para la mezcla asfáltica Marshall (AASHTO T 2459)**

Criterios para mezclas método Marshall	Tránsito liviano Carpeta y base		Tránsito mediano Carpeta y base		Tránsito pesado Carpeta y base	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35,00	35,00	50,00	50,00	75,00	75,00
Estabilidad N (lb)	336,00 (750,00)	-	5358,00 (1200,00)	-	8006,00 (1800,00)	-
Flujo, 0,25 mm (0,01 plg)	8,00	18,00	8,00	16,00	8,00	14,00
% de vacíos	3,00	5,00	3,00	5,00	3,00	5,00
% VMA	Ver tabla 2.13					
% VFA	70,00	80,00	65,00	78,00	65,00	75,00

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 414

**Tabla 3. 93 Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo**

Número de golpes			
Condición de tránsito que resultan en un diseño (millones)	Alto	Medio	Bajo
		> 10 hasta 30	Entre 0,30 hasta 30,00
Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo	75,00	50,00	35,00

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 414

Para el análisis en el desempeño mecánico de mezcla en caliente con RAP, se observan los resultados que cumplen es decir que ambos diseños sirven para tráfico liviano, mediano y pesado. Dando a conocer que los valores de la investigación a 75, 50 y 35 golpes para 0, 15, 30, 50 y 100% de RAP en todos los casos se comprueba que tiene accesibilidad para todos los traficos.

**Tabla 3. 94 Uso en los tráfico pesados, medianos y livianos**

% de asfalto	% de Rap	Tránsito pesado		Tránsito mediano		Tránsito liviano	
		Estabilidad corregida (lb)	Fluencia (0,01 pulg)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia (0,01 pulg)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
5,45	0,00	4382,94	10,00	3659,84	11,00	3008,81	10,00
5,45	15,00	4643,88	11,50	4070,18	11,75	3380,85	11,25
5,45	30,00	4194,81	11,75	3253,77	12,00	2686,88	14,00
5,45	50,00	3708,64	12,50	2997,09	14,25	2459,86	14,50
5,94	100,00	3056,08	14,00	2203,64	15,00	1819,75	15,25

Fuente: Elaboración propia

### 3.9 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA COMPACTACIÓN EN EL DESEMPEÑO MECÁNICO DE LA MEZCLA EN CALIENTE CON RAP.

Para realizar el análisis de resultados se adopta los valores medios de cada una de las variables a analizar con su respectiva compactación.

Este procedimiento se aplica a cada una de las propiedades y características de las diferentes mezclas que se diseñaron.

Análisis en el desempeño mecánico de mezcla en caliente con RAP a una compactación de 75,50 y 35 golpes, para tránsito pesado, mediano y liviano lo cual se analizaran las variables de estabilidad y fluencia.

**Tabla 3. 95 Resumen de los resultados de la estabilidad y fluencia de la mezclas asfálticas a diferentes % de RAP a una compatación de 75 golpes.**

<b>% de asfalto</b>	5,45	5,45	5,45	5,45	5,94
<b>% de Rap</b>	0,00	15,00	30,00	50,00	100,00
<b>Estabilidad corregida (lb)</b>	4382,94	4643,88	4194,81	3708,64	3056,08
<b>Fluencia (0,01 pulg)</b>	10,00	11,50	11,75	12,50	14,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 96 Resumen de los resultados de la estabilidad y fluencia de la mezclas asfálticas a diferentes % de RAP a una compatación de 50 golpes.**

<b>% de asfalto</b>	5,45	5,45	5,45	5,45	5,94
<b>% de Rap</b>	0,00	15,00	30,00	50,00	100,00
<b>Estabilidad corregida (lb)</b>	3659,84	4070,18	3253,77	2997,09	2203,64
<b>Fluencia (0,01 pulg)</b>	11,00	11,75	12,00	14,25	15,00

Fuente: Elaboración propia

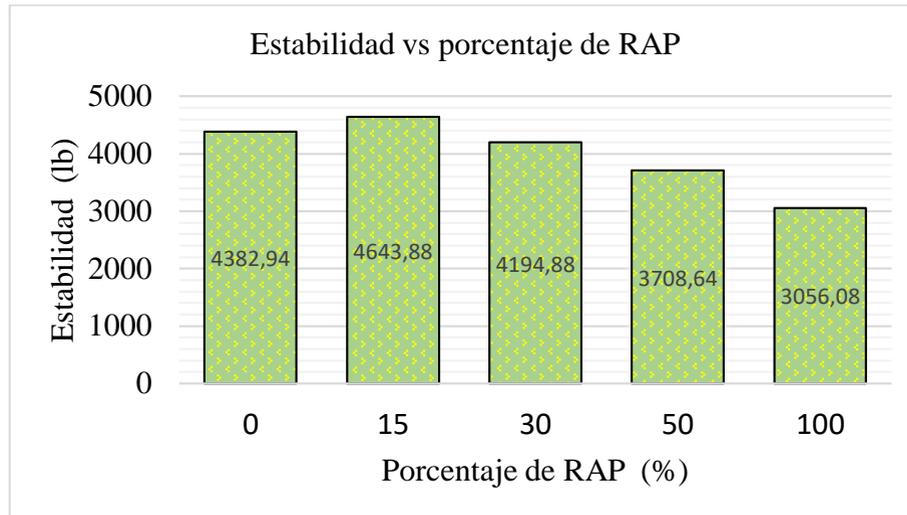
**Tabla 3. 97 Resumen de los resultados de la estabilidad y fluencia de la mezclas asfálticas a diferentes % de RAP a una compatación de 35 golpes.**

<b>% de asfalto</b>	5,45	5,45	5,45	5,45	5,94
<b>% de Rap</b>	0,00	15,00	30,00	50,00	100,00
<b>Estabilidad corregida (lb)</b>	3008,81	3380,85	2686,88	2459,86	1819,75
<b>Fluencia (0,01 pulg)</b>	10,00	11,25	14,00	14,50	15,25

Fuente: Elaboración propia

### 3.9.1 Análisis de la estabilidad del diseño de la mezcla con variación de % de RAP a una compactación de 75 golpes

**Gráfico 3.24 Comparación de estabilidades**



Fuente: Elaboración propia

#### Análisis de resultados

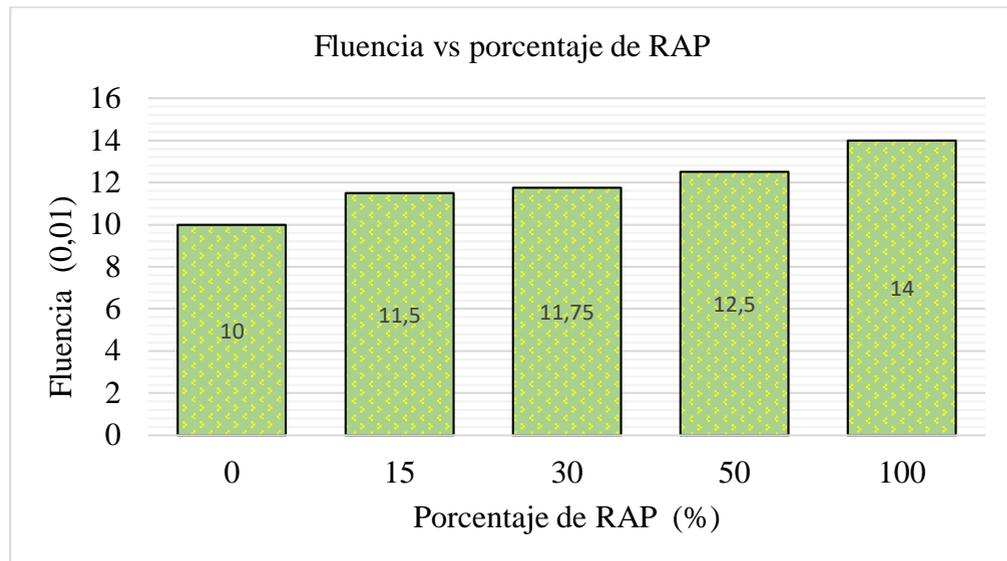
Como se puede apreciar los resultados de Estabilidad Marshall para el porcentaje óptimo del cemento asfáltico se observa que las muestras que contienen 15 %, 30 %, 50% y el 100% de RAP, además de la muestra convencional, los cuales superan el límite establecido en especificaciones, adquiriendo un valor superior 1800 lb a lo cual indica que para un Tráfico Pesado a la que será expuesta la mezcla asfáltica.

Respecto a la estabilidad se evidencia que al incremento del porcentaje de RAP se obtiene menores cantidades de estabilidad que varían de una estabilidad de 4643,88 lb a un 15% de RAP hasta una estabilidad de 3056,08 lb al 100% de RAP.

Cabe destacar, según los resultados, si se añade 15 % de RAP en una mezcla asfáltica, ésta presentará mayor estabilidad en comparación a mezclas asfálticas convencionales; esto se debe a que el RAP actúa como una mejor mezcla entre los demás áridos ya que aumenta la capacidad de carga en un valor de 260,94 lb. Lo cual esto representa un incremento de estabilidad al 5,62% en comparación con la mezcla convencional, esto quiere decir que la óptima de RAP se encuentra al 15%.

### 3.9.2 Análisis de la fluencia del diseño de la mezcla con variación de % de RAP a una compactación de 75 golpes

**Gráfico 3.25 Comparación de fluencias**



Fuente: Elaboración propia

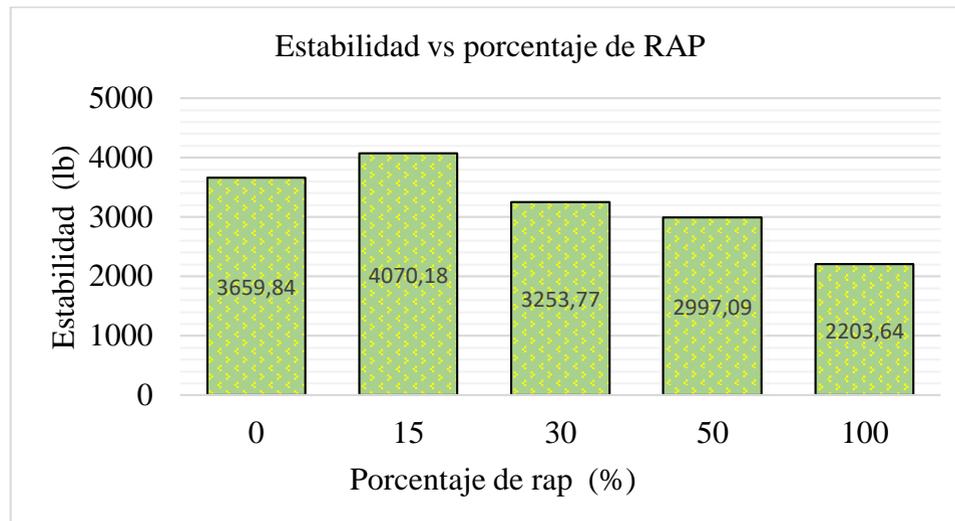
#### **Análisis de resultados**

Según el análisis de flujo en las mezclas asfálticas, se puede notar que todas las muestras a los diferentes porcentajes de RAP se encuentran con valores de flujo dentro del rango establecido por Norma que es de 8 a 14.

También es importante remarcar que la fluencia es proporcional al porcentaje de RAP es decir que a mayor porcentaje de RAP, mayor será el flujo; como también se nota que en cada uno de los casos incrementa de forma lineal hasta el 100% de RAP con un incremento de 28,57% con respecto a la mezcla convencional, esto se debe a que a mayor RAP la mezcla va siendo menos homogénea de esta manera ocasionando vacíos provocando mayor deformación.

### 3.9.3 Análisis de la estabilidad del diseño de la mezcla con variación de % de RAP a una compactación de 50 golpes

**Gráfico 3.26 Comparación de estabilidades**



Fuente: Elaboración propia

#### Análisis de resultados

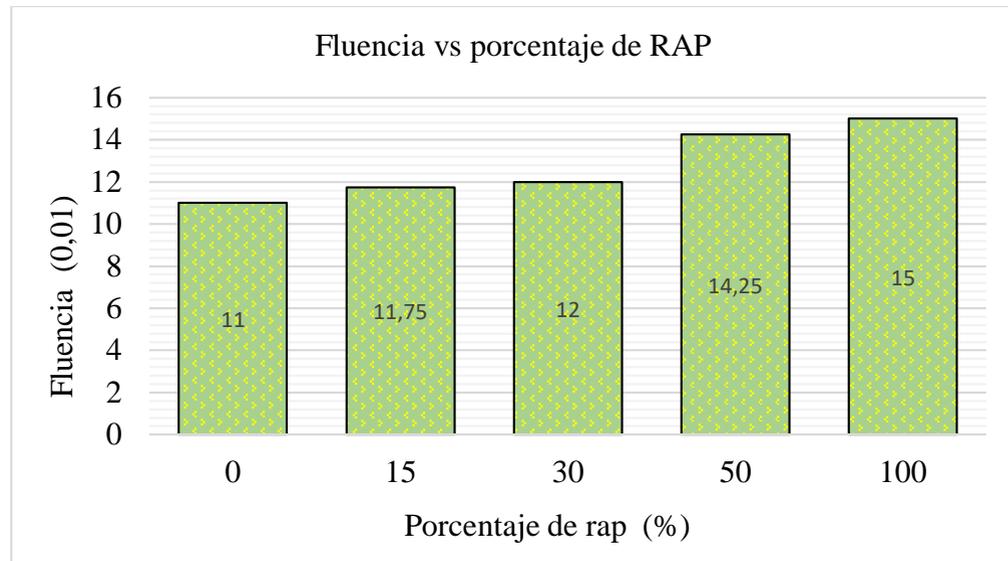
Como se puede apreciar los resultados de Estabilidad Marshall para el porcentaje óptimo del cemento asfáltico se observa que las muestras que contienen 15 %, 30 %, 50% y 100% de RAP, además de la muestra convencional, los cuales superan el límite establecido en especificaciones, adquiriendo un valor superior 1200 lb a lo cual indica que para un Tráfico mediano a la que será expuesta la mezcla asfáltica.

Respecto a la estabilidad se evidencia que al incremento del porcentaje de RAP se obtiene menores cantidades de estabilidad que varían de una estabilidad de 4070,18 lb a un 15% de RAP hasta una estabilidad de 2203,64 lb al 100% de RAP.

Cabe destacar, según los resultados, si se añade 15 % de RAP en una mezcla asfáltica, ésta presentará mayor estabilidad en comparación a mezclas asfálticas convencionales; esto se debe a que el RAP actúa como una mejor mezcla entre los demás áridos ya que aumenta la capacidad de carga en un valor de 410,34 lb. Lo cual esto representa un incremento de estabilidad al 10,08% en comparación con la mezcla convencional, esto quiere decir que la óptima de RAP se encuentra al 15%.

### 3.9.4 Análisis de la fluencia del diseño de la mezcla con variación de % de RAP a una compactación de 50 golpes

**Gráfico 3.27 Comparación de fluencias**



Fuente: Elaboración propia

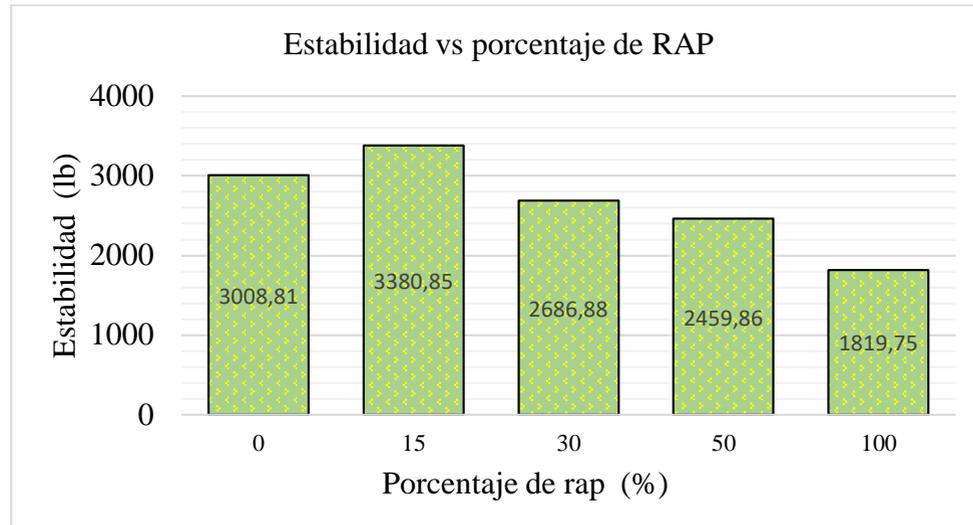
#### **Análisis de resultados**

Según el análisis de flujo en las mezclas asfálticas, se puede notar que todas las muestras a los diferentes porcentajes de RAP se encuentran con valores de flujo dentro del rango establecido por Norma que es de 8 a 16.

También es importante remarcar que la fluencia es proporcional al porcentaje de RAP es decir que a mayor porcentaje de RAP, mayor será el flujo; como también se nota que en cada uno de los casos incrementa de forma lineal hasta el 100% de RAP con un incremento de 26,67% con respecto a la mezcla convencional, esto se debe a que a mayor RAP la mezcla va siendo menos homogénea de esta manera ocasionando vacíos provocando mayor deformación.

### 3.9.5 Análisis de la estabilidad del diseño de la mezcla con variación de % de RAP a una compactación de 35 golpes

**Gráfico 3.28 Comparación de estabilidades**



Fuente: Elaboración propia

#### **Análisis de resultados**

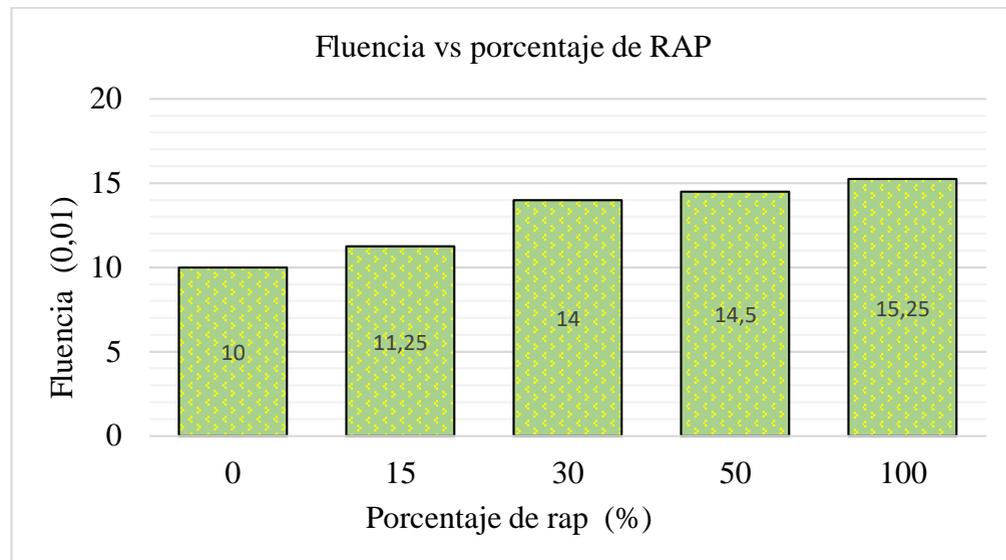
Como se puede apreciar los resultados de Estabilidad Marshall para el porcentaje óptimo del cemento asfáltico se observa que las muestras que contienen 15 %, 30 %, 50% y 100% de RAP, además de la muestra convencional, los cuales superan el límite establecido en especificaciones, adquiriendo un valor superior 750 lb a lo cual indica que para un Tráfico liviano a la que será expuesta la mezcla asfáltica.

Respecto a la estabilidad se evidencia que al incremento del porcentaje de RAP se obtiene menores cantidades de estabilidad que varían de una estabilidad de 3380,85 lb a un 15% de RAP hasta una estabilidad de 1819,75 lb al 100% de RAP.

Cabe destacar, según los resultados, si se añade 15 % de RAP en una mezcla asfáltica, ésta presentará mayor estabilidad en comparación a mezclas asfálticas convencionales; esto se debe a que el RAP actúa como una mejor mezcla entre los demás áridos ya que aumenta la capacidad de carga en un valor de 372,04 lb. Lo cual esto representa un incremento de estabilidad al 11% en comparación con la mezcla convencional, esto quiere decir que la óptima de RAP se encuentra al 15%.

### 3.9.6 Análisis de la fluencia del diseño de la mezcla con variación de % de RAP a una compactación de 35 golpes

Gráfico 3.29 Comparación de fluencias



Fuente: Elaboración propia

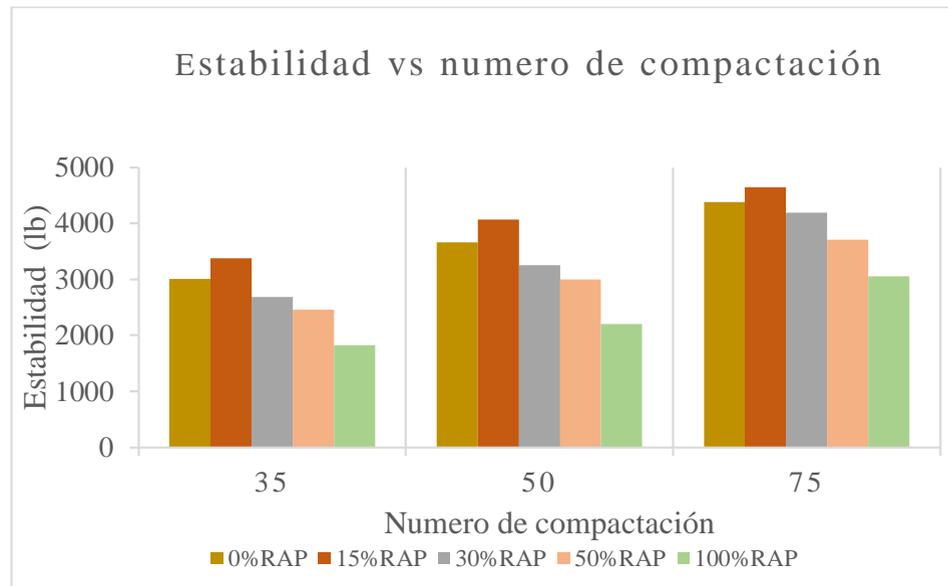
#### Análisis de resultados

Según el análisis de flujo en las mezclas asfálticas, se puede notar que todas las muestras a los diferentes porcentajes de RAP se encuentran con valores de flujo dentro del rango establecido por Norma que es de 8 a 18.

También es importante remarcar que la fluencia es proporcional al porcentaje de RAP es decir que a mayor porcentaje de RAP, mayor será el flujo; como también se nota que en cada uno de los casos incrementa de forma lineal hasta el 100% de RAP con un incremento de 34,42% con respecto a la mezcla convencional, esto se debe a que a mayor RAP la mezcla va siendo menos homogénea de esta manera ocasionando vacíos provocando mayor deformación.

### 3.9.7 Análisis de la influencia de la compactación en el diseño de la mezcla con variación de porcentaje de RAP

**Gráfico 3.30 Influencia de la compactación en la mezcla con variación de % RAP**



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados de la estabilidad con su respectivo porcentaje de RAP se puede apreciar que a medida que se aumenta la compactación la estabilidad tiende a subir de forma lineal, es decir que a mayor compactación la estabilidad es mayor y si la compactación disminuye la estabilidad tiende a bajar, lo cual quiere decir que tiene una menor resistencia a la deformación.

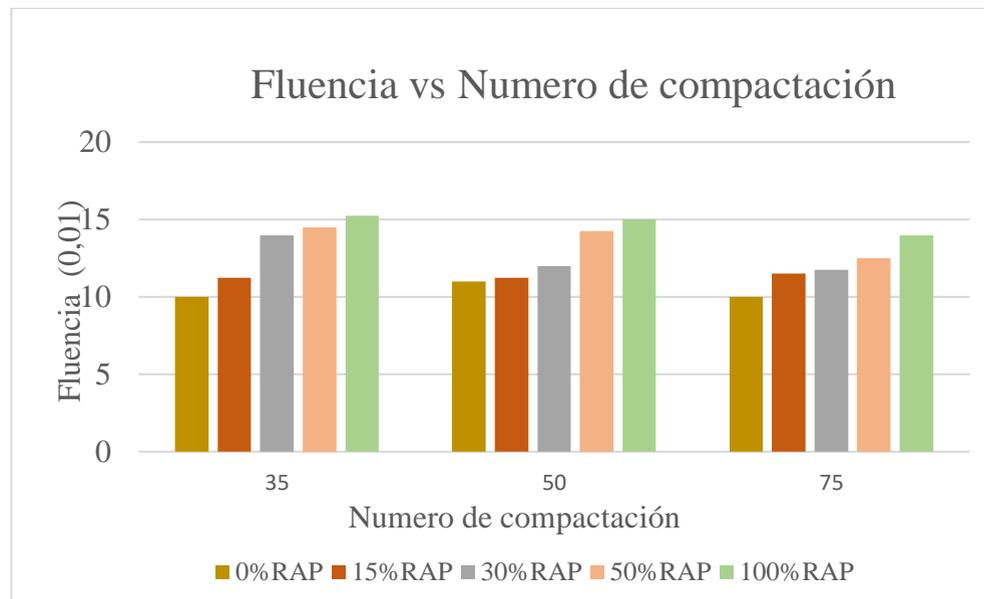
Como también se observa que en el 15% de RAP a una compactación de 75 golpes, aún tienen un valor importante de resistencia a la deformación y calidad al utilizar mezcla reciclada ya que el esqueleto mineral del RAP se ha convertido más fuerte lo cual tiene mayor estabilidad, como se puede observar a los 75 golpes una estabilidad de 4643,88 lb.

En comparación con una mezcla asfáltica convencional se puede observar una diferencia con respecto a un 15% de RAP ya que al incrementar material reciclado nos conforma una mejor mezcla, al combinar estos materiales lo cual hace que se incremente menos material natural y así de esta manera también reutilizar, como también cabe notar que al incrementar

mayor % de RAP no conviene ya que tiende a ya no ser una mejor mezcla como se observa a los 30%, 50 % y 100 % de RAP.

### 3.9.8 Análisis de la fluencia de la compactación en el diseño de la mezcla con variación de porcentaje de RAP

**Gráfico 3.31 Influencia de la compactación en la mezcla con variación de % RAP**



Fuente: Elaboración propia

Se observa que la incorporación del RAP en la mezcla generada por otro tipo de material que no coincide con el tipo de material que la nueva, una mayor posibilidad de vacíos lo que genera una mayor deformación conforme a la compactación.

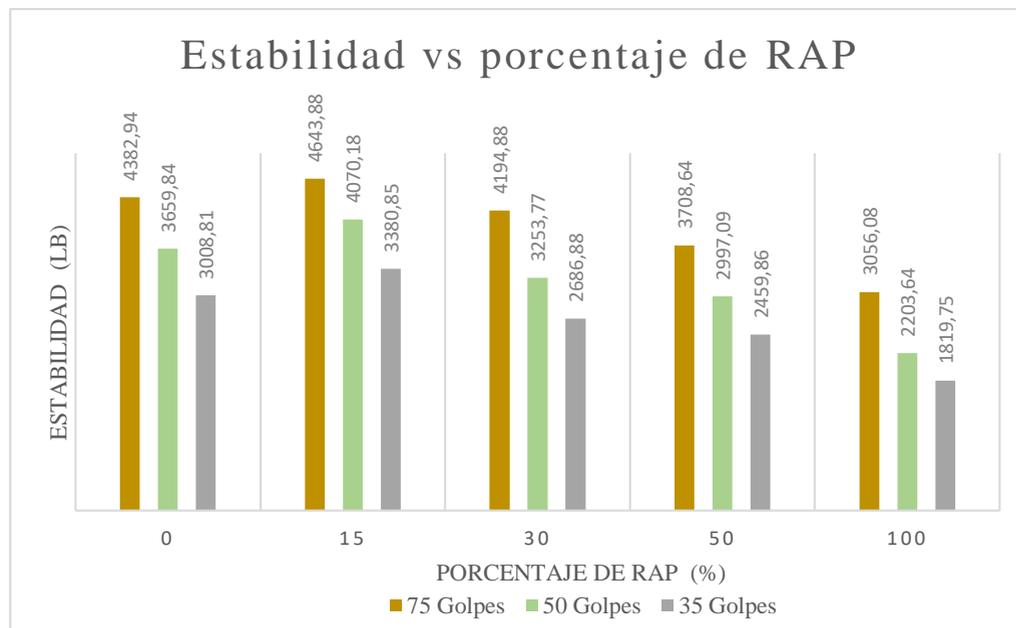
También se observa la mezcla compactada a 75 golpes para un 50% de RAP tiene una mayor deformación en comparación con la mezcla convencional.

### 3.10 JUSTIFICACIÓN RECIBIDA DE LOS PORCENTAJES EMPLEADOS DE RAP

No existe en la actualidad un modelo estandarizado y/o normalizado para diseñar mezclas recicladas en caliente cuando se utilice el RAP como aditivo reciclado en el diseño y ejecución de las mezclas asfáltica en caliente. Se debe aclarar que los porcentajes de Rap aplicados fueron tomados como experimentales, como así también son sus resultados quienes avalan nuestro procedimiento.

Se procedió a efectuar un análisis de la influencia de la compactación en el diseño de la mezcla con variación de porcentaje de RAP

**Gráfico 3. 32 Estabilidad vs Porcentajes de RAP**



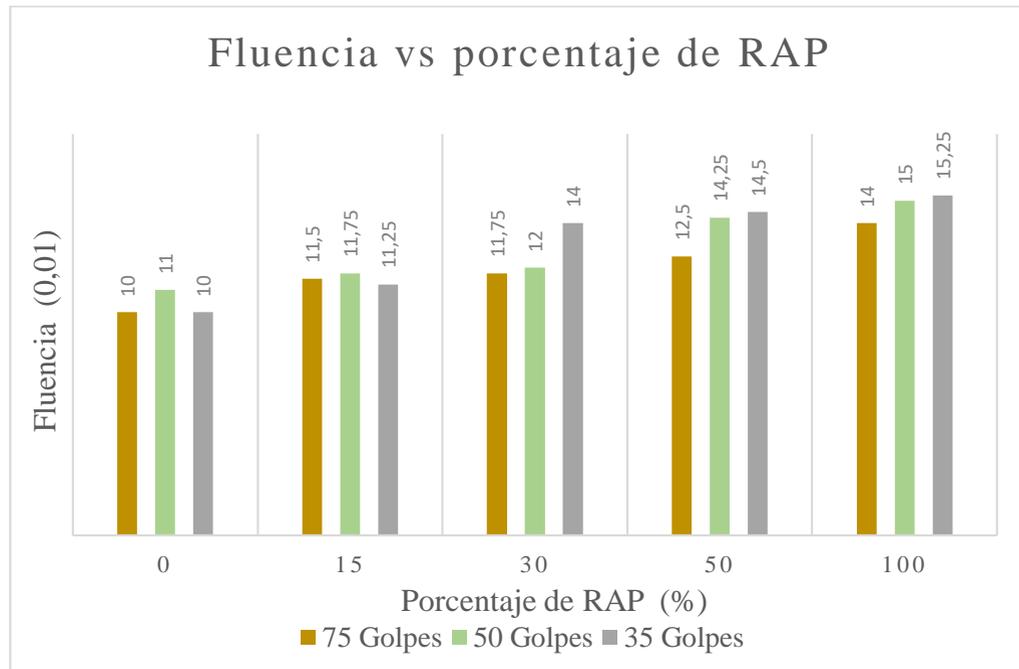
Fuente: Elaboración propia

Empleando las gráficas finales de comparación Estabilidad, Numero de compactación y Porcentaje de RAP empleado, nos muestra de manera directa un panorama claro del comportamiento global de nuestra investigación, donde a la vez podemos observar que de manera general que, el porcentaje de rap aplicado del 15% expone resultados notoriamente eficientes ya sea en estabilidad para los diversos números de compactación expuestos, siendo este porcentaje del 15% de RAP el ideal ya que cumple los parámetros de costo/eficiencia sobre las otras opciones planteadas (0% RAP, 30% RAP, 50% RAP Y

100% RAP), recalando que los porcentajes de rap empleados son meramente experimentales, siendo los resultados los que respaldan su eficiencia en sí.

Así también, se procedió a efectuar un análisis de la Fluencia de la compactación en el diseño de la mezcla con variación de porcentaje de RAP

**Gráfico 3. 33 Fluencia vs Porcentajes de RAP**



Fuente: Elaboración propia

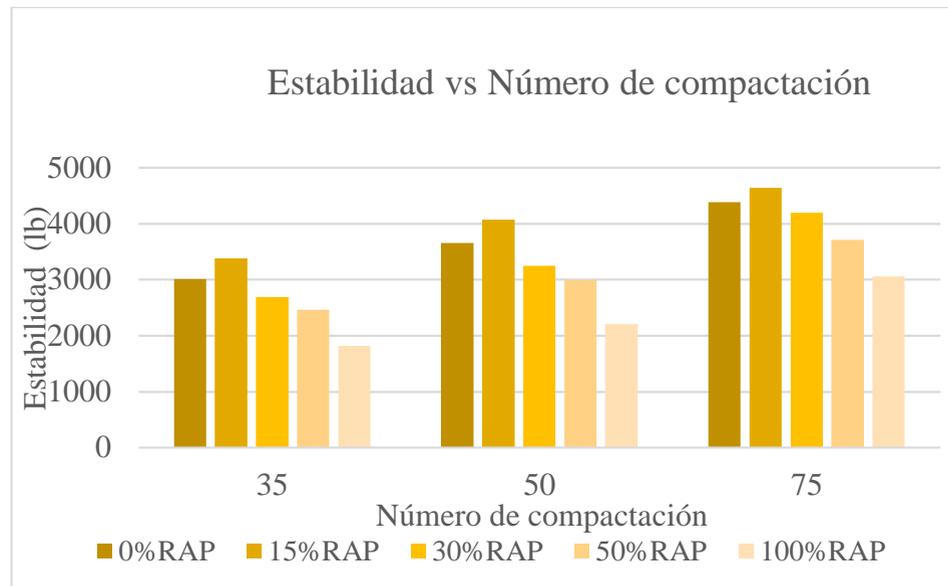
Al evaluar conceptos de fluencia o deformación en nuestros resultados mostrados en la gráfica, se demuestra que los porcentajes de RAP tomados como experimentales, nos indican que a mayor número de compactación menor deformación aparente, distinguiéndose el porcentaje de 15% RAP, obviamente tolerando hasta los límites de una deformación elástica de la carpeta asfáltica en caliente. Mostrando los porcentajes 30% RAP, 50% RAP y 100% RAP mayores deformaciones que hasta cierto punto podrían considerarse irreversibles, por tanto, dañinas a la estabilidad de nuestra carpeta asfáltica en caliente.

Como también podríamos decir que al 100% de RAP saldría más barato económicamente y por el lado técnico es que no quiero que baje la estabilidad.

### 3.11 JUSTIFICACIÓN RECIBIDA DE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN EMPLEADA

Se procedió a efectuar un análisis de la influencia de la compactación en el diseño de la mezcla con variación de porcentaje de RAP

**Gráfico 3. 34 Estabilidad vs compactación**

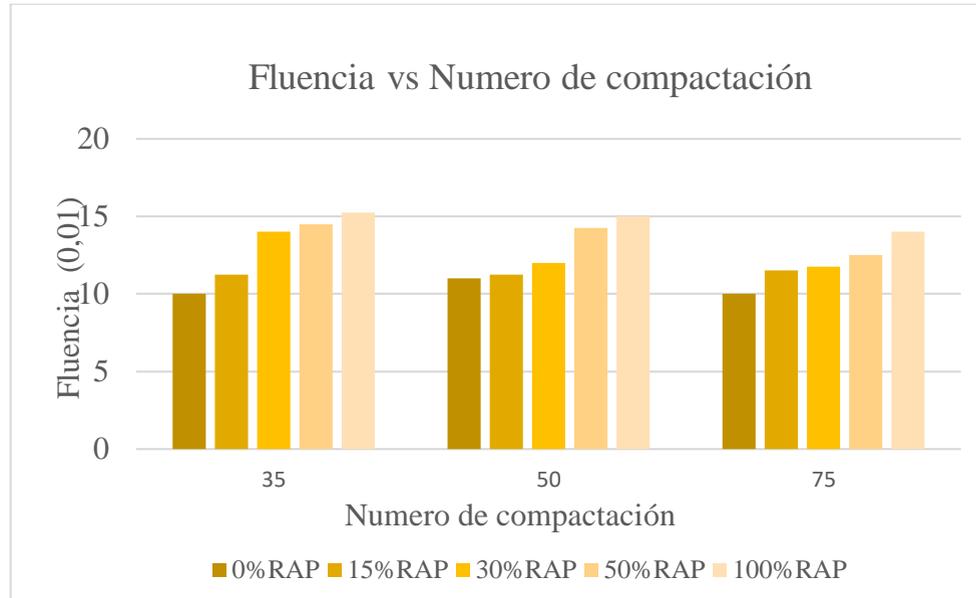


Fuente: Elaboración propia

Adentrándonos en el tema de las diferentes energías de compactación empleadas, debemos ser claros que son estándares normalizados, más allá técnicamente demostramos su exactitud al poder observar que al analizar la Estabilidad, número de compactación y porcentaje de RAP empleado; se demuestra que el número de compactación de 75 golpes presenta una mayor estabilidad en nuestra carpeta asfáltica consecuentemente siendo la opción más eficiente cuando se aplica el 15% de RAP. Siendo directamente proporcional el concepto a mayor número de compactación menor porcentaje de vacíos en las briquetas estudiadas.

Así también, se procedió a efectuar un análisis de la Fluencia de la compactación en el diseño de la mezcla con variación de porcentaje de RAP

**Gráfico 3. 35 Fluencia vs compactación**



Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista de deformación, nuevamente resaltamos que las energías de compactación empleadas son normalizadas, técnicamente se justifica que a mayor número de compactación menor deformación en nuestra carpeta asfáltica, cumpliendo también el concepto a mayor número de compactación menor porcentaje de vacíos en las briquetas estudiadas. Estas afirmaciones pasan de ser experimentales a ser respaldadas por resultados acordes a lo establecido en normas estandarizadas.

### 3.12 ANÁLISIS DE PRECIOS DE PRODUCCIÓN PARA DIFERENTE MEZCLA ASFÁLTICA

**Tabla 3. 98 Precio unitario para 1m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica convencional**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
Proyecto de Grado				Actividad N° 1	
Actividad:	<b>Carpeta de concreto asfaltico C.A (85-100)</b>			Cantidad :	<b>1,00</b>
Unidad :	<b>m3</b>			Moneda.	Bs
Descripcion	Unidad	Cantidad o Rendimiento	Precio Unitario	Costo Total	
<b>1 Materiales</b>					
1	Grava triturada de 3/4"	m <sup>3</sup>	0,240	150,00	36,00
2	Grava triturada de 3/8"	m <sup>3</sup>	0,200	150,00	30,00
3	Arena triturada	m <sup>3</sup>	0,370	125,00	46,25
4	Cemento asfaltico	kg	130,10	8,40	1092,84
5	Diesel	lt	18,00	3,74	67,32
<b>Total Materiales</b>					<b>1272,41</b>
<b>2 Mano de Obra</b>					
1	Ayudante de operador	hr	0,03	16,00	0,45
2	Capataz	hr	1,80	25,00	45,00
3	Operador de equipo pesado	hr	0,82	20,00	16,40
4	Operador de equipo liviano	hr	0,08	18,00	1,48
5	Operador de planta	hr	0,09	23,19	2,09
6	Obrero	hr	0,07	12,07	0,87
7	Chofer	hr	0,00	18,00	0,02
Sub total mano de obra					66,30
Cargas Sociales 65% del sub total M. O.				65,00	43,09
Impuestos IVA M.O. = 14,94% (del Sub Total de M. O. + Cargas Sociales)				14,94	16,34
<b>Total Mano de Obra</b>					<b>125,74</b>
<b>3 Equipo, Maquinaria y Herramientas</b>					
1	Compactador rodillo liso	hr	0,035	303,85	10,63
2	Escoba mecanica autop	hr	0,028	71,55	2,00
3	Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	965,23	86,87
4	Compactador neumatico Tsp 1000	hr	0,084	332,81	27,96
5	Terminadora de asfalto	hr	0,075	669,06	50,18
6	Cargador frontal de ruedas = 950 m <sup>3</sup>	hr	0,0001	421,29	0,04
7	Volqueta=12 m <sup>3</sup>	hr	0,001	227,87	0,23
Herramientas Menores 5 % de la mano de obra				5,00	6,29
<b>Total Eq, Maq. y Herr.</b>					<b>184,20</b>
<b>4 Gastos Generales y Adminsitrativos</b>					
Gastos Generales 10% (1+2+3)					158,23
<b>5 Utilidad</b>					
Utilidad 10% (1+2+3+4)					174,06
<b>6 Impuestos</b>					
Impuestos I. T. 3,09% (1+2+3+4+5)					59,16
<b>Total Item Precio Unitario</b>					<b>1973,80</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 99 Precio unitario para 1m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica al 15% de RAP**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Proyecto de Grado			Actividad N° 4	
Actividad:	<b>Carpeta de concreto asfáltico C.A (85-100) al 15% Rap</b>		Cantidad :	<b>1.00</b>
Unidad :	<b>m<sup>3</sup></b>		Moneda.	<b>Bs</b>
Descripcion	Unidad	Cantidad o Rendimiento	Precio Unitario	Costo Total
<b>1 Materiales</b>				
1	Grava triturada de 3/4"	m <sup>3</sup>	0,203	30,45
2	Grava triturada de 3/8"	m <sup>3</sup>	0,171	25,65
3	Arena triturada	m <sup>3</sup>	0,313	39,13
4	RAP	m <sup>3</sup>	0,044	1,41
5	Cemento asfáltico	kg	107,71	904,76
6	Diesel	lt	30,00	112,20
<b>Total Materiales</b>				<b>1113,60</b>
<b>2 Mano de Obra</b>				
1	Ayudante de operador	hr	0,03	0,45
2	Capataz	hr	1,80	45,00
3	Operador de equipo pesado	hr	0,82	16,40
4	Operador de equipo liviano	hr	0,08	1,48
5	Operador de planta	hr	0,09	2,09
6	Obrero	hr	0,07	0,87
7	Chofer	hr	0,00	0,02
Sub total mano de obra				66,30
Cargas Sociales 65% del sub total M. O.				43,09
Impuestos IVA M.O. = 14,94% (del Sub Total de M. O. + Cargas Sociales)				16,34
<b>Total Mano de Obra</b>				<b>125,74</b>
<b>3 Equipo, Maquinaria y Herramientas</b>				
1	Compactador rodillo liso	hr	0,035	10,63
3	Escoba mecanica autop	hr	0,028	2,00
4	Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	86,87
5	Compactador neumatico Tsp 1000	hr	0,084	27,96
6	Terminadora de asfalto	hr	0,075	50,18
7	Cargador frontal de ruedas	hr	0,0001	0,04
8	Volqueta=12 m <sup>3</sup>	hr	0,001	0,23
Herramientas Menores 5 % de la mano de obra				6,29
<b>Total Eq, Maq. y Herr.</b>				<b>184,20</b>
<b>4 Gastos Generales y Adminsitrativos</b>				
Gastos Generales 10% (1+2+3)				142,35
<b>5 Utilidad</b>				
Utilidad 10% (1+2+3+4)				156,59
<b>6 Impuestos</b>				
Impuestos I. T. 3,09% (1+2+3+4+5)				53,22
<b>Total Item Precio Unitario</b>				<b>1775,70</b>

Fuente: Elaboración propia

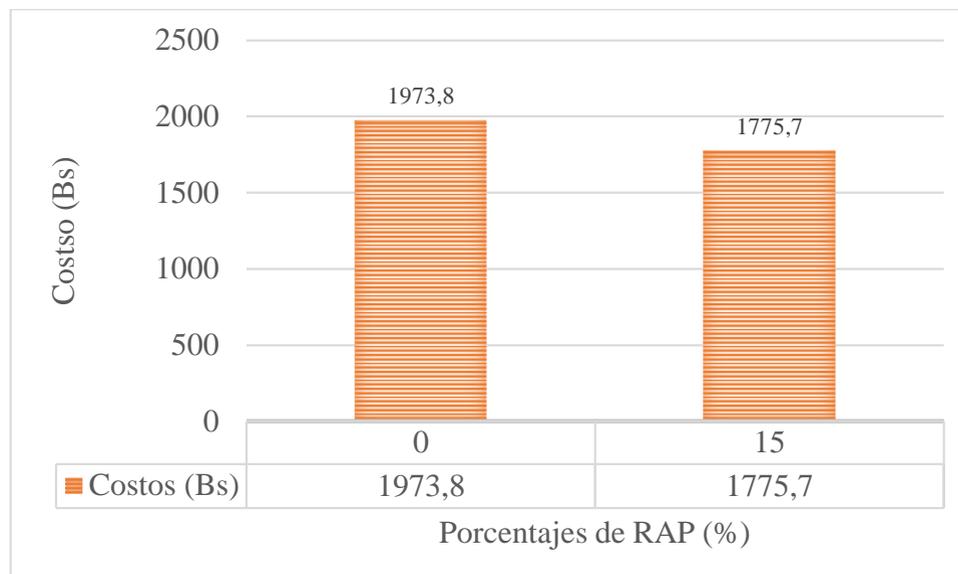
## Análisis de resultado de costos

**Tabla 3. 100 Diferencia de Costo**

Identificación	Costo (Bs/m <sup>3</sup> )
Mezcla asfáltica C.A (85-100)	1973,80
Mezcla asfáltica al 15 % de Rap C.A (85-100)	1775,70

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.36 Comparación de Costo**



Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar es preciso tener en cuenta que el costo de producción es uno de los indicadores importantes a considerar en los proyectos de ingeniería. Por lo tanto, mientras más eficiente sea la labor de éstas, menos recursos se invertirán en su producción y por consiguiente, menor será la cuantía de los gastos.

Para el análisis comparativo del presupuesto de la mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica con la incorporación del 15 % de Rap, se puede observar que el costo de las mezclas asfálticas con Rap es menor en un 10,03% con respecto al costo de una mezcla convencional, esto debido al utilizar material reciclado.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

- Se realizó los ensayos a los agregados gruesos, finos, material reciclado y como también al cemento asfáltico, lo cual demuestran que son de buena calidad y, por lo tanto, aptos para la elaboración de mezclas asfálticas al cumplir con las especificaciones que corresponden a cada ensayo de esta investigación.
- Se realizó el diseño de las mezclas asfálticas empleando el método de diseño Marshall, del cual se obtuvo las propiedades y sus características, a fin de determinar el porcentaje de cemento óptimo cuyo valor es 5,45 % Betunel (85-100), para luego utilizarlo en la mezcla con diferente porcentaje de RAP a diferentes compactaciones.
- Es importante resaltar que el análisis de estabilidad de las mezclas asfálticas estudiadas con RAP, se puede establecer que los mejores comportamientos se producen al 15 % de RAP, donde se incrementa 5,62% más que una mezcla asfáltica convencional C.A Betunel (85-100) para un tráfico pesado, un 10,08% para tráfico mediano y 11% para tráfico liviano.
- Para la variable fluencia en las mezclas asfálticas en cada uno de los diseños se incrementa de forma lineal cada vez que se va incorporando porcentajes de RAP, para la mezcla convencional (85-100), con valores de flujos dentro del rango establecido de 8 a 14 para tráfico pesado, 8-16 tráfico medio y 8-18 tráfico liviano.
- Se evidencia que a mayor compactación se obtiene mayor estabilidad es decir mayor resistencia a diferencia de 50 y 35 golpes, como también a mayor porcentaje de RAP menor estabilidad debido que la mezcla genera otro tipo de material que no coincide con el tipo de materia que la nueva, una mayor posibilidad de vacíos lo que genera una mayor deformación.
- Finalmente, se concluye que al utilizar el 15% de RAP en la mezcla a una compactación dada, aún tiene un valor importante de resistencia a la deformación

ya que el esqueleto mineral del rap se ha convertido más fuerte lo cual tiene mayor estabilidad como también no es favorable la utilización de RAP en porcentajes mayores al 15 %, ya que al incrementar su porcentaje, la estabilidad tiende a disminuir y los valores de fluencia a aumentar.

- En el análisis de costo se verifica que existe un ahorro económico del 10,03% con respecto a una mezcla convencional utilizando un 15% de Rap, como también la reducción de residuos tóxicos y de volúmenes de carpetas asfálticas deterioradas, por lo cual conlleva a una menor contaminación ambiental y así menor explotación de los bancos de aridos.
- De acuerdo a la hipótesis se concluye que, si diseñamos una mezcla asfáltica utilizando rap, sus propiedades cumplen con las especificaciones de diseño, lo cual este material puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas en condiciones de resistencia y calidad.

#### **4.2 RECOMENDACIONES**

- Para determinar el contenido inicial de cemento asfáltico se recomienda tomar en cuenta el método de distribución de tamaños de partícula del libro de Crespo Vállalas, siendo que se resultó más práctico.
- Realizar los ensayos a los agregados a ser utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas para conocer su calidad y propiedades, además de comprobar si cumplen con los requerimientos para su empleo.
- En la elaboración de las briquetas controlar las temperaturas especificadas tanto en el calentamiento de los agregados como en la mezcla de los mismos y en la compactación respectiva.
- Realizar el mezclado de los agregados con el cemento asfáltico de la manera más homogénea posible para evitar la variabilidad de los resultados de la mezcla en los distintos ensayos que se realicen.

- Compactar las briquetas con el número de golpes requerido según las especificaciones del tipo de tráfico, con los equipos y según el procedimiento descrito del Ensayo Marshall.
- Dar mantenimiento al equipo de Marshall para compactación, y sobre todo a la prensa debido a la calibración, al igual ser muy cuidadoso al momento de trabajar con mezclas asfálticas, ya que se trabaja a altas temperaturas, se debe utilizar el equipo de seguridad necesario para la manipulación de los materiales.
- Se recomienda profundizar el estudio de ampliando al campo de la investigación más a detalle sobre el comportamiento de las propiedades de la mezcla asfáltica utilizando RAP, ya que es un método aun no aplicado en nuestra ciudad, lo cual debe ser factible y sobre todo con el fin de proteger el medio ambiente.