

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN:

Se han venido implementando cada vez nuevas ideas que permitan el desarrollo del mejoramiento de los pavimentos, es por esto que surge el estudio de investigación sobre adición de residuos de caucho para asfaltos, como una forma de mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas y dar solución a ciertos inconvenientes que actualmente se presentan.

La mezcla asfáltica con la adición de residuo de caucho es una técnica relativamente nueva en su uso para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas. Lo que al ser complementado con un análisis beneficio-costos permita concluir sobre las bondades en el uso del caucho molido como mejorador de mezclas asfálticas.

El caucho es obtenido de forma económicamente viable usando llantas desechadas las cuales deben ser molidas hasta obtener tamaños apropiados, resolviendo de paso el problema ambiental que estos generan al finalizar su vida útil.

Este caucho reciclado puede ser adicionado a las mezclas asfálticas mediante dos procesos, mezclándolo con el ligante o proceso húmedo, y mezclándolo con los agregados o proceso seco.

Con este estudio se pretende poder determinar el comportamiento de la resistencia del pavimento flexible con la adición de residuo de caucho para reducir deterioros, fisuras, desgastes, etc. Se pretende satisfacer la estabilidad Marshall para el diseño del pavimento con algunas modificaciones al reemplazar en porcentaje los agregados por el residuo de caucho para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

El costo de la construcción del pavimento flexible es elevado, por este motivo también se pretende justificar el reemplazo del agregado por el residuo de caucho, para reducir

el costo final y optimizar los recursos económicos. Además, esta técnica pretende dar solución a los problemas prematuros en fallas de los pavimentos flexibles, que en la actualidad es una necesidad muy importante contar con buenas vías, caminos y carreteras, que además de comfortable contribuyan al desarrollo social económico y ambiental del país.

### **1.1. ANTECEDENTES**

En los últimos años el mundo está cada vez más contaminado y con un deterioro creciente en el medio ambiente, la preservación de los recursos naturales se ha convertido en una preocupación general de todos los sectores productivos del mundo. Las mezclas asfálticas con la adición de residuo de caucho fueron y siguen siendo investigadas en su aplicación.

Algunos estudios iniciales en la década de los cincuenta luego de la Segunda Guerra Mundial, realizaron la construcción de tramos experimentales incorporando caucho triturado con el objeto de aprovechar su flexibilidad y lograr una superficie del pavimento eficiente y duradera, obteniendo resultados que proporcionaban pequeños o nulos beneficios en un pavimento asfáltico modificado con un menor costo y una vida de servicio más larga.

En los años 60 ingenieros suecos emplearon este tipo de mezclas para mejorar las condiciones de vialidad invernal corta que la de un convencional.

Y en la actualidad se realiza un estudio contratado por El Instituto de Desarrollo Urbano, IDU, con la Universidad de Los Andes como parte de un programa de investigación para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas que se colocan en la ciudad de Bogotá.

### **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Se conoce el problema de sus depósitos de neumáticos de caucho en distintos países y la gran demanda de éstos como residuos, y la proliferación de enfermedades e insectos que se generan en ellos. Por estos motivos, y aprovechando las nuevas tecnologías en

maquinaria de fabricación de ligantes asfálticos, es que se vio la necesidad de estudiar la incorporación del residuo de neumáticos en ligantes asfálticos.

Resulta provechoso este estudio, ya que los materiales a ser analizados son de fácil acceso, el propósito en general es de mejorar el funcionamiento de los pavimentos flexibles y sean seguros para el usuario, con un buen control de calidad a los materiales de construcción a ser utilizados en el medio.

El área de investigación principal es netamente experimental en mezclas asfálticas en caliente, donde intervienen diferentes materiales como ser agregado chancado, arena natural, cemento asfáltico 85-100 y en este caso Caucho de llantas usadas; donde se evaluaron los resultados obtenidos en laboratorio.

Esta investigación tiene como finalidad proponer que, mediante el empleo en diferentes porcentajes de residuo de caucho en reemplazo del agregado para la elaboración de mezclas asfálticas, presenten un buen comportamiento aumentando la resistencia con un costo menor al convencional.

### **1.3.DISEÑO TEÓRICO**

#### **1.3.1. Planteamiento del Problema**

##### **1.3.1.1. Situación Problémica**

Los pavimentos flexibles son aquéllos que resisten la carga de los vehículos transfiriendo y distribuyendo las cargas hacia las capas estructurales inferiores. Las capas asfálticas se deforman debido a la acción del tránsito, pero recuperan mayormente su forma original ante el cese de la sollicitación.

El principal problema en el pavimento flexible es el rápido deterioro debido al mal uso de sus propiedades al no tener un estudio minucioso de sus características que afectan directamente en el comportamiento de las mezclas asfálticas y que provoca: desgaste, hundimiento, exudación, agrietamiento, corrugación, ahuellamiento, meteorización de los agregados, lavado de finos lo cual provoca deterioro no progresivo.

Por lo descrito anteriormente es necesario analizar técnicamente y económicamente las mezclas asfálticas con la inclusión de residuo de caucho en diferentes porcentajes y que además cumpla con las especificaciones técnicas de la ABC.

### **1.3.1.2. Determinación del Problema**

¿Cómo un análisis del comportamiento de una mezcla asfáltica combinada con Residuo de Caucho, nos puede brindar una valoración Técnico Económico?

## **1.4.OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo General**

Analizar técnica y económicamente la adición óptima de residuo de caucho en reemplazo de los agregados para obtener las características de las mezclas asfálticas, así poder comparar y satisfacer la estabilidad Marshall.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Analizar la información teórica de aplicación de residuo de caucho en mezclas asfálticas.
- Determinar las propiedades físico mecánicas de los materiales para la elaboración de un pavimento flexible convencional (patrón).
- Elaborar briquetas de mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de residuo de Caucho (llantas en desuso trituradas) en reemplazo de los agregados.
- Analizar y comparar el desempeño de las mezclas asfálticas con la adición del residuo de caucho versus las mezclas asfálticas convencionales.
- Determinar la incidencia en el costo de una mezcla asfáltica con la inclusión de residuos de caucho versus una mezcla asfáltica convencional.
- Establecer conclusiones y recomendaciones

## **1.5. HIPÓTESIS**

Si aplicamos diferentes porcentajes de residuo de caucho (llantas en desuso) en las mezclas asfálticas permitirá obtener una mezcla asfáltica con mejores características que cumplan con las especificaciones técnicas para pavimentos flexibles a menor costo.

## 1.6.DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

### 1.6.1. Variable independiente

- Porcentajes de residuo de caucho (llantas trituradas en desuso) en las mezclas asfálticas.

### 1.6.2. Variable Dependiente

- Mezcla asfáltica, Estabilidad (Marshall).

### 1.6.3. Conceptualización y Operacionalización de Variables

**Tabla 1.1.** Conceptualización y Operacionalización de Variables

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor Acción
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>  Porcentaje de residuos de Caucho (llantas en desuso trituradas) en las mezclas asfálticas.	Se refiere a los distintos porcentajes de residuo de caucho (llantas en desuso trituradas), que se adicionarán a las mezclas asfálticas convencionales.	Agregado de aportación	Caracterización	Granulometría
				Densidad
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>  Estabilidad (Marshall)	Se refiere a los parámetros, que caracterizan a la resistencia de una mezcla asfáltica.	Agregados de aportación	Caracterización	Granulometría
				Peso Específico
				Desgaste de los Angeles
				Equivalente de Arena
		Mezcla asfáltica	Mezcla Asfáltica Convencional	<b>Ensayos Método Marshall</b>

			Mezcla Asfáltica con 4 (1,2,3y 4) porcentajes de Residuos de Caucho en reemplazo de los agregados (llanta en desuso triturada)	
--	--	--	--	--

*Fuente: Elaboración Propia*

## 1.7.DISEÑO METODOLÓGICO

### 1.7.1. Componentes

#### 1.7.1.1. Unidades de Estudio y Decisión Muestral

#### 1.7.1.2. Unidad de Estudio

- El comportamiento de las mezclas asfálticas combinadas.

#### 1.7.1.3. Población

**Figura 1.1** Población



#### 1.7.1.4. Muestra

- Residuo de Caucho de llantas en desuso.

### **1.7.1.5. Muestreo**

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

## **1.8. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

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

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

Se estudiará todos los ensayos necesarios para la caracterización del asfalto, agregados y el residuo de caucho.

- **Técnicas de Muestreo**

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

- **Ensayos previos a realizar**

Los agregados de aportación se obtendrán del acopio de la planta de asfaltos del SEDECA de la Ciudad de Tarija, ubicada en la comunidad de San José de Charaja, que éste a su vez tiene como banco a la chancadora de Charaja.

El betún tiene procedencia del país de Brasil y será proporcionado por la planta de asfaltos del SEDECA de la Provincia Cercado del Departamento de Tarija.

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

**Tabla 1.2** Cantidad de ensayos de caracterización

<b>Asfalto Convencional</b>	<b>Penetración</b>	<b>Ductilidad</b>	<b>Viscosidad</b>	<b>P.de Ablandamiento</b>	<b>P.de Inflamación</b>	<b>Peso Específico</b>
	✕	✕	✕	✕	✕	✕
<b>Agregados</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Porcentaje De Caras Fracturadas</b>	<b>Equivalente De Arena</b>	<b>Desgaste de los Angeles</b>	<b>Peso Específico</b>	<b>Límites de Atterberg</b>
	✕	✕	✕	✕	✕	✕

<b>Residuo del Caucho</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Densidad</b>	<b>Adherencia</b>
	✕	✕	✕

El número de briquetas que se necesitarán para realizar los ensayos de Resistencia de la estabilidad Marshall, con la adición de diferentes porcentajes de residuo de caucho son los siguientes como se muestra en la tabla.

**Tabla 1.3** Cantidad de ensayos de resistencia de la estabilidad Marshall

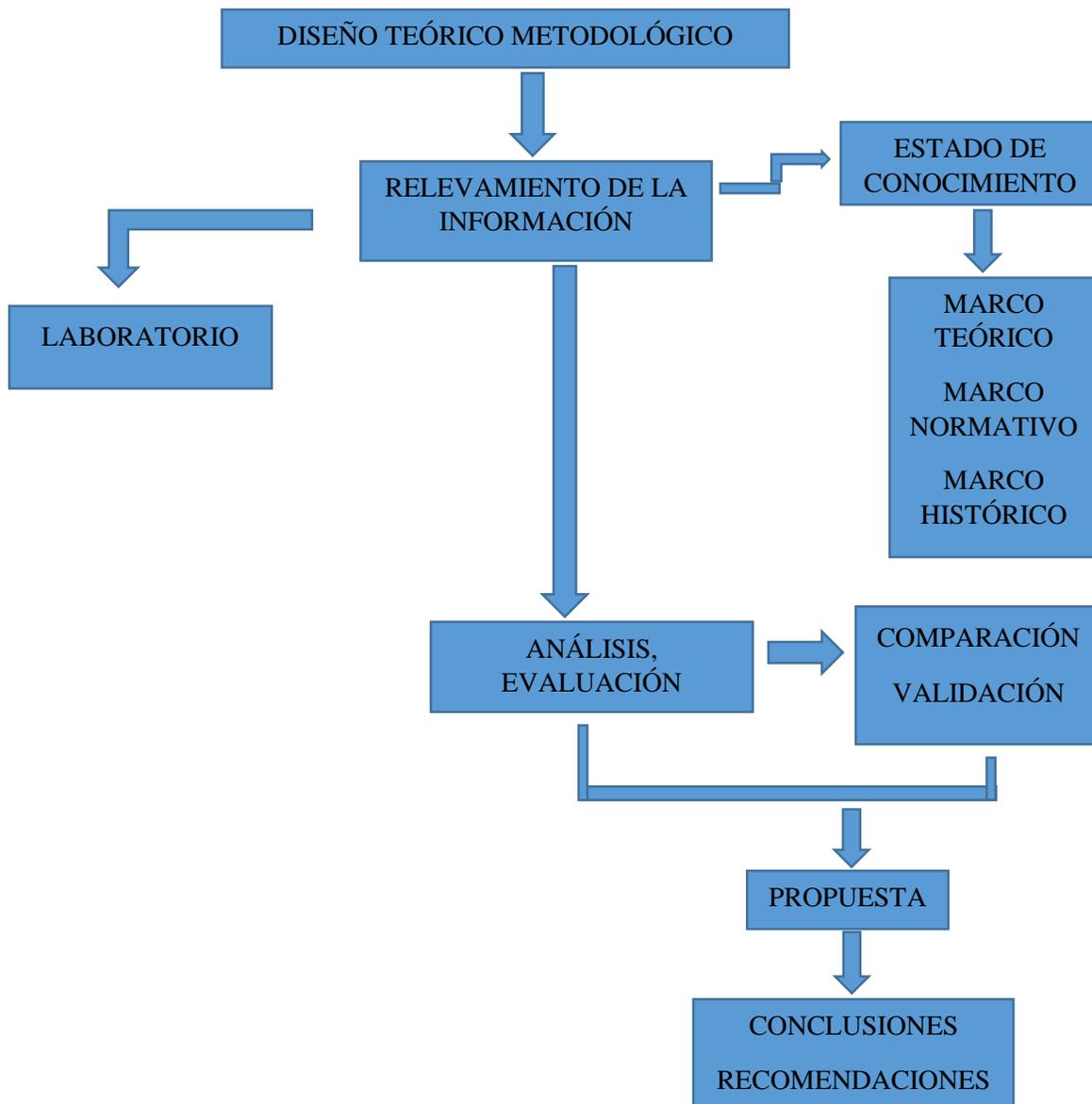
<b>% de Residuo de caucho</b>	<b>18 briquetas por cada porcentaje para la resistencia de la estabilidad Marshall</b>
<b>1</b>	✕
<b>2</b>	✕
<b>3</b>	✕
<b>4</b>	✕

Dichos porcentajes se adoptaron debido al volumen del caucho y a la mejor trabajabilidad del mismo para poder realizar las briquetas.

Para los ensayos de la resistencia de la estabilidad Marshall se realizarán un total de **72 briquetas** con porcentajes de Residuo de Caucho, más 18 briquetas convencionales serán un total de 90 Briquetas.

### 1.8.1. Metodología

**Figura 1.2** Esquema Metodológico



## 1.8.2. Descripción de Equipos e Instrumentos

### A. Para la caracterización de los agregados

Para los agregados de aportación:

- **Horno Eléctrico.** -El horno eléctrico es utilizado para el secado de los agregados de aportación, y debe contar con una temperatura constante de 100 a 110 °C.
- **Balanza.** - La balanza es usada para obtener los distintos pesos que se requiera, con una sensibilidad de 0.1 gr.
- **Juego de Tamices.** - El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, lo cual contiene los tamices 3”, 2 ½”, 2”, 1 ½ “, 1”, ¾ “, ½ “, 3/8”, No. 4, No. 10, No. 40, No. 200, tapa y fondo.

### B. Para la caracterización del cemento asfáltico

Para el cemento asfáltico de aportación:

- **Penetrómetro de Asfalto.** - Que sirve para determinar la penetración del betún en estudio.
- **Viscosímetro del Asphalt Institute y el baño de viscosímetro Saybolt.** - Con los cuales se determina la viscosidad del betún en estudio.
- **Aparato para la determinación del punto de inflamación Cleveland de copa abierta.** - Con el cual se determina el punto de Ignición o punto de llama del betún en estudio.
- **Ductilímetro.** - Con el cual se determina la ductilidad del betún, a una temperatura estándar de 25 °C.
- **Peso Específico.** - Que sirve para determinar la densidad del cemento asfáltico.

### C. Para la dosificación y diseño de briquetas

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

### D. Para los ensayos de resistencia técnica

- **Marco de carga multiplex Marshall.** - Este marco sirve para disponer en él los distintos cabezales, según las pruebas que se requiera.
- **Cabezal de Rotura Marshall.** - Este cabezal junto con el marco multiplex, permite realizarlos ensayos de estabilidad y fluencia para las briquetas en análisis.

### **1.8.3. Procedimiento de Aplicación**

#### **A. Caracterización de los agregados**

Para caracterizar los agregados aporte, se deben someter al horno el secado y luego someterlo a la serie de tamices, por unos quince minutos aproximadamente, luego de este tiempo proceder al pesaje del material que contiene cada tamiz.

Con estos valores obtener las curvas granulométricas tanto para los agregados a reciclar como para los agregados de aporte.

Analizar ambas curvas granulométricas y compensar los porcentajes, de tal manera que se obtenga una nueva curva granulométrica, optimizando el agregado de aportación. Esta nueva curva granulométrica debe cumplir con las normas que proporcionan rangos máximos y mínimos para cada tamiz.

#### **B. Caracterización del cemento asfáltico**

En este proyecto la caracterización del cemento asfáltico a modificar como del cemento asfáltico de aporte, se basa en la determinación de la Viscosidad, Penetración y Punto de Inflamación, ya que se considera que son los tres parámetros más importantes para el presente estudio. Estos parámetros deben cumplir con los rangos especificados por normas, caso contrario no sería viable para realizar mezclas asfálticas y se buscaría otra procedencia del betún.

#### **C. Dosificación y diseño de briquetas**

Para la dosificación de las briquetas, se debe considerar que la granulometría del agregado será constante, como se determinó anteriormente. A este agregado se le incluirá el ligante y el residuo de caucho en porcentajes reemplazando el agregado. De tal manera se obtendrán briquetas con cuatro porcentajes de cemento asfáltico

modificado con residuo de caucho, para luego someterlos a las pruebas de resistencia Marshall.

Es necesario resaltar que para el diseño de las briquetas se seguirá el Método Marshall.

#### **D. Ensayos de resistencia técnica**

Para los ensayos de resistencia técnica, se deben tener listas las briquetas, con su respectiva enumeración, para luego someterlas a las pruebas de Densidad, Estabilidad y Fluencia según el Método Marshall.

##### **1.8.4. Preparación Previa**

Dentro de la preparación previa a los ensayos, es necesario contar con tablas que permitan la tabulación de datos, donde especifique el lugar de obtención, el tipo de muestra, el ensayo a realizar, la numeración respectiva y los datos que se van a necesitar para cada tipo de ensayo.

Junto con lo anterior debe ir un cronograma de actividades para que permita el fácil desarrollo de las actividades o acciones a realizar.

#### **1.9. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN**

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización y de las pruebas de resistencia técnica, se procede al tabulado y si es necesario corregir los resultados obtenidos de cada ensayo.

Con los ensayos de caracterización se determina el cumplimiento de requisitos mínimos según normas, que deben tener tanto el cemento asfáltico y de los agregados.

Con los ensayos de pruebas de resistencia técnica se determina las siguientes curvas:

- 1) % de Residuo de Caucho vs. Densidad
- 2) % de Residuo de Caucho vs. Estabilidad
- 3) % de Residuo de Caucho vs. Fluencia
- 4) % de Residuo de Caucho vs. % de Vacíos de la Mezcla

- 5) % de Residuo de Caucho vs. Relación Betún Vacíos
- 6) % de Residuo de Caucho vs. Vacíos de Agregado Mineral

De cada curva, se selecciona el valor del porcentaje de Residuo de Caucho más adecuado con previo análisis, se debe elegir un valor donde la resistencia sea tolerable, es decir, mayor a la resistencia mínima de una mezcla convencional.

### **1.10. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

El diseño de pavimento flexible con la adición de residuo de caucho se lo llevará a cabo con el fin de conocer si añadiendo este elemento en diferentes proporciones en reemplazo del agregado modificará su resistencia y vida útil, basado como indicador en una mezcla asfáltica convencional que permitan el ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA ADICIÓN DE RESIDUO DE CAUCHO EN REEMPLAZO DE AGREGADO PARA PAVIMENTO FLEXIBLE , este diseño determinará si es posible mejorar la vida la resistencia, vida útil y economía de un pavimento flexible.

**En el primer capítulo**, describe de manera general de que trata la investigación para el contenido de residuo de caucho que se aplicará en la mezcla asfáltica en reemplazo del agregado donde se dará a conocer, la situación problemática, los objetivos, la justificación y la Hipótesis y la técnica que se aplicará en el presente proyecto.

**El segundo capítulo**, comprende la parte teórica, donde se detalla el estado de conocimiento, es decir, toda la información necesaria y relevante al proyecto, como es todo lo referente al residuo de caucho y los agregados a utilizar, diseño de las mezclas asfálticas según el método Marshall, normas, etc.

**El tercer capítulo**, describe los medios y criterios para obtener los datos de caracterización del agregado, cemento asfáltico y residuo de caucho, que luego son procesados y analizados según normas.

**El cuarto capítulo**, comprende el diseño de briquetas con el método Marshall, en planta en caliente, con dos tipos de análisis, el primero con la mezcla asfáltica convencional sin residuo de caucho y el segundo con una mezcla asfáltica con 4

diferentes porcentajes de residuo de caucho, para luego hacer un análisis final de datos, según curvas de correlación de la variable independiente porcentajes de residuos de caucho (llanta triturada) en la mezcla asfáltica, con la variable dependiente que es propiedades de resistencia Marshall. Para luego con estos resultados realizar una propuesta final del proyecto.

**El quinto capítulo**, establece las conclusiones a partir de lo planteado en los objetivos, dándose a conocer los resultados finales de las comparaciones que se tendrá de las mezclas asfálticas con la adición de residuo de caucho en reemplazo de los agregados y de las mezclas asfálticas convencionales del presente proyecto y las recomendaciones para la correcta aplicación y ejecución de este trabajo.

## **CAPÍTULO II**

### **CONCEPTUALIZACIÓN DEL TEMA**

## **2.1. EL CEMENTO ASFÁLTICO**

### **2.1.1. Definición**

La American Society for Testing and Materials (ASTM) define el asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular, como los asfaltos, alquitranes, breas.

El asfalto es un constituyente del petróleo. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto, y a veces pueden ser casi enteramente asfalto. Existen algunos petróleos crudos, sin embargo, que no contiene asfalto. En base a la proporción de asfalto, los petróleos se clasifican por lo común en:

- Petróleos crudos de base asfáltica.
- Petróleos crudos de base parafina (contiene parafina, pero no asfalto)
- Petróleos crudos de base mixta (contienen parafina y asfalto)

El petróleo crudo, extraído de los pozos, es separado en sus constituyentes o fracciones en una refinería. Principalmente esta separación es llevada a cabo por destilación. Después de la separación, los constituyentes son refinados más cuidadosamente o procesados en productos que cumplan requerimientos específicos. De esta manera es como el asfalto, parafina, gasolina, aceites lubricantes y otros productos útiles de alta calidad son el resultado de una refinería de petróleo, dependiendo de la naturaleza del crudo que está siendo procesado,

Debido a que la base del asfalto es la base o el constituyente pesado del petróleo crudo, no se evapora o hierve cuando es destilado, en consecuencia, el asfalto es obtenido como residuo o producto residual, y es valioso para una gran variedad de usos arquitectónicos o ingenieriles.

Prácticamente todo el asfalto comercializado en el medio con la finalidad de ser usado en la pavimentación de carreteras es producido en refinerías de petróleo modernas y se denomina asfalto de petróleo.

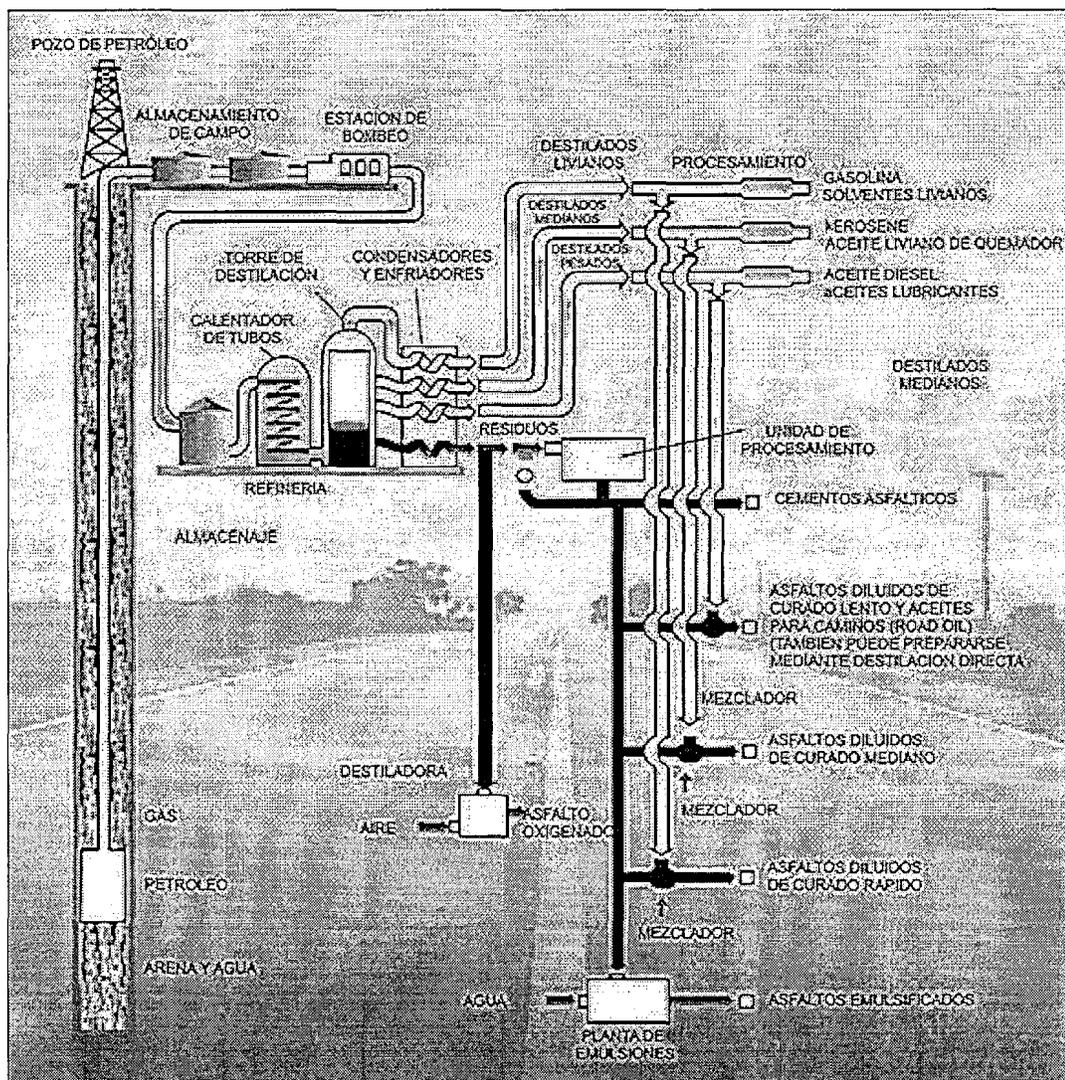
## **2.2. REFINACIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO PARA LA OBTENCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO**

El petróleo crudo está compuesto por distintos productos, incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos, los componentes del asfalto. La refinación permite separar estos productos y recuperar el asfalto. El diagrama del proceso para la extracción del asfalto de petróleo (figura 2.1) muestra la circulación del petróleo crudo a través de una refinería destacándose la parte del proceso relativa a la refinación y producción del cemento asfáltico.

Durante el proceso de refinación, el petróleo crudo es conducido a un calentador tubular donde se eleva rápidamente su temperatura para la destilación inicial. Luego entra a una torre de destilación donde se vaporizan los componentes o fracciones más livianas (más volátiles) y se los separa para el posterior refinamiento en nafta, gasolina, querosene y otros productos derivados del petróleo.

El residuo de este proceso de destilación es la fracción pesada o petróleo crudo, comúnmente llamada crudo reducido. Puede ser usado como fuel oíl residual, o procesado en distintos productos entre ellos es asfalto. Para la separación de la fracción asfalto del crudo reducido se puede utilizar un proceso de extracción mediante solventes. Luego, se refina la mayor parte de esta fracción para obtener cemento asfáltico. Según el proceso de refinación utilizado se obtienen cementos asfálticos de muy alta o baja consistencia, estos productos se mezclan después, en cantidades adecuadas para obtener cementos asfálticos de la consistencia deseada. Los asfaltos soplados se producen insuflando aire a altas temperaturas al asfalto de consistencia apropiado.

Figura 2.1. Proceso de refinación del petróleo para obtención del asfalto.



(Fuente: "<http://asfaltoenobractivi1.blogspot.com/2012/07/5-obtencion-del-asfaltoen-refinerias.html>")

### 2.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ASFALTO

Está constituido por tres grupos básicos: asfaltenos, resinas y aceites (aromáticos y saturados). Los asfaltos sometidos a temperaturas típicas de trabajo son un sistema disperso, ya que las partículas de la fase dispersa son las micelas, en las cuales el núcleo o agregado es el asfalteno.

En los asfáltenos se concentran todos los metales contenidos en el crudo: Ni, V, Fe, Co, Mn, en una proporción apreciable el oxígeno, el azufre y el nitrógeno. El 80- 85% de los asfáltenos son átomos de carbono, la relación C: H se encuentra entre 0.8 y 0.87. Los asfáltenos son producto de la condensación de las resinas.

**Tabla 2.1** Composición química del asfalto.

<b>Elemento</b>	<b>Concentración</b>
Carbono	82- 88%
Hidrógeno	8- 11%
Azufre	0- 6%
Oxígeno	0-1.5%
Nitrógeno	0- 1%

*Fuente: Conferencia: Introducción a la Química del Asfalto por:*

*Ing. German Garzón, Costa Rica, 2004*

## **2.4. ENSAYOS PARA CARACTERIZAR EL CEMENTO ASFÁLTICO**

- **ENSAYOS DE VISCOSIDAD**
- **ENSAYOS DE PENETRACIÓN**
- **ENSAYO PUNTO DE INFLAMACIÓN**
- **ENSAYO DE DUCTILIDAD**

## **2.5. AGREGADOS PARA EL USO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.5.1. Generalidades**

Ya que la calidad y gradación de los agregados tienen un efecto importante en las propiedades de la mezcla, el tipo de agregado debe ser considerado cuidadosamente, pues las propiedades varían según el lugar de producción. La calidad y gradación del agregado obtenida en ensayos de laboratorio indican los niveles recomendables de su uso. Así, la selección apropiada del agregado depende esencialmente del propósito de su aplicación, tomando en cuenta los factores económicos.

Los procedimientos para manejar y acopiar las reservas de agregado varían de obra en obra, debido a que la mayoría de las agencias contratantes no tienen especificaciones para dichos procedimientos. Esencialmente las agencias exigen que el contratista cumpla con las especificaciones de graduación para el agregado. Cuando el acopio es malo, las partículas de agregado se segregan (separan por tamaño), y la graduación varía con los diferentes niveles del acopio. Deberán prepararse superficies firmes y limpias, y se deberán tomar precauciones para mantener separadas las reservas así prevenir el mezclado de las partículas. La separación se consigue ya sea manteniendo ampliamente espaciadas, o mediante muros de contención entre ellas:

En el manejo del agregado para la elaboración de mezclas asfálticas, generalmente se tritura por efectos del excesivo manipuleo, generando consecuente partículas de diferentes graduaciones, que afectan considerablemente la calidad de la mezcla final, considerando este problema es que se recomienda que el agregado sea el mínimo posible para prevenir cualquier segregación por degradación.

## **2.5.2. TIPOS DE AGREGADOS UTILIZADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.5.2.1. Agregado Grueso**

Los agregados gruesos son partículas grandes, mayores aproximadamente a 2,5mm (0, 1 plg). Normalmente son obtenidos de gravas naturales de lechos de ríos, rocas trituradas o de gravas trituradas y zarandeadas:

### **2.5.2.2. Piedra Triturada**

El material bruto para piedra triturada debe provenir de roca dura, como la arenisca, basalto, piedra caliza u otra piedra de calidad equivalente, o piedra de canto rodado con un tamaño de partícula de por lo menos tres veces más grande que el tamaño máximo requerido para el producto final.

El producto triturado puede ser tamizado para obtener el tamaño del agregado deseado. Algunas veces, por razones de economía, el material triturado es usado tal como se lo produce con un ligero tamizado o sin él. Este agregado se lo denomina agregado

"triturado sin cribar", en muchas oportunidades pueden utilizarse en la construcción de pavimentos asfálticos.

Las piedras trituradas deben tener uniformidad, limpieza, dureza y durabilidad suficiente, y estar libres de una cantidad perjudicial de partículas planas o alargadas, sucias con barro o con materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

### **2.5.2.3. Grava Triturada**

Grava triturada son piezas trituradas de canto rodado o grava para hacerlo más apropiado para su uso en mezclas asfálticas para pavimentación- La calidad puede ser mejorada por medio de la trituración, al cambiar la textura superficial de las partículas redondeadas en partículas angulosas con mejoras además en la distribución o rangos de tamaño de las partículas. Las proporciones de las partículas que tienen una o más caras fracturadas, tiene que ser mayor al 75% del peso total de partículas retenidas en un tamiz de 4,75 mm Sin otro procesamiento, este producto de grava triturada o chancada se llama "triturado sin cribar".

### **2.5.2.4. Agregado Fino**

Los agregados finos, presentan tamaños menores de aproximadamente 2.5mm (0,1plg). Son obtenidos de arena natural proveniente de las facciones finas, obtenidas por zarandeo en las operaciones de trituración de rocas o de gravas trituradas. Los áridos finos son aquellos que pasan el tamiz número 4.

#### **2.5.2.4.1. Arena**

La arena se clasifica en: arena natural, arena artificial, polvo de trituración y arena especial.

La arena natural se clasifica, por el lugar de excavación en: arena de río, arena de cantera y arena de mar.

La arena artificial es producida por la trituración de roca o piedra de canto rodado. Las arenas son partículas rocosas que pasan el tamiz N<sup>o</sup> 4 y quedan retenidas en el N<sup>o</sup> 200; y dentro de estas se encuentran las arenas finas, que son el material que pasa el tamiz N<sup>o</sup> 40 y quedan retenidas en el N<sup>o</sup> 200, y el material que pasa el tamiz N<sup>o</sup> 10 y retenidos en el tamiz N<sup>o</sup> 40 se consideran arenas gruesas. Las partículas que pasan el tamiz N<sup>o</sup> 8 o menos, que se obtienen durante la producción de piedra triturada, se mencionan como "polvo de trituración"

#### 2.5.2.4.2. Filler

Relleno mineral es un producto mineral finamente dividido del que al menos el 65% pasa por el tamiz número 200. La piedra caliza pulverizada es el filler más frecuentemente empleado, aunque pueden utilizarse también otros polvos de piedras, cal apagada, cemento Portland y algunas sustancias minerales muy finas y otras de origen volcánicas.

El filler aumenta en muchos casos la estabilidad y la calidad de una mezcla, ayudando en la aportación de agregado fino cuando se utilizan gradaciones cerradas o densa, en estos casos es frecuente el empleo principalmente polvo mineral (Porción de los áridos finos que pasa el tamiz número 200), y otros fillers.

**Tabla 2.2** Grados Estándar Del Filler Mineral

Filler Mineral			
Tamiz		#100	#200
% que pasa	100	90-100	65-100

El polvo mineral es usado principalmente como filler para la mezcla de asfalto en caliente. Es la parte de los áridos que pasa por el tamiz N<sup>o</sup>200. Puede consistir en partículas finas de los áridos finos o gruesos y/o filler mineral- El filler se produce triturando piedra caliza o roca volcánica y debe contener menos del 1% de agua y estar libre de aglomerados, no contendrá sustancias orgánicas ni partículas de arcilla.

Cuando se almacena el filler mineral, se debe evitar cualquier contacto con agua o humedad, porque se vuelve inservible cuando esta mojado.

La cal apagada, el cemento Portland y otros productos procesados industrialmente se pueden usar a veces como fillers minerales en mezclas asfálticas y para evitar el desarrollo de agrietamientos en el pavimento.

### 2.5.3. ENSAYOS DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS

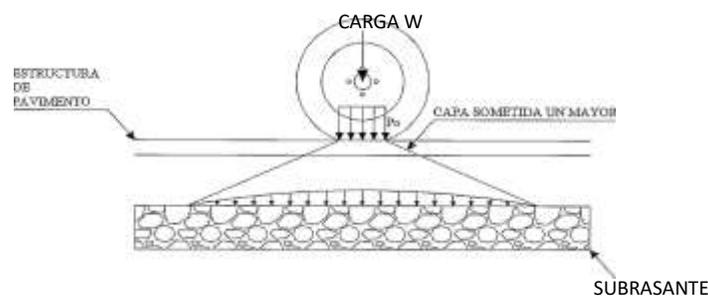
Para muchos ingenieros de materiales, la resistencia del material es frecuentemente considerada como un factor de calidad, sin embargo, este no es el caso necesariamente para mezclas en caliente para pavimento. Una estabilidad extremadamente alta de las mezclas asfálticas, muchas veces, es obtenida a expensas de bajar la durabilidad de los agregados, y viceversa.

Los áridos se emplean, combinados con los asfaltos de diversos tipos, para preparar mezcla de usos muy diversos. Como los áridos constituyen normalmente el 90% al 95% en peso de las mezclas asfálticas sus propiedades tienen gran influencia sobre las del producto terminado. Los áridos más empleados son piedra canto rodado, grava triturada o natural, arena y filler natural.

En la construcción de pavimentos asfálticos el control de las propiedades de los áridos es tan importante como el de las del asfalto.

El agregado de la superficie del pavimento o cerca de ella requiere una dureza mayor que el agregado de las capas inferiores donde las cargas resultan disipadas o no son tan concentradas como se puede observar en la figura 2.2.

**Figura 2.2** Distribución de esfuerzos



## **2.6. TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.6.1. Mezclas Asfálticas en Caliente**

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior al ambiente. Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos, aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6<sup>0</sup>0 de asfalto en volumen de agregados pétreos.

### **2.6.2. Mezclas Asfálticas en Frio**

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias.

Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas. Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión.

### **2.6.3. Mezclas Porosas Drenantes**

Se emplean en capas de rodadura, principalmente en las vías de circulación rápida, se fabrican con asfaltos modificados en proporciones que varían entre el 4.5 % y 5 % de la masa de agregados pétreos, con asfaltos normales, se aplican en vías secundarias, en vías urbanas o en capas de base bajo los pavimentos de hormigón- Utilizadas como mezclas en caliente para tráficos de elevada intensidad y como capas de rodadura en espesores de unos 4 cm. se consigue que el agua lluvia caída sobre la calzada se evacue rápidamente por infiltración.

#### **2.6.4. Micro aglomerados**

Son mezclas con un tamaño máximo de agregado pétreo limitado inferior a 10 mm. lo que permite aplicarlas en capas de pequeño espesor. Tanto los micro aglomerados en Frío (se le suele llamar a las lechadas asfálticas más gruesas) como los micro aglomerados en Caliente son por su pequeño espesor (que es inferior a 3 cm.) tratamientos superficiales con una gran variedad de aplicaciones. Tradicionalmente se han considerado adecuados para las zonas urbanas, porque se evitan problemas con las alturas libres de los gálibos y la altura de los bordillos debido a que se extienden capas de pequeño espesor. Hay micro aglomerados con texturas rugosas hechas con agregados pétreos de gran calidad y asfaltos modificados, para las vías de alta velocidad de circulación.

#### **2.6.5. Masillas**

Son unas mezclas con elevadas proporciones de polvo mineral y de ligante, de manera que, si hay agregado grueso, se haya disperso en la masilla formada por aquellos, este tipo de mezcla no trabaja por rozamiento interno y su resistencia se debe a la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla. Las proporciones de asfalto son altas debido a la gran superficie específica de la materia mineral. Dada la sensibilidad a los cambios de temperatura que puede tener una estructura de este tipo, es necesario rigidizar la masilla y disminuir su susceptibilidad térmica mediante el empleo de asfaltos duros, cuidando la calidad del polvo mineral y mejorando el ligante con adiciones de fibras. Los asfaltos fundidos, son de este tipo, son mezclas de gran calidad,

pero su empleo está justificado únicamente en los tableros de los puentes y en las vías urbanas, incluso en aceras, de los países con climas fríos y húmedos.

#### **2.6.6. Mezclas de Alto Módulo**

Su proceso de elaboración es en caliente, citando específicamente las mezclas de alto módulo para capas de base, se fabrican con asfaltos muy duros. A veces modificados, con contenidos asfálticos próximos al 6 % de la masa de los agregados pétreos, la proporción del polvo mineral también es alta, entre el 8% - 10%. Son mezclas con un elevado módulo de elasticidad, del orden de los 13,000 Mpa. A 20 grados centígrados y una resistencia a la fatiga relativamente elevada. Se utilizan en capas de espesores de entre 8 y 15 cm., tanto para rehabilitaciones como para la construcción de firmes nuevos con tráficos pesados de intensidad media o alta. Su principal ventaja frente a las bases de grava cemento es la ausencia de agrietamiento debido a la retracción o como las mezclas convencionales en gran espesor la ventaja es una mayor capacidad de absorción de tensiones y en general una mayor resistencia a la fatiga, permitiendo ahorra espesor.

### **2.7. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

#### **2.7.1. Peso Específico de los Agregados**

Como el agregado está compuesto por fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino y filler natural, todos con distinto peso específico, los cálculos finales se verán simplificados de gran manera por el cálculo del peso específico bruto del agregado total. Generalmente, los pesos parciales, se expresan en por cientos del peso total del agregado- Para introducir en la fórmula (que se detalla a continuación) el peso específico del agregado grueso y el agregado fino se utiliza el peso específico masivo (bulk), y para el filler se usa el peso específico aparente, por lo tanto, la fórmula de peso específico promedio, del agregado mineral es la siguiente:

$$G_{agreg} = \frac{PA}{VA} = \frac{100}{\frac{\%AG(a)}{G_{ag}(a)} + \frac{\%AF(b)}{G_{ag}(b)} + \frac{\%F(c)}{GF(c)} + \dots + \frac{\%A(n)}{G(n)}}$$

**(Ec. 2.1 Peso específico de los agregados)**

Donde:

$G_{\text{agreg}}$  : Peso específico promedio del agregado mineral combinado.

PA: Peso total expresado en porcentaje

AG(a), AF(b), F (c), ..., A(n): Porcentaje de los agregados a, b, c, ..., n

$G_{\text{ag}}$ : Pesos específicos brutos de los agregados a, b, c, n

Nota. - La fórmula puede ser válida para el cálculo del agregado usando mezclas tradicionales o de asfaltos espumados puesto que es empleada solo para determinar el peso específico del agregado.

**2.7.2. Densidad Máxima Real de la Mezcla ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )**

Las mezclas asfálticas cuya densidad real requiere ser determinada, pueden ser moldeadas en laboratorio, u obtenerse directamente de un pavimento. El diámetro y longitud de las muestras deben ser no menores a cuatro veces el tamaño máximo del agregado empleado y su altura, por lo menos una vez y medio el tamaño del agregado. La densidad real de la mezcla es comúnmente llamada peso unitario de mezclas asfálticas.

Las muestras obtenidas directamente de un pavimento deben ser representativas de la mezcla empleada y no contener materias extrañas al propio pavimento. Al hacer el ensayo, las muestras deben cubrirse con parafina derretida, al fin de tapar todos los poros, o vacíos de la mezcla, y dejar la muestra al aire 30 minutos antes de pesarla.

La fórmula para determinar la densidad real de la mezcla de las briquetas es:

$$D_r \left( \frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{PV(gr)}{VP(cm^3)}$$

**(Ec. 2.2 Densidad Máxima Real de la Mezcla)**

Donde:

Dr.: Densidad real de la mezcla (briqueta)

PB: Peso de la briqueta sin parafina

VP: Volumen de la briqueta sin parafina

**2.7.3. Densidad Maxima Teórica (gr/cm<sup>3</sup>)**

El peso máximo teórico, de una mezcla asfáltica, compacta es la que considera el volumen del agregado mineral y el del asfalto, sin tomar en cuenta el volumen de vacíos llenos de aire.

La densidad de la mezcla compacta está definida como su peso unitario (El peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante que se debe tomar en cuenta, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

La fórmula su cálculo es la siguiente:

$$D_{mt} \left( \frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{100}{\frac{\%C.A.}{GCA} + \frac{100 - \%C.A.}{G_{agreg}}}$$

**(Ec. 2.3 Densidad Máxima Teórica)**

Donde:

D<sub>mt</sub>: Densidad máxima teórica

% C. A: Porcentaje de cemento asfáltico

GCA: Peso específico de cemento asfáltico

G<sub>agreg</sub>: Peso específico del agregado

En las pruebas y análisis de diseño de las mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa generalmente, en kilos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ), gramos por centímetro cúbico ( $\text{gr/cm}^3$ ), o libras por pie cúbico ( $\text{lb/ft}^3$ ). La densidad es calculada de multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) o ( $62.416 \text{ Lb. /ft}^3$ ). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuado. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad en el laboratorio (por que en el laboratorio se tienen las condiciones ideales del 100%)

#### **2.7.4. Vacíos de la Mezcla (%)**

Expresado en porcentaje del volumen total indica la diferencia relativa entre la densidad teórica y la real para el estado de compactación alcanzado. El contenido de vacíos de aire (también porcentaje de vacíos) es la concentración, en volumen del aire en la muestra compactada. Es importante tomar en cuenta que, en una mezcla asfáltica, una parte de los vacíos o poros existentes entre las partículas del agregado mineral, se llena de asfalto, quedando lleno de aire el resto de los vacíos. En un pavimento asfáltico, es importante que el porcentaje de vacíos llenos de aire se controle. Como dijimos anteriormente, la mezcla asfáltica compacta deberá tener un porcentaje de vacíos, comprendido entre 3 y 5% del volumen total de la mezcla.

Por lo tanto, como ya se indicó los vacíos de la mezcla se expresan como un porcentaje del volumen total de la muestra. Representan el volumen que no es ocupado ni por asfalto ni por agregado. Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos de la mezcla final compactada.

Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios donde pueda fluir el asfalto bajo esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos está entre 3 y 5 % dependiendo del diseño específico. La fórmula para su cálculo es:

$$V_m(\%) = \frac{D_{mt} - D_{rm}}{D_{mt}} * 100$$

**(Ec. 2.4 Vacíos de la Mezcla)**

Donde:

$V_m$ : Vacíos de la mezcla compactada

$D_{mt}$ : Densidad máxima teórica

$D_{rm}$ : Densidad real promedio

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar agua y aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta es la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos.

#### **2.7.5. Vacíos del Agregado Mineral V.A.M. %**

Expresado en porcentaje del volumen total, representa el volumen de vacíos existentes en el agregado mineral al estado de densificación alcanzado. Parte del volumen de vacíos está ocupado por el cemento asfáltico.

**Figura 2.3** Distribución de volúmenes en una mezcla asfáltica



El espacio intergranular está ocupado por el asfalto y aire en una mezcla compacta denominada vacíos del agregado mineral (V.A.M.). Por lo tanto, se define como la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo expresado como un porcentaje del volumen total. El volumen de asfalto absorbido no es usualmente considerado como parte del V.A.M.

Los vacíos del agregado mineral son expresados en porcentaje del volumen total de la muestra- Representan el volumen de la mezcla compacta que no es ocupado por el agregado. El espacio inter granular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla compacta se denomina vacíos del agregado mineral, VAM. En el diagrama de componentes, la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo, es el VAM. El volumen de asfalto absorbido por el agregado no es usualmente considerado como parte del VAM. Por lo tanto, los vacíos del agregado mineral, son los espacios de aire

que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compacta de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos de la mezcla.

Los valores recomendados para el V.A.M. de acuerdo al tamaño de las partículas se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 2.4** Valores recomendados para los V.A.M.

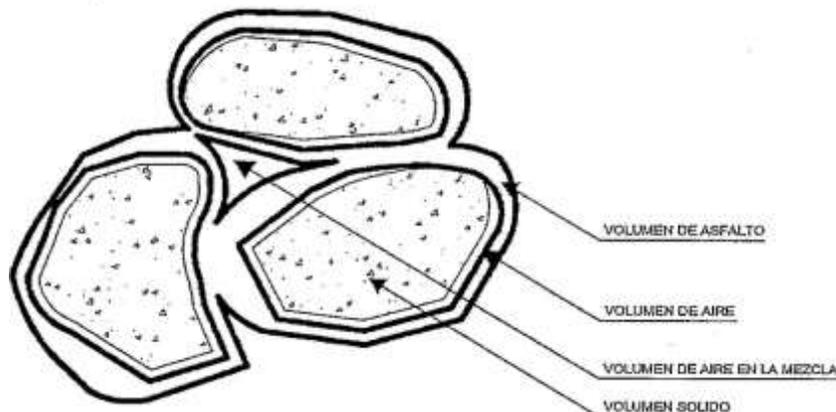
Tamices Standard		Tamaño Nominal de la partícula		Volumen mínimo de vacíos en el agregado mineral por ciento
Standard (mm)	Alternativo	Mm	Plg.	
1.18	Nº 16	1.18	0.0469	23.5
2.36		2.36	0.093	21.0
4.75	NO 4	4.75	0.187	18.0
9.50		9.50	0.375	16.0
12.50		12.50	0.5	15.0
19.00		19.00	0.75	14.0
25.00	1.0	25.00	1.00	13.0
37.50	1.5	37.50	1.50	12.0
51.00	2.0	50.00	2.00	11.5
63.00	2.5	63.00	2.50	11.0

Cuanto mayor sea el VAM, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para el VAM como se detalla en el cuadro anterior los cuales

están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubra las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto con mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar en contenido de asfalto.

(Figura 2.4) Diagrama de partículas en la mezcla asfáltica



En el esquema gráfico se puede observar que el volumen de vacíos puede ser índice de la susceptibilidad de una mezcla compactada, al pasaje del aire o agua es de mucha importancia la interconexión de vacíos con la superficie.

En casos extremos, cuando no es posible o practicable, por razones económicas u otras, alcanzar los requerimientos de especificaciones, se permite una tolerancia del 1% en los vacíos.

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$\text{VAM} (\%) = \text{Vm}(\%) + \frac{\text{CA}(\%) * \text{Drm}}{\text{GCA}}$$

**(Ec.2.5 Vacíos del Agregado Mineral)**

Donde:

VAM (%): Vacíos del agregado mineral

Vm (%): Vacíos de la mezcla compactada

CA (%): Porcentaje de cemento asfáltico

GCA: Peso específico del cemento asfáltico

Drm: Densidad real promedio

Bajo ninguna circunstancia se debe sobrepasar el valor de la fluencia o alcanzar valores inferiores a la estabilidad mínima requerida. Se debe enfatizar que estas variaciones se deben sobrepasar, solo bajo condiciones extremas, a menos que el comportamiento, con combinaciones específicas de agregados muestre condiciones satisfactorias para una mezcla asfáltica. .

A medida que se reduce el tamaño de las partículas, estamos exigiendo un volumen mayor de asfalto, porque estamos aumentando el área superficial, consecuentemente debemos obtener mezclas con mayor porcentaje de V.A.M. y en caso de que una dosificación se hubiese obtenido un V.A.M. y en caso de que una dosificación se hubiese obtenido un V.A.M. menor requerido de acuerdo a las especificaciones se debe estudiar nuevamente la otra mezcla y así sucesivamente hasta obtener un valor de V.A.M. igual o mayor requerido.

**2.7.6. Relación Betumen Vacíos (%)**

Expresa el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por el cemento asfáltico en la mezcla compacta.

Esta propiedad es el porcentaje de los vacíos del agregado mineral (VAM) que contiene asfalto. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$RBV(\%) = \frac{VAM(\%) - Vm(\%)}{VAM(\%)} * 100$$

**(Ec. 2.6 Relación Betumen-Vacíos)**

Donde:

RBV (%): Relación betumen vacíos

VAM (0/0): Vacíos del agregado mineral

Vm (%): Vacíos de la mezcla compactada

**2.7.7. Estabilidad de la Mezcla (Lb)**

Se entiende estabilidad de la mezcla la carga máxima (carga de rotura) obtenida cuando se ejecuta el ensayo de acuerdo a las condiciones establecidas para ello, este parámetro se puede asimilar igualmente como una medida de la resistencia al corte de la mezcla.

La estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica es la carga máxima en libras que soporta una probeta aproximadamente de 6.35 cm. de altura y 10.00 cm. de diámetro cuando se la ensaya a temperatura dada cargándola en sentido diametral a una velocidad de 5.8 cm/minuto. Es la resistencia al desplazamiento lateral de la mezcla asfáltica, La estabilidad es la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones provocadas por las cargas impuestas. Los pavimentos sin estabilidad sufren

deformaciones (ahuellamiento y corrimiento u ondulaciones). La estabilidad depende de la fricción interna y de la cohesión.

La fricción interna depende de la textura superficial, granulometría del agregado, forma de las partículas, densidad de la mezcla y cantidad de asfalto. Es una combinación de la resistencia friccional y de la trabazón del agregado de la mezcla.

La resistencia friccional aumenta con la rugosidad superficial de las partículas del agregado. También aumenta con el área de contacto de las partículas. La resistencia por trabazón depende del tamaño y forma de las del agregado- Para cualquiera agregado dado, la estabilidad aumenta con la densificación (hacer que el agregado sea compacto, apretado) de las partículas confinadas, la cual se logra mediante granulometrías cerradas y adecuada compactación. El exceso de asfalto en la mezcla tiene a lubricar las partículas y a disminuir la fricción interna del esqueleto pétreo.

La cohesión es la fuerza aglutinante propia de una mezcla asfáltica para pavimentación- El asfalto sirve para mantener las presiones de contacto desarrolladas entre las partículas de agregado. La cohesión varía directamente con la intensidad de la carga, el área cargada y la viscosidad del asfalto. Varía intensamente con la temperatura, la cohesión aumenta con el incremento del contenido de asfalto hasta un máximo y luego decrece.

Generalmente para medir la estabilidad de una mezcla asfáltica o su resistencia al desplazamiento lateral, se emplea generalmente, diversos métodos, pero para nuestro caso de estudio se usa el método Marshall.

La estabilidad máxima en una masa de agregados no se alcanza hasta que la cantidad de asfalto que recubre todas las partículas ha llegado a un valor crítico, Un porcentaje adicional del mismo actúa como lubricante más que como ligante, reduciendo la estabilidad de la mezcla, pero aumentando su durabilidad. Por esta razón es mejor conservar el contenido de asfalto tan alto como sea posible conservando una adecuada estabilidad.

#### **2.7.8. Fluencia de la Mezcla (1/100")**

Es la deformación total expresada en centésimas de pulgada que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla.

Los valores de fluencia se incrementan, con el aumento del contenido de asfalto en la mezcla y viceversa.

El flujo es la deformación que ocurre en el instante de la rotura, y por tanto una medida de la plasticidad y capacidad de fluidez de la mezcla. Esta deformación se considera en la misma dirección de aplicación de la carga.

### **2.7.9. Relación Estabilidad – Fluencia**

Para entender que es una mezcla buena o mala, se recurre al concepto de rigidez analizando de una manera combinada los parámetros de estabilidad y flujo. Existe la falsa idea en nuestro medio de que una mezcla de alta estabilidad es en general buena, lo que lleva de hecho a fortalecer la idea de fabricar mezclas muy rígidas, asunto que favorece a la resistencia a la deformación plástica, pero a costa de una debilidad al fenómeno de la fatiga.

La tendencia a fabricar mezclas muy rígidas, con la falsa idea de que mayor resistencia a la deformabilidad es positiva para la mezcla, genera, en consecuencia, una ausencia de la flexibilidad típica del pavimento asfáltico, que puede influir en la fisuración prematura de las capas asfálticas sometidas a tráfico pesado.

El problema de especificar independientemente estos parámetros radica en que se suele rechazar mezclas cuando alguno de estos no cumple con los valores establecidos para control, es decir, que se está argumentando que al cumplir con los parámetros de estabilidad y flujo la mezcla es buena, pero antes de llegar a esta conclusión es indispensable verificar la rigidez de la mezcla, como una medida de su carácter deformable o quebradizo (dúctil o frágil). Una forma de controlar la rigidez de las mezclas, es empleada en la relación estabilidad/flujo, para verificar que se está evaluando de forma correcta la calidad mecánica de las mezclas asfálticas.

Para la elaboración de asfaltos espumados, no se realizó ningún estudio que relaciones ambas propiedades mecánicas y de esta manera poder hacer una evaluación de su

factibilidad como método de fabricación de asfaltos, que pueda salvar los problemas suscitados durante la fabricación de un asfalto tradicional como es la pérdida de la temperatura de la mezcla antes del proceso de compactación.

Cuidando que para el método Marshall, las especificaciones establecen un valor mínimo de estabilidad, mas no definen un máximo, en consecuencia es frecuente ver que en muchos casos los diseños de mezclas asfálticas se toman valores extremadamente altos de estabilidad, sin tomar en cuenta que pueden llegar a ser perjudiciales, la estabilidad es un índice de la mezcla que indica rigidez, que al ser puesto en la estructura del pavimento, este será fácilmente quebradizo bajo las cargas del tránsito y más susceptible a los agentes del intemperismo, degenerándose completamente hasta el punto de perder la capa asfáltica.

## **2.8. OBJETIVO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA**

### **2.8.1. Durabilidad**

Es la capacidad de un pavimento de resistir la desintegración debido al tránsito, al clima y pérdida de cohesión\* al paso del tiempo.

\*Cohesión: Es la fuerza aglomerante del ligante con el agregado; ayuda a aumentar la resistencia al corte de la mezcla; varia con la temperatura; y aumenta con la cantidad de asfalto hasta un máximo, para luego decrecer.

### **2.8.2. Impermeabilidad**

Es la resistencia del pavimento a ser penetrado por el agua y el aire.

### **2.8.3. Trabajabilidad**

Es la facilidad que tiene una mezcla para ser colocada y compactada. Está relacionado con el tipo y porcentaje de agregado, además de la temperatura de mezclado y compactación.

### **2.8.4. Flexibilidad**

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para adaptarse a los movimientos y asentamientos de la base y subrasante sin agrietarse.

### **2.8.5. Resistencia a la Fatiga**

Es la capacidad de un pavimento para resistir los esfuerzos provocados por el tránsito en repetidas pasadas (Vida Útil).

Resistencia al Deslizamiento Es una cualidad que debe presentar un pavimento especialmente mojado para ofrecer resistencia al patinaje.

## **2.9. CAUCHO**

### **2.9.1. Definición**

Los cauchos o elastómeros son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar según el esfuerzo al que sean sometidos, volviendo a su forma cuando el esfuerzo se retira.

El caucho es una sustancia natural compleja (aunque también se puede sintetizar), que se caracteriza por su elasticidad, repelencia al agua y resistencia eléctrica, que se encuentra en el jugo lechoso de gran número de plantas tropicales.

El sintético que posee las mismas propiedades, se obtiene a partir de hidrocarburos insaturados.

### **2.9.2. Caucho Natural**

La estructura de los cauchos naturales está formada por cis-1,4 Poliisopreno mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos y sales orgánicas entre otros. Se encuentra así un polímero de cadena larga y enredada en forma de espiral, de peso molecular medio,  $5 \times 10^5$  g/mol. Esta cadena se complementa con otro isómero estructural, la gutapercha (isómero trans).

### **2.9.3. Caucho Sintético**

Puede llamarse caucho sintético a toda sustancia elaborada artificialmente que se parezca al caucho natural. Se obtiene por reacciones químicas conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados.

Los compuestos básicos del caucho sintético llamados monómeros, tienen una masa molecular relativamente baja y forman moléculas gigantes denominadas polímeros.

Después de su fabricación, el caucho sintético se vulcaniza.

### **2.9.4. Diferencias entre el Caucho Sintético (Sbr) y el Caucho Natural**

A continuación, se verá la comparación entre el caucho SBR y el caucho natural:

- SBR es inferior a la goma natural para su procesado, resistencia a la tracción y a la rotura, adherencia y calentamiento interno.
- SBR es superior en permeabilidad, envejecimiento, y resistencia al calor y desgaste.
- La vulcanización de SBR requiere menos azufre, pero más acelerador.
- El efecto reforzador del negro de carbón es mucho más pronunciado sobre SBR que sobre goma natural.
- Para uso en neumáticos, SBR es mejor para vehículos de pasajeros, en tanto que la goma natural es preferible para vehículos utilitarios y autobuses.
- Las SBR extendidas con aceite se usan principalmente para fabricación de neumáticos, correas cintas transportadoras, etc.) y suelas de zapatos; las mezclas maestras de SBR se emplean en la producción en masa de cubiertas de neumáticos.

#### **2.9.5. Polvo de Caucho**

El polvo de caucho se obtiene por la trituración de neumáticos fuera de uso.

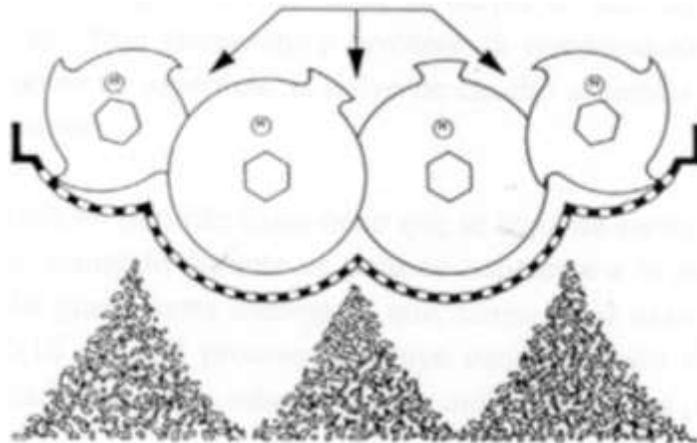
**Tabla 2.5:** Composición ponderal de los neumáticos

COMPONENTE	%
Cauchos	48
Negro de humo	22
Acero	16
Material textil	5
Oxido de cinc	1
Aditivos químicos	8

**Figura 2.5:** Trituración de llantas usadas



**Figura 2.6:** Rejilla de control de tamaños en el triturados



### **2.9.6. Incorporación de Residuo de Caucho a Mezclas Asfálticas**

La incorporación de caucho se realiza mediante dos vías, vía seca y vía húmeda.

#### **2.9.6.1. Vía Seca**

La picadura de caucho, material obtenido mediante la trituración de los neumáticos, se incorpora a las mezclas bituminosas como una fracción más del árido.

### **2.9.6.2. Vía Húmeda**

Consiste en la fabricación de un betún modificado con picadura de caucho, de modo similar al que se sigue con otros polímeros. Este betún modificado servirá después para fabricar la mezcla bituminosa.

## **2.10. DISEÑO MARSHALL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.10.1. Descripción**

A continuación, se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el diseño Marshall de Mezclas. El procedimiento completo y detallado que debe ser seguido se encuentra en la norma AASHTO T245 (o ASTM D 1559).

- **Preparación para efectuar los procedimientos Marshall**

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

- **Selección de las muestras de material**

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que van a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple, los datos de los procedimientos de diseño de la mezcla determinan la "receta" para la elaboración de la mezcla final usada en el proceso de pavimentación. La receta

será exacta solamente si los ingredientes ensayados en laboratorio tienen características idénticas a los usados en el producto final.

- **Preparación del agregado**

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 adecue al proyecto, y de una granulometría conocida de los agregados disponibles (Grava de 3/4, Grava de 3/8 y Arena Natural).

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

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

Se prepara un número determinado de muestras de agregado, por contenido de asfalto, para elaborar un punto en la curva de dosificación Marshall, y se separa cada uno en bolsas o platos correctamente identificados.

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 0 C durante 24 horas.

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

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. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto 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 y se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas- Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados

Marshall como preparación para la comparación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.

Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 y 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así una probeta Marshall de 35 golpes, realmente, recibe un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación, las briquetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

### **2.10.2. Análisis de los Resultados del Ensayo Marshall**

#### **Gráficos de los resultados.**

Los técnicos de laboratorio trazan los resultados del ensayo Marshall en gráficas, para poder entender las características particulares de cada briqueta usada en la serie.

Mediante el estudio de las gráficas, ellos pueden determinar cuál briqueta, de la serie, cumple mejor los criterios establecidos para el pavimento determinado. Las proporciones de asfalto y agregado en esta briqueta se convierten en las proporciones usadas en la mezcla final.

Usualmente se representan graficas de los porcentajes de vacíos, de los porcentajes de vacíos en el agregado mineral, los porcentajes de vacíos llenos de asfalto, los pesos unitarios, los valores de estabilidad Marshall y los valores de Fluencia Marshall.

### **Relaciones y observaciones de los ensayos.**

Los resultados de los ensayos se trazan las gráficas, usualmente revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. A continuación, se enuncian ciertas tendencias que pueden observarse al estudiar las gráficas, estas tendencias son simplemente sugerencias y parámetros de una mezcla tradicional que no tienen como finalidad definir los resultados de un ensayo aleatorio.

- El porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.
- La curva para el peso unitario (densidad) de la mezcla es similar a la curva de estabilidad, excepto que el peso unitario máximo se presenta a un contenido de asfalto ligeramente mayor que el que determina la máxima estabilidad.
- Hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentan a medida que el contenido de asfalto aumenta. Más allá de este punto, la estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de asfalto.
- Los valores de fluencia aumentan con aumentos en el contenido de asfalto.

### **Verificación de los criterios de diseño.**

- Usando los datos anteriores, podemos seleccionar una muestra cuyo contenido de vacíos este dentro de los parámetros de diseño, correspondiente a esto se tendrá un contenido específico de asfalto para la mezcla, parámetro principal por el cual se clasificará. Los valores de las otras propiedades de la mezcla son luego revisados para garantizar que cumplen todos los criterios de diseño Marshall.

### **Selección de un Diseño de Mezcla.**

El diseño de mezclas seleccionado para ser usado en un pavimento es, generalmente, aquel que cumple, de la manera más económica, con todos los criterios establecidos. Sin embargo, no se deberá diseñar una mezcla para optimizar una propiedad en particular. Por ejemplo, las mezclas con valores muy altos de estabilidad son, con frecuencia, poco deseable, debido a que los pavimentos que contienen este tipo de mezclas tienden a ser menos durables y pueden agrietarse prematuramente bajo volúmenes grandes de tránsito. Cualquier variación en los criterios de diseño deberá ser permitida solo bajo circunstancias poco usuales, a no ser que el comportamiento en servicio de una mezcla en particular indique que dicha mezcla alternativa es satisfactoria.

## 2.11. CRITERIOS DE DISEÑO NORMALIZADO

Para el diseño de mezclas asfálticas, deben cumplir con la caracterización mediante ensayos establecidos por las normas AASHTO y ASTM, como se muestra en las siguientes tablas.

**Tabla 2.6:** Ensayos de laboratorio Normalizados para Agregados

Ensayo de laboratorio para AGREGADOS	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano qué clase de textura tendrá la carpeta.
Desgaste	AASHTO T 96 ASTM C 131	EL objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportarán los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando Sulfato de Sodio	AASHTO T 104 ASTM C 88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura en pavimentos, especialmente cuando éstos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos, el valor del error permisible no debe ser mayor de 0.5%.
Equivalente de Arena	AASHTO T 176 ASTM D 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena.
Cubicidad de Partículas	ASTM D 692	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados, deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que debe evitarse partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica y absorción del agregados gruesos y finos	AASHTO T 84 AASHTO T 85 ASTM C - 127 ASTM C - 128	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyente, no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contienen las partículas los cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con la condición seca cuando se evalúa el comportamiento del agregado con el agua durante un periodo largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.
Peso Unitario y Vacío	AASHTO T 19 ASTM C 29M	En la práctica el valor de peso unitario es muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de mezclas de agregados para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del Próctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.

*Fuente: The Asphalt Institute.*

**Tabla 2.7:** Ensayos de laboratorio Normalizados para Asfaltos

Ensayo de laboratorio para ASFALTOS	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 201. ASTM D 2170	En el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el Cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de una mezcla asfáltica, se ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los Cementos Asfálticos a Viscosidad 60°. Mide la consistencia de los Cementos Asfálticos
Penetración	AASHTO T 49 ASTM D 5	Clasifica los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en décimas de milímetros. Valores altos de penetración, indicarán consistencias suaves.
Punto de Inflamación	AASHTO T 48 ASTM D 92	Tiene por propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta Cleveland.
Ductilidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	Provee de una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura especificada.
Punto de reblandecimiento	AASHTO T 53 ASTM D 36	La temperatura determinada como de Reblandecimiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzará un determinado estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico y además es también una prueba de la viscosidad.
Ensayo de flotación	AASHTO T 50 ASTM D 139	Esta prueba caracteriza el comportamiento al flujo o consistencia de ciertos materiales bituminosos, que por su bajo grado de dureza no pueden ser ensayados utilizando el método de penetración. Este ensayo es utilizado para medir la consistencia del residuo de destilación de los asfaltos rebajados de fraguado lento.
Solubilidad en Tricloroetileno	AASHTO T 44 ASTM D 2042	Este ensayo indica la porción de constituyentes cementantes activos en el asfalto ensayado es decir se utiliza para medir la pureza del asfalto. En esta prueba las sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos, se consideran impurezas.
Peso específico	AASHTO T 228 AASHTO T 85 AASHTO T 84	El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra pero existen dos razones por las cuales se debe conocer su valor y son: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura – volumen.</li> <li>• Es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado.</li> </ul> Se determina normalmente por el método del picnómetro.
Endurecimiento y envejecimiento	AASHTO T 51 ASTM D 113	Tiene por propósito exponer una o varias muestras a condiciones similares ocurridas durante las operaciones de plantas de mezclado en caliente.

Fuente: The Asphalt Institute

### Requisitos del agregado pétreo

**Tabla 2.8:** Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de los ángeles, %	35
Partículas alargadas y lajeadas, % máximo	40
Equivalente de arena, % mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

*Fuente: SCT, 2005.*

**Tabla 2.9:** Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

Malla		Tamaño				
Abertura mm	Designación	12.5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm
		(1/2 ")	(3/4 ")	(1 ")	(1 ½ ")	(2 ")
50	2"	---	---	---	---	---
37,5	1 ½"	---	---	---	100	90-100
25	1"	---	---	100	90-100	76-90
19	¾"	---	100	90-100	79-92	66-83
12,5	½"	100	90-100	76-89	64-81	53-74
9,5	3/8"	90-100	79-92	67-82	56-75	47-68
6,3	¼"	76-89	66-81	56-71	47-65	39-59
4,75	No.4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2	No.10	48-64	41-55	36-64	30-42	26-38
0,85	No.20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0,425	No.40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0,25	No.60	17-29	15-25	13-21	11-29	9-16
0,15	No.100	12-21	11-18	9-16	8-14	6-12
0,075	No.200	7-10	6-9	5-8	4-7	3-6

*Fuente: SCT, 2003.*

### Requisitos del ligante asfáltico

**Tabla 2.10:** Requisitos de calidad para cemento asfáltico, clasificado por viscosidad dinámica a 60°C.

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento original	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa.s(P <sup>[1]</sup> )	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1 000 ± 200)	200 ± 40 (2 000 ± 400)	300 ± 60 (3 000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm <sup>2</sup> /s, mínimo (1 mm <sup>2</sup> /s = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 g, 5s; 10 <sup>-1</sup> mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad, %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento, °C	37-43	45-52	48-56	50-58
<b>Del residuo de la prueba de la película delgada</b>				
Pérdida por calentamiento, % máximo	1	0,5	0,5	0,5
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa.s(P <sup>[1]</sup> ), máximo	200 (2 000)	400 (4 000)	800 (8 000)	1 200 (12 000)
Ductilidad a 25°C y 5 cmm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25°C; %, mínimo	46	50	54	58

*Fuente: SCT, 2005.*

## 2.12. ANÁLISIS DE PRESUPUESTO

### **2.12.1. Introducción**

Un presupuesto es considerado una suposición de valor de un producto para condiciones definidas y en un tiempo determinado.

Además, un presupuesto nos permite llevar un control de gastos, el seguimiento de gastos reales en los materiales, mano de obra y equipo

### **2.12.2. Precios Unitarios**

Los precios unitarios están en concordancia con cada proyecto de acuerdo a los siguientes factores:

- Disponibilidad de los materiales
- Normas y Especificaciones
- Condiciones Climatológicas
- Recursos Necesarios

### **2.12.3. Elementos de los Precios Unitarios**

Los elementos que componen el precio unitario son:

- Costos Directos
- Costos Indirectos

#### **2.12.3.1. Costos Directos. –**

Los costos directos son aplicables directamente a la obra y derivan en gastos de:

- Materiales
- Mano de Obra
- Herramienta y Equipo
- Beneficios Sociales

## **CAPÍTULO III**

### **CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO, CEMENTO ASFÁLTICO Y RESIDUO DE CAUCHO**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

En los capítulos anteriores se trataron sobre el Método Marshall, los aspectos para el Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente y Mezcla Asfáltica con residuo de caucho en seco, así como las normas aplicables al diseño de la misma.

En el presente capítulo se desarrollan las pruebas de laboratorio necesarias para llevar a cabo el Diseño de la mezcla propuesta en el estudio, estas se las realizará a las muestras de material pétreo obtenidas en la comunidad de San José de Charaja, de igual manera se realizará los ensayos de laboratorio de suelos y asfaltos del SEDECA, por tal motivo, se describen dichos ensayos con la respectiva norma que los ampara.

El capítulo está dividido principalmente en tres partes: la primera que constituye la descripción detallada del procedimiento para la caracterización de los materiales pétreos (grava 3/4", arena triturada y filler), la segunda parte constituye al análisis del cemento asfáltico y finalmente se aborda la caracterización del residuo de caucho.

El procedimiento para el diseño esta propuesto por el manual de carreteras de la ABC.

### **3.2. SELECCIÓN DE MATERIALES**

Los materiales a utilizar deben cumplir ciertas especificaciones de las Normas ASTM y AASHTO. Para el presente proyecto utilizamos materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas vigentes; Además de tener una disponibilidad.

El material pétreo, está situado en la comunidad de San José de Charaja, donde se encuentra ubicada una chancadora para la provisión de material para la Institución de SEDECA de Tarija de la Provincia Cercado.

**Imagen 3.1:** Ubicación de la planta de SEDECA



Fuente: Elaboración Propia

### 3.3. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.

Para realizar la caracterización de los agregados utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas, se asistió al Laboratorio de Suelos y Materiales del SEDECA donde se realizaron los ensayos de **Granulometría, Peso Específico, Peso Unitario, Caras Fracturadas, Límites, Desgaste de los Ángeles y Equivalente de Arena.**

#### 3.3.1. Granulometría (AASHTO T – 27)

Primeramente, se efectúa un muestreo para el agregado grueso mediante el cuarteo que consiste en colocar a la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas.

La muestra escogida de agregado grueso se coloca en una bandeja para determinar la masa de la bandeja y la muestra.

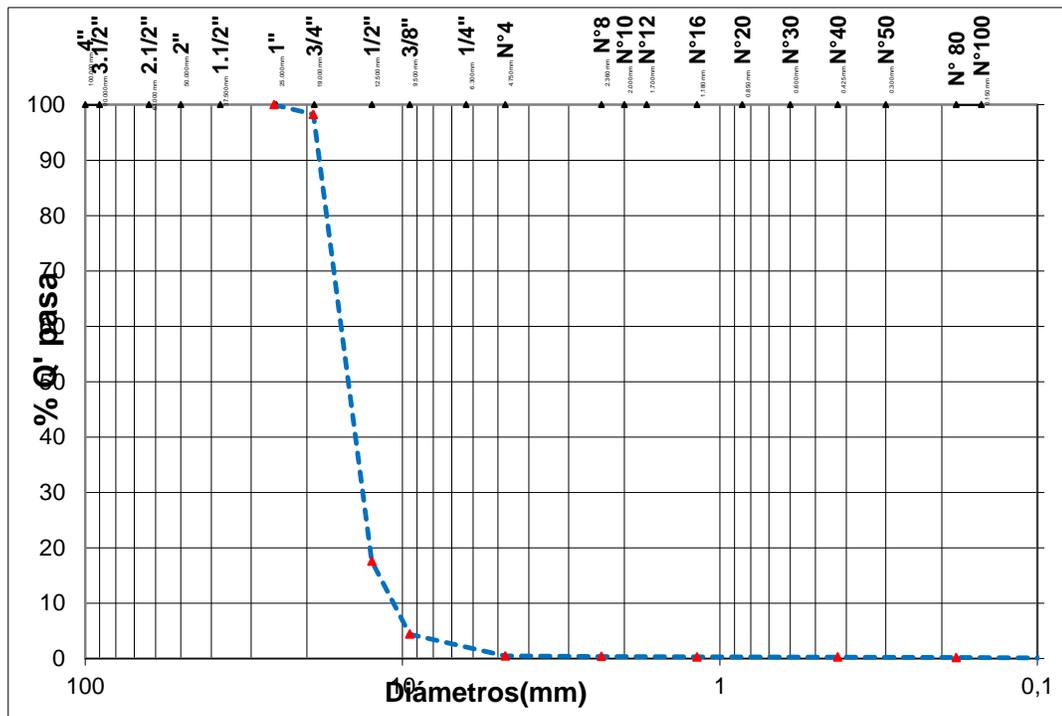
Tomamos la muestra, se coloca sobre los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 80, N° 200, inmediatamente con movimientos circulares facilitamos que el agregado pueda retenerse o pasar en cada uno de los tamices. Los resultados del ensayo se dan en porcentajes del peso total del agregado que pasa cada tamiz de dimensiones conocidas, para lo cual se pesan las respectivas cantidades retenidas y sumadas en forma acumulativa a las anteriores de tamaño mayor, estos pesos acumulados se dividen para el peso total de la muestra ensayada y se multiplica por 100. La diferencia a 100 de cada uno de estos porcentajes acumulados nos da porcentaje que deja pasar el tamiz correspondiente, los resultados de este ensayo se pueden ver en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1:** Granulometria- Material Grueso

<b>Abertura</b>	<b>Peso Total Seco</b>	<b>4105 gr</b>	
<b>Tamiz</b>	<b>Tamiz</b>	<b>Grava</b>	
mm.	N°	Peso Ret.	% Que Pasa
25,4	<b>1"</b>	0	100
19,1	<b>3/4"</b>	72	98,25
12,7	<b>1/2"</b>	3383	17,59
9,5	<b>3/8"</b>	3924	4,41
4,75	<b>N° 4</b>	4085	0,49
2,36	<b>N° 8</b>	4089	0,39
1,18	<b>N° 16</b>	4092	0,32
0,425	<b>N° 40</b>	4094	0,27
0,18	<b>N° 80</b>	4097	0,19
0,075	<b>N° 200</b>	4101	0,10

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.1:** Curva Granulometrica – Grava de ¾



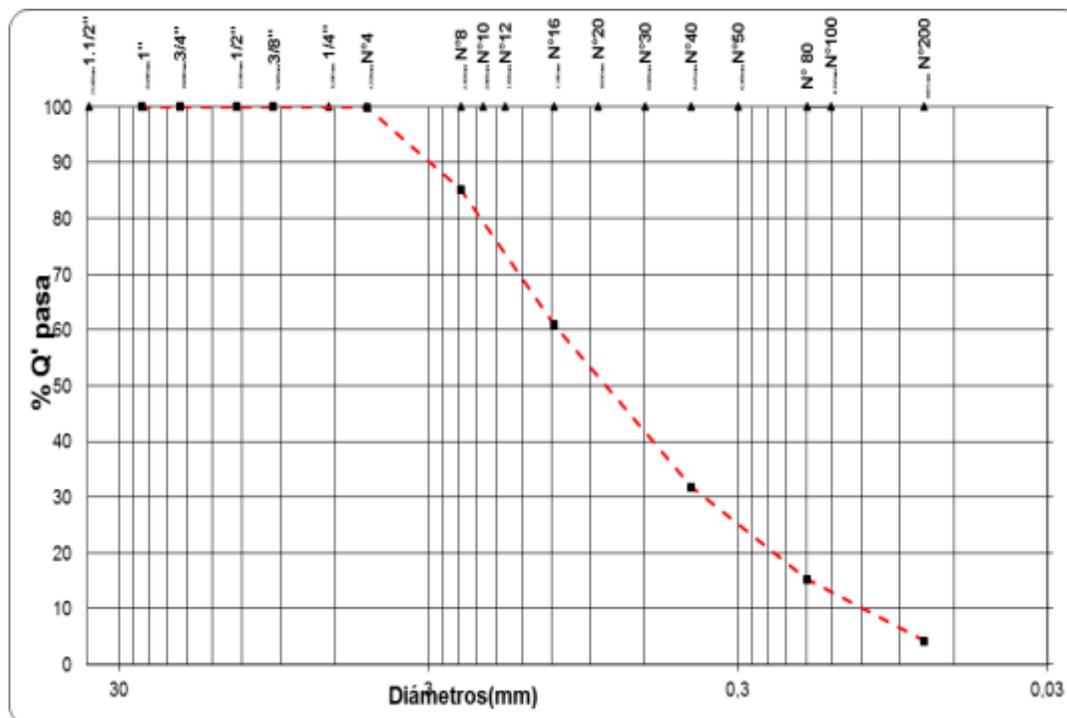
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.2:** Granulometría Material Fino (Arena)

Abertura	Peso Total Seco	700 gr	
Tamiz	Tamiz	Arena Triturada	
mm.	Nº	Peso Ret.	% Que Pasa
25,4	1"	0	100
19,1	3/4"	0	100
12,7	1/2"	0	100
9,5	3/8"	0	100
4,75	Nº 4	0,8	100
2,36	Nº 8	103,6	85,2
1,18	Nº 16	272,6	61,1
0,425	Nº 40	477,1	31,8
0,18	Nº 80	593,2	15,3
0,075	Nº 200	670,3	4,2

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.2:** Curva Granulometría – Material Fino (Arena)



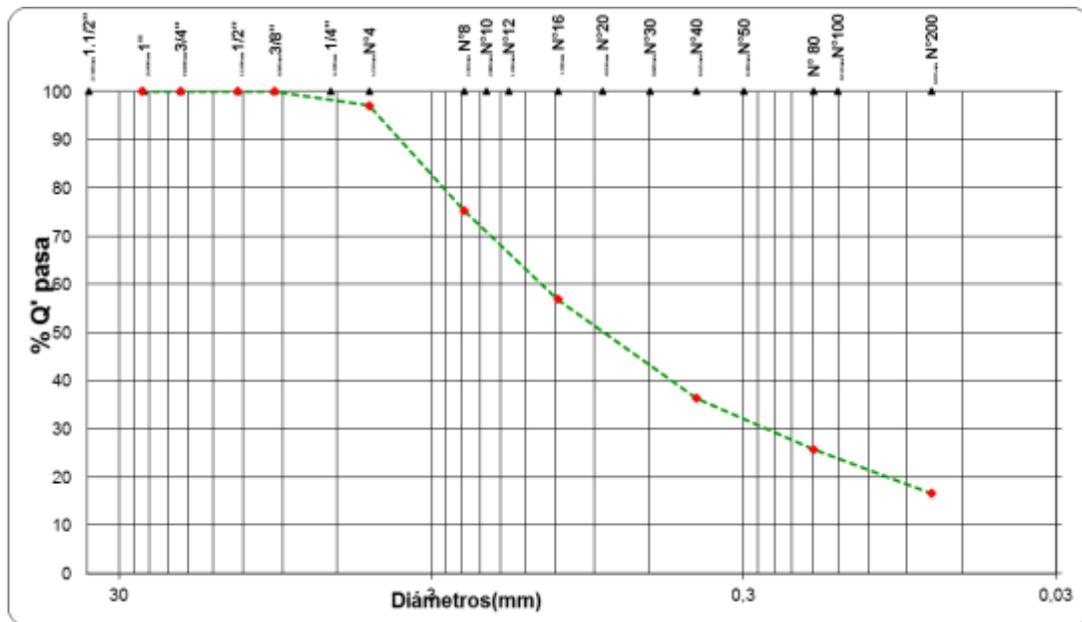
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.3:** Granulometría - Materia Fino (Arena Filler)

Abertura	Peso Total Seco	700 gr	
Tamiz	Tamiz	Arena Filler	
mm.	Nº	Peso Ret.	% Que Pasa
25,4	1"	0	100
19,1	3/4"	0	100
12,7	1/2"	0	100
9,5	3/8"	0	100
4,75	Nº 4	20,5	97,1
2,36	Nº 8	172,4	75,4
1,18	Nº 16	301,7	56,9
0,425	Nº 40	445,7	36,3
0,18	Nº 80	519,9	25,7
0,075	Nº 200	584,1	16,6

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.3:** Curva Granulométrica - Material Fino (Arena Filler)



Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.2. Peso Específico (AASHTO T – 84)

Se comienza por mezclar completamente el agregado, cuarteándolo a continuación, hasta obtener aproximadamente la cantidad mínima necesaria para el ensayo, en este caso al tener un tamaño nominal de 3/4 plg, 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  $100^{\circ}$  -  $110^{\circ}$  C y se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, repitiendo el secado hasta lograr peso constante, y se sumerge en agua, también a temperatura ambiente, durante  $24 \pm 4$  horas. Después del período de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores. Se tomarán las precauciones necesarias para evitar cualquier evaporación de la superficie de los agregados. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (PEBS.S.S.) A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergida en el agua, a la temperatura de  $25^{\circ}$  C, La canastilla y la muestra deberán

quedar completamente sumergidas durante la pesada y el hilo de suspensión será lo más delgado posible para que su inmersión no afecte a las pesadas. Se seca entonces la muestra en horno a  $100^{\circ}$  -  $110^{\circ}$  C, se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y se determina su peso seco hasta peso constante.

**Tabla 3.4:** Peso Específico del Agregado Grueso

<b>MATERIA L</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>PESO ESPECÍFICO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Grava de 3/4"	Peso Especifico Seco (PEBS)	2,583	
	Peso Especifico Aparente (PEA)	2,670	
	Peso Esp. Bruto Sat. Sup. Seco (PEBSSS)	2,615	
	% de Absorción (% D)	1,267	

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.3. Caras Fracturadas

El ensayo de caras fracturadas representa la relación de partículas del agregado grueso que tienen una o más caras fracturadas con relación al agregado total. El ensayo se realizó en instalaciones del SEDECA y el procedimiento que se realizó es la siguiente manera:

Para el agregado de 3/4":

- Se tamizó el agregado y se trabajó utilizando un tamaño máximo de partícula de 3/4".
- Se lavó el material para apreciar mejor las caras fracturadas.
- Se secó el material para pesar la totalidad de la muestra.

- Se separó el agregado que tiene caras fracturadas del canto rodado y se pesan los materiales separados, los resultados obtenidos son los siguientes:

**Tabla 3.5:** Caras Fracturadas Material 3/4"

<b>ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS</b>				
Peso de la muestra (gr)	Peso de Caras Fracturadas (gr)	Peso de Caras Sanas (gr)	% de Caras Fracturadas (%)	Especificaciones Mínimo (%)
1000	962	38	96,2	75

Fuente: Elaboración Propia

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla asfáltica según las especificaciones.

Para el agregado 3/8" se repite el mismo procedimiento para el agregado de 3/4" donde se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 3.6:** Caras Fracturadas Material 3/8"

<b>ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS</b>				
Peso de la muestra (gr)	Peso de Caras Fracturadas (gr)	Peso de Caras Sanas (gr)	% de Caras Fracturadas (%)	Especificaciones Mínimo (%)
1000	912	88	91,2	75

Fuente: Elaboración Propia

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla asfáltica según las especificaciones.

### **3.3.4. Desgaste de los Ángeles (AASHTO T – 96)**

El ensayo de Desgaste de Los Ángeles determina el desgaste de los agregados para determinar su aplicabilidad en mezclas asfálticas, cuando son sometidos a los efectos del tráfico de vehículos. El procedimiento que se siguió para el desarrollo del ensayo fue el siguiente:

Para el material de 3/4"

- Se determinó en base a la granulometría, que el material correspondía a al tipo "B". En base a estos resultados, se siguió el procedimiento del ensayo:
- Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 3/4" y pasante el de 1".
- Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 3/8" y pasante el de 1/2".
- Introducir el material combinado dentro del tambor con 11 bolas, y someter el material a 500 revoluciones.
- Tamizar el material en el tamiz #12 y pesar el retenido.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 3.7:** Desgaste de Los Ángeles, Material de 3/4"

ENSAYO DE LOS DESGASTE DE LOS ANGELES						
Retenido 1/2(gr)	Retenido 1/2(gr)	Total (gr)	Retenido # 12 (gr)	Diferencia (gr)	DESGASTE (%)	Especificaciones Máximo
2500	2500	5000	3922	1078	21,56	40

Fuente: Elaboración Propia

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla asfáltica según las especificaciones.

Para el material de 3/8":

Se determinó en base a la granulometría, que el material correspondía a al tipo "C". En base a estos resultados, se siguió el procedimiento del ensayo:

Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 1/2" y pasante el de 3/4".

Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz #4 y pasante el de 3/8". Introducir el material combinado dentro del tambor con 8 bolas, y someter el material a 500 revoluciones.

Tamizar el material en el tamiz #12 y pesar el retenido.

**Tabla 3.8:** Desgaste de Los Ángeles, Material De 3/8”

<b>ENSAYO DE LOS DESGASTE DE LOS ANGELES</b>						
Retenido 1/2(gr)	Retenido 1/2(gr)	Total (gr)	Retenido # 12 (gr)	Diferencia (gr)	DESGASTE (%)	Especificaciones Máximo
2500	2500	5000	3812	1188	23,76	40

Fuente: Elaboración Propia

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla asfáltica según las especificaciones.

### 3.3.5. Equivalente de Arena (AASHTO T – 176)

Con el ensayo de equivalente de arena se pretende determinar las proporciones de arena y arcilla presentes en el agregado fino para la elaboración de mezclas asfálticas u hormigones, para la realización del ensayo se ejecutó el siguiente procedimiento:

- Se tamizo el material, separando las partículas que quedan retenidas en el tamiz #4 y trabajando solamente con el material pasante.
- En una probeta, se vierten 4 pulgadas de solución (Cloruro de calcio combinado con agua destilada).
- Se vertió una tara con una cantidad determinada de arena (aproximadamente 350 gr) tamizada en el #4.
- Se dejó reposar 5 minutos, y posteriormente se agito vigorosamente durante 30 segundos, con la finalidad de que las partículas de arcilla sean suspendidas completamente en la solución.
- Se agregó solución hasta completar las 15 pulgadas, haciendo que toda la arena pegada en las paredes y el corcho de goma, caigan hasta el fondo, se dejó reposar durante 20 minutos.
- Después de observar una evidente separación entre el material fino y la arena, se leyeron los resultados en la escala graduada de la probeta en pulgadas y se repitió el mismo procedimiento 3 veces.

Se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 3.9:** Equivalente De Arena

ENSAYO	LECTURAS			MEDIA (%)	ESPECIFICACIÓN
	1	2	3		
Lectura del nivel superior	5,6	5,5	5,7	61,9	> 45
Lectura del nivel inferior	3,4	3,5	3,5		
% de arena	60,71	63,64	61,40		

Fuente: Elaboración Propia

El resultado del ensayo fue satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla asfáltica según las especificaciones.

### 3.3.6. Durabilidad Método de los Sulfatos (AASHTO T – 104)

Este método de ensayo estima la capacidad de los agregados de disolverse cuando están sujetos a las acciones climáticas en concretos y en otras aplicaciones. Esto es conseguido por repetidas inmersiones en solución saturada de sulfatos de Sodio o Magnesio, seguidas por el secado al horno hasta una deshidratación parcial o completa, en donde la sal se precipita en los espacios porosos permeables.

La fuerza de expansión interna, derivada de la rehidratación de la sal en la re-inmersión, simula la expansión del agua en el enfriamiento.

Los valores para el proyecto de pérdida permitido por este método son usualmente diferentes para agregado grueso y fino.

**Tabla 3.10:** Durabilidad Método de los sulfatos (Agregado Grueso).

Granulometría				Peso Materiales		Perdida por	% Pasa al	% Perdida	% Perdida
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después	Diferencia	Tamiz	Respecto	Respecto
Nº	Pasa	Ret.		Ensayo(Grs.)	Ensayo(Grs.)	(Grs.)	más fino	Tamiz	Muestra Total
2	2	1	100,0	0,0	0,0				
1	1	3/4"	99,4	502,5	498,5	4,0	17,5	0,80	0,14
3/4"	3/4"	1/2"	81,9	405,0	399,5	5,5	3,1	1,36	0,04
1/2"	1/2"	3/8"	78,8	300,0	295,2	4,8	23,1	1,60	0,37
3/8"	3/8"	Nº 4	55,7	300,0	297,0	3,0	55,7	1,00	0,56
Nº 4	Nº 4	Nº 10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00
Nº 10	Nº 10								
<b>TOTAL % PERDIDA DE PESO</b>									<b>1,11</b>
<b>MÁXIMO</b>									<b>12,00</b>
<b>Cinco ciclos</b>									

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.11:** Durabilidad Método de los sulfatos (Agregado Fino).

Granulometría				Peso Materiales		Perdida por	% Pasa al	% Perdida	% Perdida
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después	Diferencia	Tamiz	Respecto	Respecto
Nº	Pasa	Ret.		Ensayo(Grs.)	Ensayo(Grs.)	(Grs.)	mas fino	Tamiz	Muestra Total
3/8"	3/8"	Nº 4	57,7	300,0	295,2	4,8	17,8	1,60	0,28
Nº 4	Nº 4	Nº 8	39,9	100,0	96,2	3,8	10,9	3,80	0,41
Nº 8	Nº 8	Nº 16	29,0	100,0	97,6	2,4	12,4	2,40	0,30
Nº 16	Nº 16	Nº 40	16,6	100,0	94,2	5,8	6,5	5,80	0,38
Nº 40	Nº 40	Nº 80	10,1	100,0	94,8	5,2	10,1	5,20	0,53
Nº 80	Nº 80								
<b>TOTAL % PERDIDA DE PESO</b>									<b>1,61</b>
<b>MÁXIMO</b>									<b>12,00</b>
<b>Cinco ciclos</b>									

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.7. Límites de Atterberg (AASHTO T – 89)

- **Límite líquido**

La definición de límite líquido dada por la sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engieres), es la siguiente:

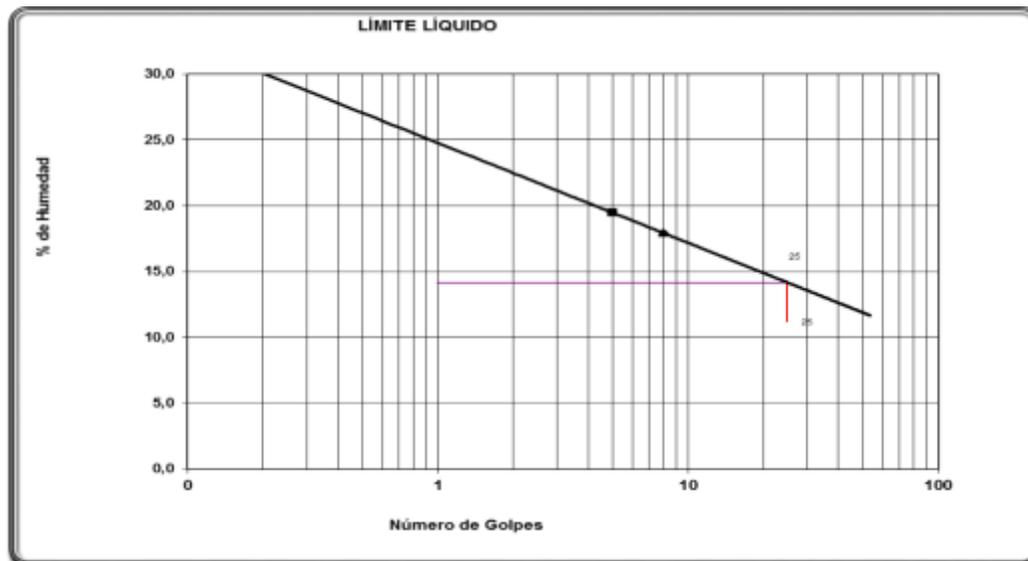
“Limite liquido es el contenido de humedad que corresponde al límite arbitrario entre los estados de consistencia líquido y plástico de un suelo”.

**Tabla 3.12:** Limite Liquido

Nº Tara	Peso Suelo Hum. +Tara	Peso Suelo Seco+Tara	Peso agua	Peso Tara	Peso Suelo Seco	% de hum.	Nº de Golpes
5	39,45	36,62	2,83	22,09	14,53	19,48	5
3	37,72	35,35	2,37	22,13	13,22	17,93	8

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.4:** Limite Liquido



Fuente: Elaboración Propia

### 3.4. ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.

Por condiciones de disponibilidad con los equipos necesarios para realizar los ensayos de caracterización del cemento asfáltico, se realizaron en el SEDECA los ensayos de: Viscosidad Saybolt Furol, Punto de Inflamación, Punto de Ablandamiento y Penetración.

### 3.4.1. Viscosidad Saybolt Furol (AASHTO T – 72)

Para la realización del ensayo de viscosidad se realizó el siguiente procedimiento:

- Se obtuvo un valor estable de temperatura para el baño, de 135 °C.
- Paralelamente, se calentó el cemento asfáltico, sobre una plancha eléctrica, y no con llama directa, para preservarlo de la oxidación o envejecimiento prematuro, a una temperatura entre 80 y 100 °C, de manera que una vez colocado el asfalto en el viscosímetro se caliente rápidamente y no demore mucho tiempo en alcanzar la temperatura de ensayo (135°C). El calentado previo no debe exceder los 1.7°C (3°F) por encima de la temperatura de ensayo.
- Se agitó la muestra y posteriormente filtró con un tamiz #100, para cuidar el viscosímetro de cualquier obstrucción posible a causa de impurezas en el asfalto.
- Se insertó un tapón de corcho en el agujero inferior del viscosímetro, con la finalidad mantener el asfalto dentro hasta que alcance la temperatura adecuada.
- Se vertió el cemento asfáltico dentro del viscosímetro, hasta que el nivel quede por encima del borde de reboco, es decir, que rebalse un poco de asfalto por encima del vaso que lo contiene.
- Se agitó la muestra dentro del viscosímetro con el termómetro de viscosidad, empleando un movimiento circular y cuidando de no votar el asfalto fuera del vaso. Cuando la temperatura de la mezcla permaneció constante a la temperatura del ensayo ( $\pm 0.05$  °C) durante un minuto de agitación continua se retiró el termómetro.
- Se verificó que el matraz se encontraba en la posición adecuada; se retiró el corcho de la parte inferior del viscosímetro y en el mismo instante se puso a funcionar el cronómetro. Se detuvo en el instante en que el fondo del menisco del cemento alcanzó la marca de graduación de 60 ml del frasco receptor.

- Se anotó el tiempo del flujo en segundos.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 3.13:** Resultados Viscosidad Saybolt Furol

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
					Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt 135°C AASHTO T-72	seg	158	160	159	85	-----

Fuente: Elaboración Propia

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas.

#### 3.4.2. Punto de Inflamación (AASHTO T – 48)

Para la realización de este ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

- Se preparó el equipo, colocándolo sobre un mesón firme y a nivel. Se cerraron momentáneamente las ventanas y la puerta para eliminar corrientes de aire.
- Se lavó la copa de ensayo con gasolina para remover cualquier aceite o residuo de asfalto de un ensayo anterior.
- Se colocó el termómetro en posición vertical, cuidando de que el extremo inferior esté a 6.4 mm (1/4") del fondo de la copa y localizado en un punto medio entre el centro y la pared de la misma.
- Se llenó la copa con el cemento asfáltico, cuidando que la temperatura no excediera de 100°C, precisamente a la temperatura necesaria para que el asfalto pueda verterse. Hasta el punto en el que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado.
- La copa se llenó lejos del resto del equipo, que ya se encontraba previamente montado.
- Se colocó la copa en posición, cuidando el espacio entre el extremo inferior del termómetro y el fondo de la copa.

- Se encendió la llama del mechero, aplicando calor inicialmente de manera que la tasa de incremento de temperatura de la muestra sea de 14° a 17°C por minuto, cuando la temperatura se aproximó a los 160°C se disminuyó el calor de manera que el incremento se redujo a un rango constante entre 5° a 6°C por minuto hasta que se alcanzó el punto de inflamación.
- Cuando la temperatura se aproximó a los 210°C, se aplicó la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C, en un tiempo de barrido a través de la copa de aproximadamente 1 segundo.
- Cuando la temperatura se aproximó a los 230°C, se tuvo la precaución de no aproximarse bruscamente, o respirar cerca de la copa puesto que cualquier movimiento de aire, dispersa los gases que se acumulan en la parte superior.
- Se registró como punto de inflamación, la lectura de temperatura del termómetro cuando apareció una llama sobre la superficie de la copa producto de la combustión de los gases emitidos por el calentamiento del asfalto.

Se anotaron los siguientes resultados:

**Tabla 3.14:** Resultados del Punto de Inflación

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
					Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt 135° C AASHTO T-48	°C	263	265	264	232	-----

Fuente: Elaboración Propia

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas.

### 3.4.3. Penetración (AASHTO T – 49)

El ensayo de penetración se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se calentó el asfalto homogéneamente para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar la fluidez del material para verterlo en los moldes. Se

cuidó que la temperatura de calentamiento previo no exceda en 100°C al punto de ablandamiento, también con el objeto que, colocado el asfalto en los moldes, el tiempo que demore hasta enfriarse a una temperatura estable no sea demasiado.

- Se llenaron los moldes, teniendo cuidado de que la profundidad de llenado sea por lo menos 10 mm mayor al rango de penetración esperada. Se prepararon dos moldes con las mismas dimensiones y características de la misma muestra.
- Se dejaron enfriar a temperatura ambiente hasta alcanzar entre 20° y 30° C durante un periodo aproximado de 2 horas, cubiertos para protegerlos del polvo.
- Se puso los moldes en un baño de agua a una temperatura de 25 ° C manteniendo esta temperatura constante durante un periodo de tiempo similar al anterior.
- Se montó el equipo de penetración y se comprobó que el vástago que soporta la aguja esté completamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre la guía. La aguja de penetración se limpió con gasolina y se secó con un trozo de papel higiénico, se la fijó firmemente en su soporte.
- La penetración se realizó en un baño pequeño auxiliar, en el que se colocó la muestra de asfalto, completamente sumergido, hasta un nivel de 3 mm sobre la cara superior del asfalto.
- Una vez montado todo el equipo para la realización del ensayo, se aproximó la aguja del penetrómetro hasta que la punta tocó justamente la superficie de la muestra, sin que penetre.
- Se verificó que el penetrómetro se encuentre en cero, y se soltó la aguja, iniciando en el mismo instante el cronometro para medir un tiempo de 5 segundos.
- Finalmente, se leyó y anotó la distancia expresada en decimas de milímetro.

Se anotaron los siguientes resultados:

**Tabla 3.15:** Resultados Ensayo de Penetración

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg. AASHTO T-49	Lectura 1	mm	93	90			
	Lectura 2	mm	92	91			
	Lectura 3	mm	91	92			
	Promedio	mm	92,0	91,0	91.5	85	100

Fuente: Elaboración Propia

El asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas y concuerda con los datos proporcionados por el fabricante.

#### 3.4.4. Ductilidad (AASHTO T – 51)

El ensayo de penetración se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se hizo calentar el cemento asfáltico hasta un punto que este manejable.
- Se preparó las probetas para colocar el asfalto
- Las probetas se recubrieron con una vaselina y maicena para evitar que el cemento se prenda en las paredes.
- Se llenó los moldes con mucho cuidado sin hacer rebalsar, evitando la inclusión de burbujas.
- Se dejó enfriar las probetas a temperatura ambiente durante 30 min. Y a continuación se introdujo los moldes ya preparados en el baño de agua a temperatura de 25°C durante 90 min.

- Se quita los moldes y se deja al descubierto las probetas y se da inicio al ensayo.
- El material asfáltico es estirado por las pinzas hasta formar un hilo produciendo la ruptura.

**Tabla 3.16:** Resultados Ensayo De Ductilidad

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	MINIMO
Ductilidad a 25° C AASHTO T-51	cm	130	127	129	129	≥ 100

Fuente: Elaboración Propia

#### 3.4.5. Peso Específico (AASHTO T – 228)

Se limpia perfectamente el picnómetro y su tapón con el líquido de limpieza, enjuagándolo a continuación con agua destilada y secándolo finalmente. Esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración, o bien cuando se observe cualquier falla en el escurrimiento uniforme de los líquidos, en las paredes interiores del picnómetro o en el capilar del tapón.

Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa. El peso del picnómetro vacío. Se seca el vaso del baño y se llena el picnómetro con agua destilada, colocando suavemente el tapón, sin apretarlo. Se sumerge completamente el picnómetro en el vaso y se aprieta entonces el tapón, no debiendo quedar burbujas de aire ocluidas en el picnómetro en esta operación. El vaso con el picnómetro se vuelve a colocar en el baño de agua a 25 0C. Se deja el picnómetro en el interior del vaso por un mínimo de 30 minutos, se saca del agua e inmediatamente se seca la superficie superior del tapón pasando suavemente y una sola vez un paño seco por la misma; a continuación, se seca rápidamente el resto del picnómetro y se pesa con aproximación de 0.1 mg. El peso del picnómetro lleno de agua.

Preparación de la muestra. - Calentar con cuidado la muestra, agitándola para evitar sobrecalentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que

pueda ser vertida. La muestra debe ser representativa de la existente en el laboratorio y deberá ser homogénea y no estar contaminada.

Verterlo una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Tomar precaución para evitar que el material se ponga en contacto con las paredes del picnómetro por encima del nivel final y para evitar la inclusión de burbujas de aire. Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente durante un período no menor de 40 minutos y pesar con el tapón con aproximación a 1 mg. El peso del picnómetro con la muestra.

Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. No deben permitirse burbujas de aire en el picnómetro- Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón.

Retomar luego el vaso al baño de agua a 25°C.

**Tabla 3.17:** Resultados de Ensayo de Peso Específico

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	PROMEDIO
Peso Picnómetro	gr	61,99	61,99	
Peso Picnómetro + Agua (25°)	gr	142,78	142,78	
Peso Picnómetro + Muestra	gr	106,92	110,88	
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	143,28	143,22	
Peso Especifico	gr/cm <sup>3</sup>	1,008	1,006	1,007

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO DE CAUCHO

#### Especificaciones Técnicas del Residuo de Caucho

El Residuo de caucho de obtiene de la trituración de neumáticos fuera de uso. Este residuo de caucho será empleado en reemplazo del agregado

Características de los neumáticos:

Los neumáticos son estructuras toroidales muy completas elaboradas con más de 200 componentes, si bien están compuestos básicamente por cauchos naturales y sintéticos, cargas reforzantes (negros de carbón y sílices), antioxidantes, materiales metálicos, textiles y otros ingredientes necesarios para el proceso de vulcanización del caucho. Las proporciones de estos componentes pueden diferir en función del fabricante y del tipo de neumático, aunque en general se aproximan a las que figuran en la tabla.

Composición ponderal aproximada de los neumáticos de turismo y camión

Material	Servicios	Camión
Caucho	48	45
Negro de Carbono y sílice	22	22
Metal	15	25
Textil	5	--
Óxidos de zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	5

Fuente: CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de obras Publicas España)

### **Materiales y Herramientas empleadas**

El residuo de caucho se obtiene de la trituración de los neumáticos en desuso y para su trituración se emplea una máquina trituradora especial



Para la caracterización del residuo de caucho solo se realizaron 3 ensayos

- Granulometría
- Densidad
- Adherencia

### **3.5.1. Granulometría (AASHTO T – 27)**

Primeramente, se efectúa un muestreo para el residuo de caucho mediante el cuarteo que consiste en colocar a la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas.

La muestra escogida de residuo de caucho se coloca en una bandeja para determinar la masa de la bandeja y la muestra.

Tomamos la muestra, se coloca sobre los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 80, N° 200, inmediatamente con movimientos circulares facilitamos que el agregado pueda retenerse o pasar en cada uno de los tamices. Los resultados del ensayo se dan en porcentajes del peso total del agregado que pasa cada tamiz de dimensiones conocidas, para lo cual se pesan las respectivas cantidades retenidas y sumadas en forma acumulativa a las anteriores de tamaño mayor, estos pesos acumulados se dividen para el peso total de la muestra ensayada y se multiplica por 100. La diferencia

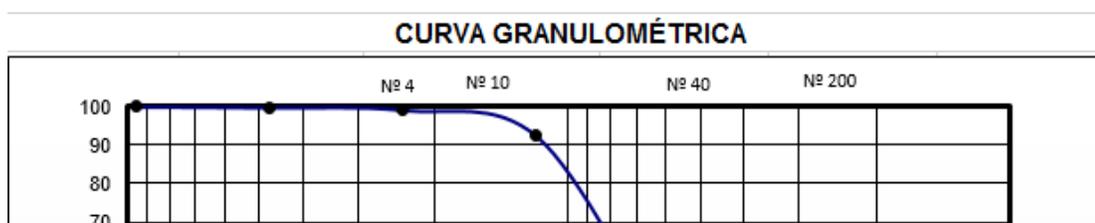
a 100 de cada uno de estos porcentajes acumulados nos da porcentaje que deja pasar el tamiz correspondiente, los resultados de este ensayo se pueden ver en la Tabla 3.18.

**TABLA 3.18:** Granulometría Material Fino (Residuo De Caucho)

Proyecto:	PROYECTO DE GRADO CIV 502		Nº Ensayo:	<b>1</b>	
Utilización:	Estudio		Material:	<b>Residuo de Caucho</b>	
Referencia:	Mezclas Asfáltica		Fecha:	<b>31 de agosto de 2016</b>	
Descripción:	Mezclas Asfáltica		Realizado:	<b>María Rene Mendivil Velásquez</b>	
<b>Peso Total (gr.)</b>			<b>886</b>		
<b>Tamices</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Peso Ret. (gr)</b>	<b>Ret. Acum (gr)</b>	<b>% Ret</b>	<b>% Que Pasa del Total</b>
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
Nº 4	4,75	2,00	2,00	0,23	<b>99,77</b>
Nº 8	2,36	6,00	8,00	0,90	<b>99,10</b>
Nº 16	1,18	60,00	68,00	7,67	<b>92,33</b>
Nº 30	0,60	450,00	518,00	58,47	<b>41,53</b>
Nº 40	0,43	160,00	678,00	76,52	<b>23,48</b>
Nº 50	0,30	106,00	784,00	88,49	<b>11,51</b>
Nº80	0,18	57,00	841,00	94,92	<b>5,08</b>
Nº100	0,15	40,00	881,00	99,44	<b>0,56</b>
Nº 200	0,075	5,00	886,00	100,00	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.6:** Curva Granulometría – Material Fino (Residuo de Caucho)



Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.2. Densidad del Residuo de Caucho

La densidad relativa de un cuerpo es un número adimensional que viene dado por la relación del peso del cuerpo al peso de un volumen igual de una sustancia que se toma como referencia. Los sólidos y los líquidos se refieren al agua (a 20° C).

**TABLA 3.19:** Densidad del Residuo De Caucho

<b>DENSIDAD DEL CAUCHO</b>	
DENSIDAD #1	0,157
DENSIDAD #2	0,158
DENSIDAD #3	0,159
DENSIDAD PROMEDIO	0,158

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.3. Adherencia del Residuo de Caucho

**TABLA 3.20:** Adherencia del Residuo de Caucho con Gravilla

Adherencia de la Mezcla Asfáltica	
Peso del Cuenco	635,1
Peso Cuenco + Gravilla	868,2
1 % de Caucho	4,66
6 % Asfalto	16,3
Peso total antes de sumergirse	254,06
Peso total después de sumergirse 24 hrs.	254,04

Fuente: Elaboración Propia

**TABLA 3.21:** Adherencia del Residuo de Caucho con Grava

Adherencia de la Mezcla Asfáltica	
Peso del Cuenco	636,2
Peso Cuenco + Grava	1062,5
1 % de Caucho	8,5
6 % Asfalto	29,8
Peso total antes de sumergirse	464,6
Peso total después de sumergirse 24 hrs.	464,58

Fuente: Elaboración Propia

## **CAPÍTULO IV**

### **DISEÑO, EVALUACIÓN, ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PRESUPUESTO**

#### **4.1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Para conocer y analizar posteriormente la incidencia de agregar porcentajes de Residuo de Caucho (llantas en desuso) en reemplazo de los agregados a la mezcla asfáltica y cual el afecto en ellas se realizó el siguiente procedimiento:

Se realizaron 4 diferentes diseños de mezclas asfálticas añadiendo porcentajes de 1%, 2%, 3% y 4% de Residuo de Caucho (llantas en desuso) en remplazo de los agregados, y que se utilizaran para hacer el ensayo Marshall.

Para la selección del porcentaje de residuo de caucho de determino que fuera del 1% al 4% debido al volumen que este tiene, la buena trabajabilidad y adherencia del mismo en la mezcla asfáltica.



Realizadas las briquetas se llevaron estas a la prensa Marshall para determinar: peso específico total, análisis de la densidad, contenido de vacíos de las briquetas, medición de la estabilidad y la fluencia Marshall.

A continuación, se detalla el diseño de la mezcla asfáltica con residuo de caucho y el proceso completo del ensayo hasta la prensa Marshall:

**Paso 1:** Para realizar nuestra mezcla asfáltica lo que debemos hacer primero es pesar el agregado de acuerdo a nuestra dosificación por cada tamiz y porcentaje de cemento asfáltico que se empleara e introducir la muestra al horno para que al momento de dosificar tenga la misma temperatura que el cemento asfáltico.

El residuo de caucho también se lo debe pesar de acuerdo al porcentaje (1%,2%,3% y 4%) que se empleara en la mezcla asfáltica.

**Imagen 4.1:** Pesado de la Mezcla



Fuente: Elaboración Propia

**Imagen 4.2:** Pesado del Residuo de Caucho de acuerdo al porcentaje que se empleara.



Fuente: Elaboración Propia

**Paso 2:** Una vez listo el material de debe alistar los equipos e instrumentos que se emplearan, en este caso se necesita los anillos que estén limpio y calientes, el martillo también tiene que estar caliente en la base para la compactación de las briquetas.

**Paso 3:** Teniendo el material y equipo listo se debe proceder a la dosificación de la mezcla.

En un recipiente añadir el residuo de caucho y ponerlo a fuego lento para que adquiera temperatura, paralelamente se pesa el agregado con el cemento asfáltico y se lo añade al recipiente del caucho. Se debe mezclar con la ayuda de una cuchara hasta se obtenga una buena adherencia en la mezcla, controlando que la temperatura que no suba de los 170 °C.

**Imagen 4.3:** Residuo de Caucho



Fuente: Elaboración Propia

**Imagen 4.4:** Agregado y cemento asfáltico



Fuente: Elaboración Propia

**Imagen 4.5:** Elaboración de las Mezclas



Fuente: Elaboración Propia

**Paso 4:** Una vez que se obtenga la mezcla se lo debe vaciar sobre un cartón para que baje la temperatura a 135 °C y pueda ser compactado.

La compactación se lo realiza introduciendo la mezcla en el anillo el cual debe ser cubierto por un papel filtro para que la mezcla no se adhiera al martillo, los golpes que se darán son 75 por cara.

**Imagen 4.6:** Elaboración de Briquetas a temperatura de 135°C



Fuente: Elaboración Propia

**Imagen 4.7:** Compactación con martillo con 75 golpes por cara.



Fuente: Elaboración Propia

**Paso 5:** Para el desmoldado de las briquetas se lo realiza con la ayuda de una prensa tipo gata y se debe esperar que este repose 2 horas mínimo.

**Imagen 4.8:** Desmoldado de briquetas después de un reposo



Fuente: Elaboración Propia

**Paso 6:** A las 24 horas de haber sido compactadas las briquetas y antes de introducir las briquetas al equipo Marshall estas deben ser procesadas.

Las briquetas se los debe limpiar y pesar, posteriormente se las debe introducir en un recipiente con agua a 25°C durante 10 minutos.

**Imagen 4.9:** Briquetas sumergidas en agua a 10°C.



Fuente: Elaboración Propia

Pasado los 10 minutos las briquetas se las debe pesar sumergidas y secas superficialmente, realizado estos pasos se lo introduce nuevamente las briquetas en agua a 60°C durante media hora para ser llevadas al equipo Marshall.

**Imagen 4.10:** Colocado de briquetas en la mordaza Marshall



Fuente: Elaboración Propia

**Imagen 4.11:** Lectura del dial de Estabilidad (dentro del anillo Marshall) y el dial de deformación para el Flujo.



Fuente: Elaboración Propia

### 4.3. METODO MARSHALL

#### 4.3.1 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL



LABORATORIO DE SUELOS, ASFALTOS Y HORMIGONES

**" DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE // METODO MARSHALL CONVENCIONAL "**

Proyecto: PROYECTO DE GRADO CIV 502

Fecha: 22 de Septiembre de 2016

DISEÑO - MRSH - 01

Pesos Específicos (AASHTO T-100, T-85)		% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20		DOSIFICACION						GRAVA - GAUCHO		GRAVILLA - GAUCHO		RENA CHANCADA - GAUCHO		FILLER - CHARAJA					
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,641	gr/cm <sup>3</sup>	43,4	Tipo de asfalto AASHTO M20	85-100	% DE AGREGADOS :						3/4"	3/8"	N°4	N°4								
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,669	gr/cm <sup>3</sup>	56,6	P. Especifico Total AASHTO T-228	1,008	ORIGEN AGREGADOS :						22%	27%	24%	27%								
P. Esp. Agregado Total (Gag.)	2,657	gr/cm <sup>3</sup>	100			Acopio Planta de Asfaltos Charaja																	
N° GOLPES:		75		135 °C Compactación																			
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA ( CM )	% DE ASFALTO		PESO BRIQUETA EN EL AIRE (gr)	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.S. (gr)	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA (gr)	VOLUMEN BRIQUETA (cm3)	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacios			ESTABILIDAD (Lb)					LECT. DIAL	FLUJO 1/100	MEDIA		
		BASE AGREGADO	BASE MEZCLA					REAL ( Dr. ) (kg/cm3)	PROMEDIO ( Dirm.) (kg/cm3)	MAXIMA TEORICA (kg/cm3)	MEZCLA ( Vv )	AGREGADOS ( VAM )	LLENOS DE ASFALTO ( RBV )	LECT. DIAL	REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION ( ALTURA )					MEDIA f.c.	CORREGIDA
																	mm	mm					
a	b	c	r	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p							
1	6,88	4,71	4,50	1178,6	1189,0	663,9	525,1	2,245					979	2158,3		0,881			242	9,5			
2	6,72	4,71	4,50	1192,0	1199,6	670,0	529,6	2,251					1001	2206,8		0,918			236	9,3			
3	6,75	4,71	4,50	1182,0	1184,6	662,0	522,6	2,262	2,252	2,475	8,98	19,04	52,82	1010	2226,6	2197,3	0,910	0,903	1984,1	220	8,7	9,16	
4	6,71	5,26	5,00	1194,4	1199,9	675,8	524,1	2,279						1195	2634,5		0,920			255	10,0		
5	6,74	5,26	5,00	1190,0	1195,4	677,1	518,3	2,296						1157	2550,7		0,913			270	10,6		
6	6,70	5,26	5,00	1192,8	1198,8	675,2	523,6	2,278	2,284	2,456	6,99	18,32	61,86	1173	2586,0	2590,4	0,923	0,918	2378,0	280	11,0	10,56	
7	6,56	5,82	5,50	1187,8	1189,9	678,2	511,7	2,321						1345	2965,2		0,951			316	12,4		
8	6,57	5,82	5,50	1190,0	1192,4	680,8	511,6	2,326						1292	2848,3		0,949			320	12,6		
9	6,63	5,82	5,50	1192,7	1194,0	678,2	515,8	2,312	2,320	2,437	4,82	17,48	72,40	1322	2914,5	2909,3	0,938	0,946	2752,2	310	12,2	12,41	
10	6,44	6,38	6,00	1190,7	1193,0	679,5	513,5	2,319						1339	2952,0		0,978			350	13,8		
11	6,62	6,38	6,00	1192,3	1195,6	682,5	513,1	2,324						1280	2821,9		0,939			338	13,3		
12	6,55	6,38	6,00	1190,0	1191,0	680,0	511,0	2,329	2,324	2,419	3,95	17,78	77,78	1373	3026,9	2933,6	0,953	0,956	2804,5	350	13,8	13,62	
13	6,54	6,95	6,50	1195,8	1196,6	678,5	518,1	2,308						1282	2826,3		0,954			375	14,8		
14	6,47	6,95	6,50	1184,9	1185,7	670,5	515,2	2,300						1179	2599,2		0,970			382	15,0		
15	6,45	6,95	6,50	1187,0	1188,2	676,8	511,4	2,321	2,310	2,401	3,82	18,72	79,58	1150	2535,3	2653,6	0,975	0,966	2563,4	382	15,0	14,95	
16	6,54	7,53	7,00	1190,5	1191,5	674,5	517,0	2,303						1105	2436,1		0,954			402	15,8		
17	6,56	7,53	7,00	1185,3	1186,8	670,5	516,3	2,296						1079	2378,8		0,951			415	16,3		
18	6,60	7,53	7,00	1188,2	1189,6	675,8	513,8	2,313	2,304	2,384	3,36	19,36	82,63	1025	2259,7	2358,2	0,943	0,949	2237,9	415	16,3	16,17	

OBSERVACIONES

ESPECIFICACIONES

3 - 5

≥ 15

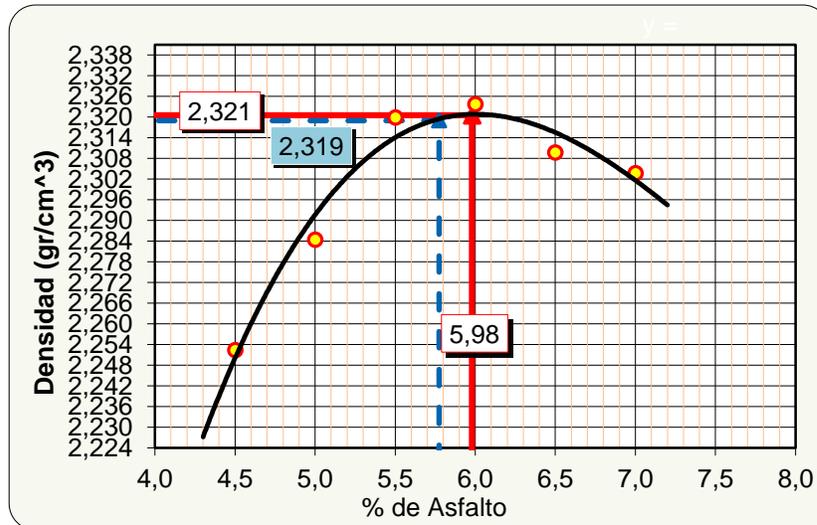
75 - 82

≥ 1500 Lb.

8 - 14

### 4.3.1.1. RESULTADOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

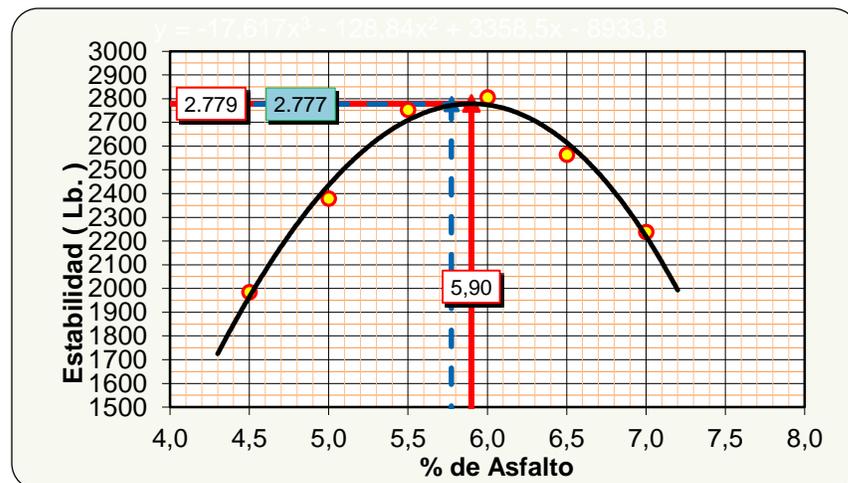
**Figura 4.1: Curva Densidad vs % de Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura la densidad es directamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será la Densidad.

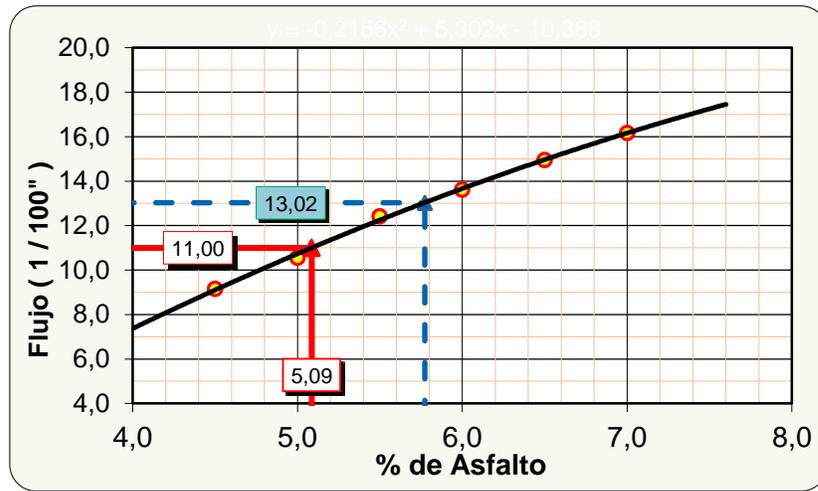
**Figura 4.2: Curva Estabilidad vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura la estabilidad crece a medida que el % de Asfalto aumenta, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será la Estabilidad hasta llegar al valor Óptimo % de Asfalto donde vuelve a decrecer la Estabilidad.

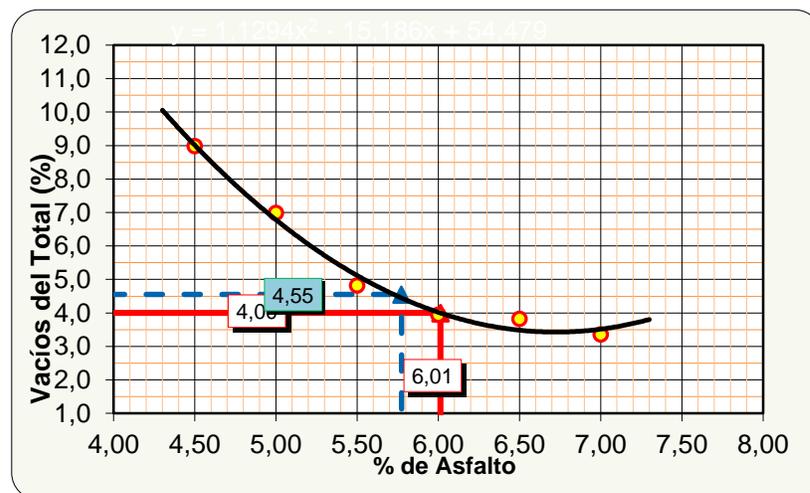
**Figura 4.3: Flujo vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura el Flujo (fluencia) es proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será el Flujo.

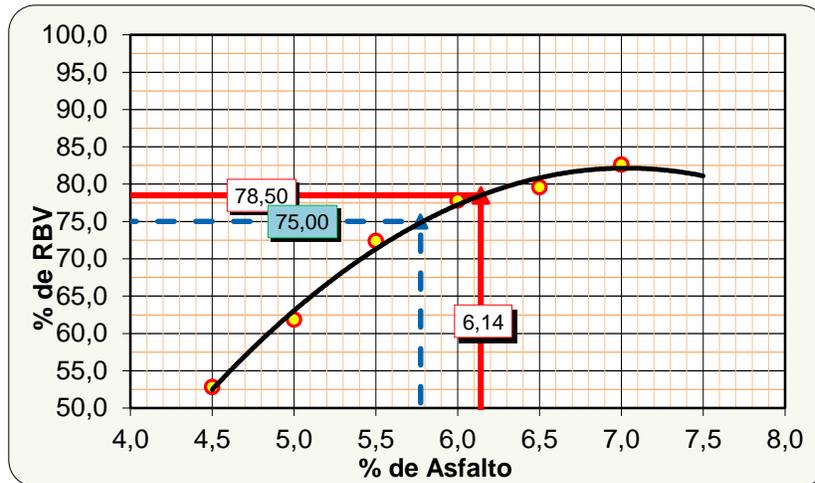
**Figura 4.4: Curva % de Vacíos vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura se observa que el % de Vacíos es inversamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, existiría menos Vacíos en la carpeta Asfáltica.

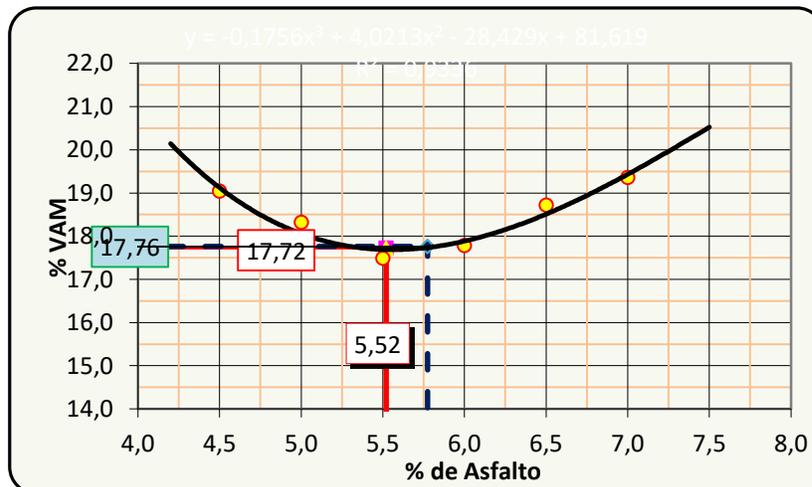
**Figura 4.5: Curva % de RBV vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura el % RBV es directamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será el % de RBV.

**Figura 4.6: Curva Vacíos Agregado Mineral vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura los Vacíos del Agregado Mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con los incrementos de % de Asfalto. En este caso el Porcentaje Óptimo de Asfalto expresa un valor intermedio de Vacíos de Agregado Mineral.

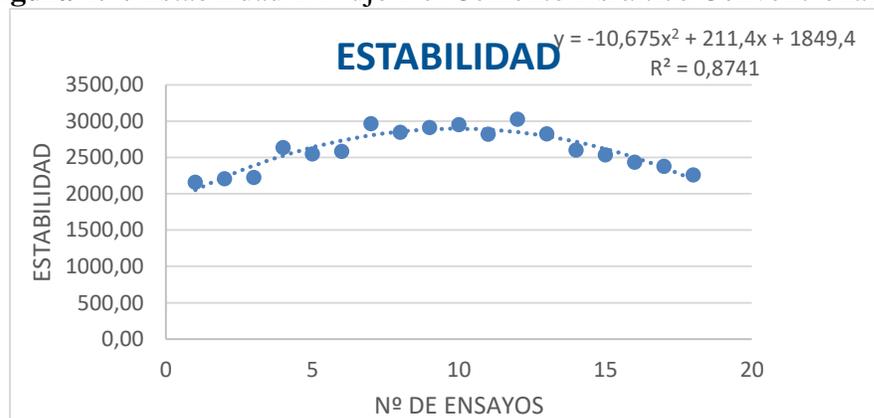
#### 4.3.1.2. Tratamiento Estadístico Básico

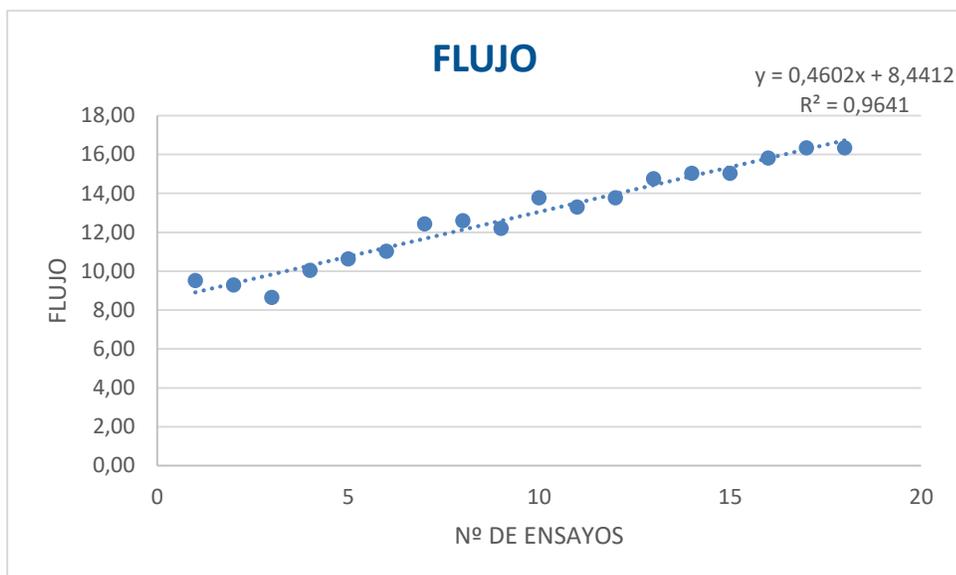
Nº	FLUJO	Nº	ESTABILIDAD
1	9,53	1	2158,30
2	9,29	2	2206,80
3	8,66	3	2226,65
4	10,04	4	2634,50
5	10,63	5	2550,72
6	11,02	6	2586,00
7	12,44	7	2965,19
8	12,60	8	2848,34
9	12,20	9	2914,48
10	13,78	10	2951,96
11	13,31	11	2821,89
12	13,78	12	3026,92
13	14,76	13	2826,30
14	15,04	14	2599,22
15	15,04	15	2535,29
16	15,83	16	2436,08
17	16,34	17	2378,76
18	16,34	18	2259,72

<b>Número de Datos</b>	<b>18</b>	<b>18</b>
<b>Media (hd)</b>	<b>12,813</b>	<b>2607,062</b>
<b>Desviación (Sd)</b>	<b>2,502</b>	<b>285,772</b>
<b>Moda (Ed)</b>	<b>11,672</b>	<b>2476,750</b>
<b>Característica (Kd)</b>	<b>0,385</b>	<b>0,207</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 4.7:** Estabilidad Y Flujo Del Cemento Asfáltico Convencional





Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 4.1:** Resumen de resultados del método Marshall Convencional

PORCENTAJE DE RESIDUO DE CAUCHO (%)	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (Libras)	FLUJO	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÓN VACÍOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
0	2,25	2197,25	9,16	8,98	52,82	19,04
0	2,28	2590,41	10,56	6,99	61,86	18,32
0	2,32	2909,34	12,41	4,82	72,40	17,48
0	2,32	2933,59	13,62	3,95	77,78	17,78
0	2,31	2653,60	14,95	3,82	79,58	18,72
0	2,30	2358,19	16,17	3,36	82,63	19,36
<b>Valor promedio</b>	2,30	2607,06	12,81	5,32	71,18	18,45

Fuente: Elaboración Propia

### 4.3.2. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA CON EL 1% DE RESIDUO DE CAUCHO



LABORATORIO DE SUELOS, ASFALTOS Y HORMIGONES



**" DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE // METODO MARSHALL 1% DE RESIDUO DE CAUCHO "**

Proyecto: PROYECTO DE GRADO CIV - 502

Fecha: 28 de Septiembre de 2016

DISEÑO - MRSH - 02

Pesos Específicos (AASHTO T-100 - T-85)		% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20		DOSIFICACION						GRAVA - Vaferoon		RAVILLA - Vargas y Charajá		ARENA CHANCA DA - Vaferoon		ARENA - Vargas - Charajá					
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,641	gr/cm <sup>3</sup>	43,4	Tipo de asfalto AASHTO M 20	85-100	3/4"						3/8"		N°4		N°4							
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,669	gr/cm <sup>3</sup>	56,6	P. E específico Total AASHTO T-228	1,008	% DE AGREGADOS :						22%		27%		24%		27%					
P. Esp. Agregado Total (Gag.)	2,657	gr/cm <sup>3</sup>	100	Densidad del Caucho	0,158	ORIGEN AGREGADOS :						Acopio Planta de Asfaltos Charajá											
N° GOLPES:		75		135 °C Compactación																			
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA (CM)	% DE ASFALTO		PESO BRIQUETA EN EL AIRE	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.	PESO BRIQUETA SUMERIDA EN AGUA	VOLUMEN BRIQUETA	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacíos			ESTABILIDAD (Lb)						LECT. DIAL	FLUJO 1/100	MEDIA	
		BASE AGREGADO	BASE MEZCLA					REAL (Dr.)	PROMEDIO (Dm.)	MAXIMA TEORICA	MEZCLA (Vv)	AGREGADOS (VAM)	LLENOS DE ASFALTO (RBV)	LECT. DIAL	REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION (ALTURA)		LECT. DIAL				CORREGIDA
																	mm	MEDIA f.c.					
a	b	c	r	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p							
1	6,98	4,71	4,50	1178,6	1185,6	660,2	525,4	2,243					690	1521,2		0,862			252	9,9			
2	6,96	4,71	4,50	1192,0	1198,9	664,6	534,3	2,231					705	1554,2		0,866			230	9,1			
3	6,85	4,71	4,50	1182,0	1191,4	662,3	529,1	2,234	2,236	2,465	9,29	19,43	52,20	725	1598,3	1557,9	0,886	0,871	1356,9	260	10,2	9,74	
4	6,98	5,26	5,00	1194,9	1202,9	675,2	527,7	2,264					888	1957,7		0,862			270	10,6			
5	6,96	5,26	5,00	1194,3	1203,0	672,5	530,5	2,251					840	1851,9		0,866			280	11,0			
6	6,80	5,26	5,00	1192,5	1198,5	669,0	529,5	2,252	2,256	2,446	7,79	19,14	59,30	865	1907,0	1905,5	0,898	0,875	1667,3	272	10,7	10,79	
7	6,85	5,82	5,50	1191,0	1195,9	675,0	520,9	2,286					982	2164,9		0,886			330	13,0			
8	6,81	5,82	5,50	1197,6	1201,9	680,0	521,9	2,295					1005	2215,6		0,895			300	11,8			
9	6,90	5,82	5,50	1192,7	1197,0	675,6	521,4	2,287	2,290	2,428	5,71	18,36	68,91	970	2138,5	2173,0	0,877	0,886	1925,3	320	12,6	12,47	
10	6,87	6,38	6,00	1198,2	1204,3	689,2	515,1	2,326					925	2039,3		0,883			350	13,8			
11	6,94	6,38	6,00	1189,7	1196,3	683,2	513,1	2,319					900	1984,1		0,869			370	14,6			
12	6,76	6,38	6,00	1190,0	1194,2	684,6	509,6	2,335	2,327	2,410	3,46	17,47	80,18	936	2063,5	2029,0	0,908	0,886	1797,7	380	15,0	14,44	
13	6,69	6,95	6,50	1194,1	1196,4	680,6	515,8	2,315					805	1774,7		0,925			480	18,9			
14	6,78	6,95	6,50	1191,5	1193,9	677,9	516,0	2,309					825	1818,8		0,903			450	17,7			
15	6,65	6,95	6,50	1187,0	1191,2	678,0	513,2	2,313	2,312	2,392	3,34	18,41	81,84	836	1843,0	1812,2	0,934	0,920	1667,2	430	16,9	17,85	
16	6,54	7,53	7,00	1190,5	1193,2	675,0	518,2	2,297					752	1657,9		0,954			540	21,3			
17	6,56	7,53	7,00	1185,3	1188,9	672,3	516,6	2,294					742	1635,8		0,951			550	21,7			
18	6,57	7,53	7,00	1188,2	1192,2	676,2	516,0	2,303	2,298	2,375	3,23	19,35	83,30	765	1686,5	1660,1	0,949	0,951	1578,7	572	22,5	21,81	

OBSERVACIONES      ESPECIFICACIONES      3 - 5    ≥ 15    75 - 82      ≥ 1500 Lb.      8 - 14

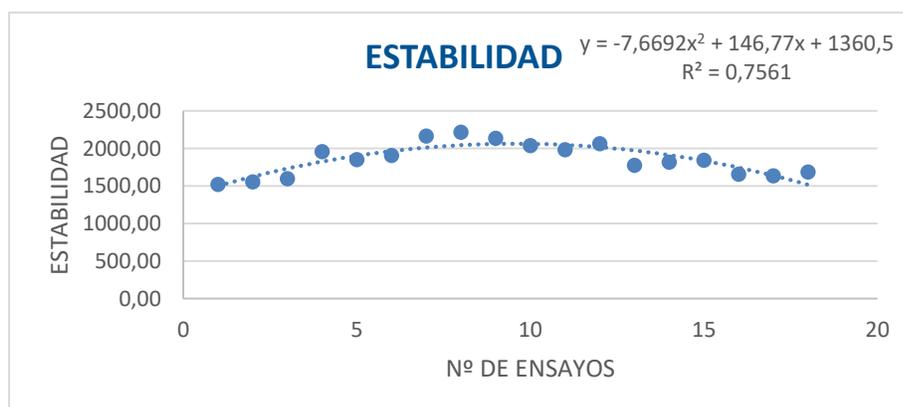
#### 4.3.2.1. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO BÁSICO AL 1% DE RESIDUO DE CAUCHO

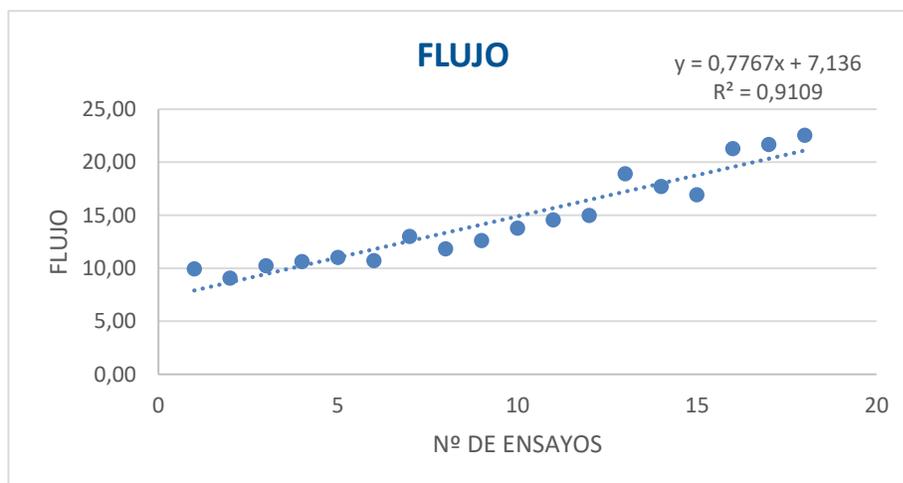
Nº	FLUJO	Nº	ESTABILIDAD
1	9,92	1	1521,17
2	9,06	2	1554,24
3	10,24	3	1598,34
4	10,63	4	1957,68
5	11,02	5	1851,86
6	10,71	6	1906,98
7	12,99	7	2164,92
8	11,81	8	2215,62
9	12,60	9	2138,46
10	13,78	10	2039,26
11	14,57	11	1984,14
12	14,96	12	2063,51
13	18,90	13	1774,70
14	17,72	14	1818,80
15	16,93	15	1843,05
16	21,26	16	1657,86
17	21,65	17	1635,81
18	22,52	18	1686,52

<b>Número de Datos</b>	<b>18</b>	<b>18</b>
<b>Media (hd)</b>	<b>14,514</b>	<b>1856,273</b>
<b>Desviación (Sd)</b>	<b>4,344</b>	<b>217,573</b>
<b>Moda (Ed)</b>	<b>12,533</b>	<b>1757,060</b>
<b>Característica (Ed)</b>	<b>0,622</b>	<b>0,222</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 4.8: Estabilidad y Flujo con El 1% de Residuo de Caucho**





Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 4.2:** Resumen de resultados del método Marshall añadiendo 1 % de Residuo de Caucho.

PORCENTAJE DE RESIDUO DE CAUCHO (%)	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (Libras)	FLUJO	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÓN VACÍOS) (%)	V.A.M. (VACÍOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
1	2,24	1557,92	9,74	9,29	52,20	19,43
1	2,26	1905,51	10,79	7,79	59,30	19,14
1	2,29	2173,00	12,47	5,71	68,91	18,36
1	2,33	2028,97	14,44	3,46	80,18	17,47
1	2,31	1812,18	17,85	3,34	81,84	18,41
1	2,30	1660,06	21,81	3,23	83,30	19,35
<b>Valor promedio</b>	2,29	1856,27	14,51	5,47	70,95	18,69

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.2 se determinan los valores promedios de densidad, estabilidad, flujo, % de vacíos, relación betún – vacíos, y vacíos de agregado mineral, con estos resultados de los valores promedios se elaborará una tabla de resumen 4,6 donde dichos resultados serán analizados, donde se verá la mejor mezcla asfáltica variando el porcentaje de Residuo de Caucho.

### 4.3.3. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA CON EL 2% DE RESIDUO DE CAUCHO



LABORATORIO DE SUELOS, ASFALTOS Y HORMIGONES



**" DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE // METODO MARSHALL CON 2% DE RESIDUO DE CAUCHO "**

Proyecto: PROYECTO DE GRADO CIV - 502

Fecha: 28 de Septiembre de 2016

DISEÑO - MRSH - 03

Pesos Especificos (AASHTO T-100, T-85)		% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20		DOSIFICACION							GRAVA - GAUCHO		GRAVILLA - GAUCHO		ARENA CHANCADA - GAUCHO		FILLER CHARAJA			
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,641	gr/cm <sup>3</sup>	43,4	Tipo de asfalto AASHTO M20	85-100	% DE AGREGADOS :							3/4"	3/8"	N°4		N°4					
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,669	gr/cm <sup>3</sup>	56,6	P. Especifico Total AASHTO T-22	1,008	ORIGEN AGREGADOS :							22%	27%	24%		27%					
P. Esp. Agregado Total (Gag.)	2,657	gr/cm <sup>3</sup>	100	Densidad del Caucho	0,158	Acopio Planta de Asfaltos Charaja																
N° GOLPES:		75	135 °C Compactación																			
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA A (CM)	% DE ASFALTO		PESO BRIQUETA EN EL AIRE (gr)	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.S (gr)	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA (gr)	VOLUMEN BRIQUETA A (cm3)	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacíos			ESTABILIDAD (Lb)						LECT. DIAL	FLUJO I /100	MEDIA
		BASE AGREGADO	BASE MEZCLA					REAL ( Dr. )	PROMEDIO ( Drm.)	MAXIMA TEORICA (kg/cm3)	MEZCLA ( Vv )	AGREGADOS ( VAM )	LLENOS DE ASFALTO ( RBV )	LECT. DIAL	REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION ( ALTURA )		CORREGIDA			
																	mm	MEDIA f.c.				
a	b	c	r	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p						
1	6,98	4,71	4,50	1190,2	1199,0	648,0	551,0	2,160						368	811,3		0,862			310	12,2	
2	6,96	4,71	4,50	1185,6	1193,2	645,0	548,2	2,163						350	771,6		0,866			350	13,8	
3	6,85	4,71	4,50	1187,5	1195,4	640,5	554,9	2,140	2,154	2,465	12,61	22,38	43,68	392	864,2	815,7	0,886	0,871	710,5	330	13,0	12,99
4	6,98	5,26	5,00	1190,5	1206,4	664,5	541,9	2,197						418	921,5		0,862			325	12,8	
5	6,96	5,26	5,00	1192,2	1200,1	655,6	544,5	2,190						468	1031,8		0,866			365	14,4	
6	6,80	5,26	5,00	1190,3	1197,7	653,4	544,3	2,187	2,191	2,446	10,44	21,46	51,37	445	981,0	978,1	0,898	0,875	855,8	355	14,0	13,71
7	7,18	5,82	5,50	1190,6	1203,1	674,8	528,3	2,254						682	1503,5		0,826			400	15,7	
8	7,15	5,82	5,50	1191,6	1199,8	667,4	532,4	2,238						635	1399,9		0,830			402	15,8	
9	7,10	5,82	5,50	1192,7	1198,2	665,7	532,5	2,240	2,244	2,428	7,59	19,99	62,04	642	1415,4	1439,6	0,839	0,832	1197,8	420	16,5	16,04
10	7,20	6,38	6,00	1191,8	1195,4	665,0	530,4	2,247						755	1664,5		0,824			450	17,7	
11	7,18	6,38	6,00	1191,5	1201,5	678,5	523,0	2,278						730	1609,4		0,826			470	18,5	
12	7,20	6,38	6,00	1188,8	1193,4	668,2	525,2	2,264	2,263	2,410	6,11	19,74	69,05	725	1598,3	1624,1	0,824	0,825	1339,8	462	18,2	18,14
13	6,98	6,95	6,50	1179,8	1185,9	661,1	524,8	2,248						720	1587,3		0,862			555	21,9	
14	7,14	6,95	6,50	1177,5	1182,8	658,0	524,8	2,244						650	1433,0		0,832			550	21,7	
15	7,20	6,95	6,50	1185,5	1192,1	664,8	527,3	2,248	2,247	2,392	6,09	20,74	70,63	665	1466,1	1495,5	0,824	0,839	1254,7	520	20,5	21,33
16	6,88	7,53	7,00	1188,0	1192,1	665,2	526,9	2,255						550	1212,5		0,881			632	24,9	
17	6,75	7,53	7,00	1192,1	1194,6	662,4	532,2	2,240						565	1245,6		0,910			620	24,4	
18	6,80	7,53	7,00	1190,2	1192,6	662,8	529,8	2,247	2,247	2,375	5,38	21,15	74,54	580	1278,7	1245,6	0,898	0,896	1116,1	650	25,6	24,96

OBSERVACIONES      ESPECIFICACIONES      3 - 5 ≥ 15    75 - 82      ≥ 1500 Lb.      8 - 14

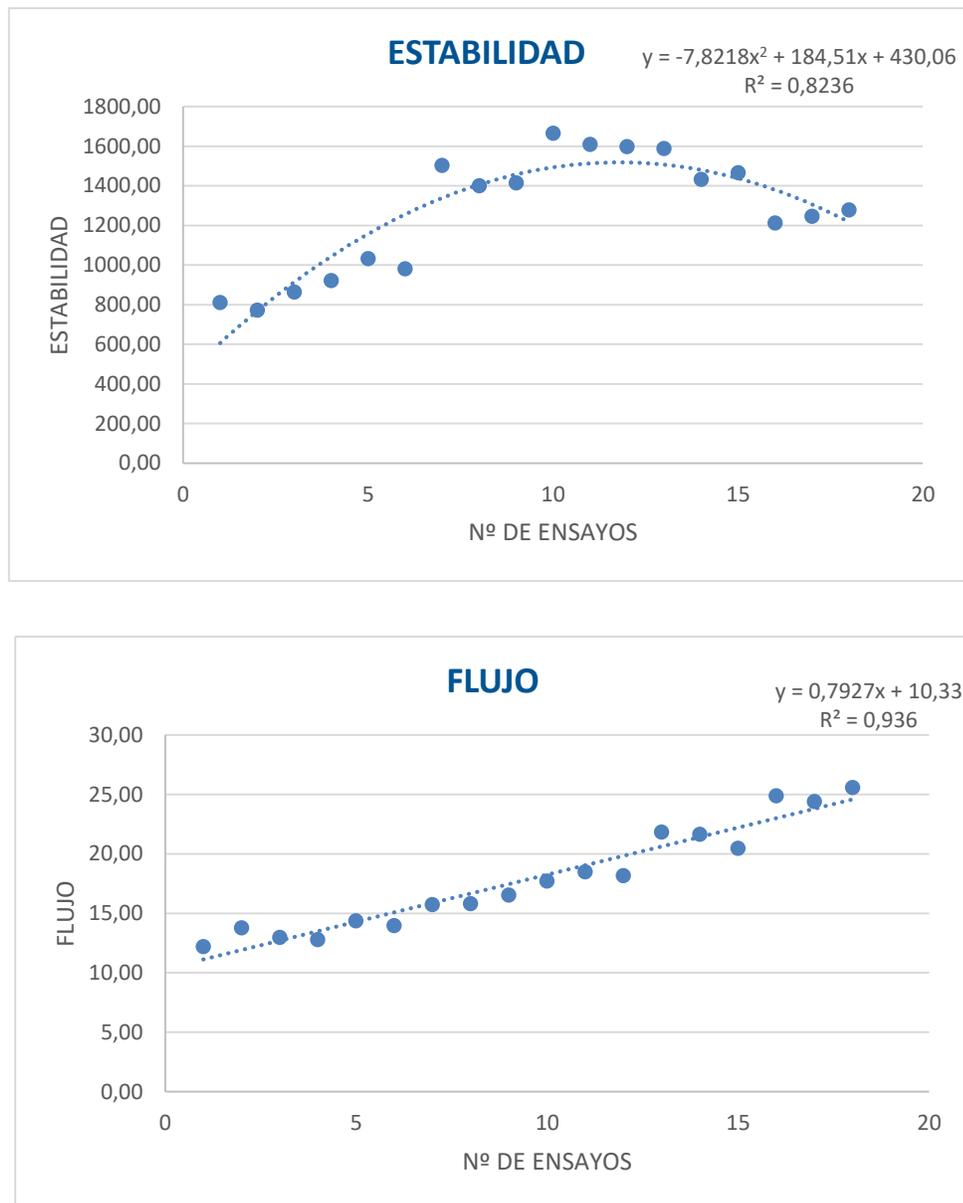
#### 4.3.3.1. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO BÁSICO AL 2 % DE RESIDUO DE CAUCHO.

Nº	FLUJO	Nº	ESTABILIDAD
1	12,20	1	811,29
2	13,78	2	771,61
3	12,99	3	864,20
4	12,80	4	921,52
5	14,37	5	1031,75
6	13,98	6	981,05
7	15,75	7	1503,54
8	15,83	8	1399,92
9	16,54	9	1415,35
10	17,72	10	1664,47
11	18,50	11	1609,36
12	18,19	12	1598,34
13	21,85	13	1587,31
14	21,65	14	1432,99
15	20,47	15	1466,06
16	24,88	16	1212,53
17	24,41	17	1245,60
18	25,59	18	1278,67

<b>Número de Datos</b>	<b>18</b>	<b>18</b>
<b>Media (hd)</b>	<b>17,861</b>	<b>1266,420</b>
<b>Desviación (Sd)</b>	<b>4,374</b>	<b>299,581</b>
<b>Moda (Ed)</b>	<b>15,866</b>	<b>1129,811</b>
<b>Característica (Ed)</b>	<b>0,495</b>	<b>0,476</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 4.9: Estabilidad y Flujo con el 2% de Residuo de Caucho**



Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 4.3:** Resumen de resultados del método Marshall añadiendo 2 % de Residuo de Caucho

PORCENTAJE DE RESIDUO DE CAUCHO (%)	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (Libras)	FLUJO	% DE VACÍOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
2	2,15	815,70	12,99	12,61	43,68	22,38
2	2,19	978,11	13,71	10,44	51,37	21,46
2	2,24	1439,60	16,04	7,59	62,04	19,99
2	2,26	1624,06	18,14	6,11	69,05	19,74
2	2,25	1495,45	21,33	6,09	70,63	20,74
2	2,25	1245,60	24,96	5,38	74,54	21,15
<b>Valor promedio</b>	2,22	1266,42	17,86	8,04	61,89	20,91

*Fuente: Elaboración Propia*

En la tabla 4.3 se determinan los valores promedios de densidad, estabilidad, flujo, % de vacíos, relación betún – vacíos, y vacíos de agregado mineral, con estos resultados de los valores promedios se elaborará una tabla de resumen 4,6 donde dichos resultados serán analizados, donde se verá la mejor mezcla asfáltica variando el porcentaje de Residuo de Caucho.

### 4.3.4. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA CON EL 3% DE RESIDUO DE CAUCHO



LABORATORIO DE SUELOS, ASFALTOS Y HORMIGONES



**" DISEÑO DE MEZCLA AFALTICA EN CALIENTE // METODO MARSHALL CON 3% DE RESIDUO DE CAUCHO "**

Proyecto: PROYECTO DE GRADO CIV - 502

Fecha: 3 de Octubre de 2016

DISEÑO - MRSH - 02

Pesos Especificos (AASHTO T-100 , T-85)		% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20		DOSIFICACION		GRAVA - GAUCHO	GRAVILLA - GAUCHO	ENA CHANCADA - GAUCHO	FILLER - CHARAJA												
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,641	gr/cm <sup>3</sup>	43,4	Tipo de asfalto AASHTO M20	85-100	% DE AGREGADOS :		3/4"	3/8"	N°4	N°4												
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,669	gr/cm <sup>3</sup>	56,6	P. Especifico Total AASHTO T-228	1,008	ORIGEN AGREGADOS :		22%	27%	24%	27%												
P. Esp. Agregado Total (Gag.):	2,657	gr/cm <sup>3</sup>	100	Densidad del Caucho	0,158	Acopio Planta de Asfaltos Charaja																	
N° GOLPES:		75		135 °C Compactación																			
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA (CM)	% DE ASFALTO		PESO BRIQUETA EN EL AIRE (gr)	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S. (gr)	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA (gr)	VOLUMEN BRIQUETA (cm3)	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacios			ESTABILIDAD (Lb)				LECT. DIAL	FLUJO 1 /100	MEDIA			
		BASE AGREGADO	BASE MEZCLA					REAL ( Dr. )	PROMEDIO (Dm.)	MAXIMA TEORICA	MEZCLA ( Vv )	AGREGADOS ( VAM )	LLENOS DE ASFALTO ( RBV )	LECT. DIAL	REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION (ALTURA )				MEDIA f.c.	CORREGIDA	
																	m						mm
a	b	c	r	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p							
1	6,87	4,71	4,50	1192,2	1196,8	628,0	568,8	2,096					380	837,7		0,883			285	11,2			
2	6,96	4,71	4,50	1186,7	1191,2	625,8	565,4	2,099					350	771,6		0,866			310	12,2			
3	6,84	4,71	4,50	1193,5	1196,0	622,5	573,5	2,081	2,092	2,465	15,13	24,63	38,56	370	815,7	808,4	0,888	0,879	710,5	300	11,8	11,75	
4	6,93	5,26	5,00	1187,0	1192,5	640,0	552,5	2,148						502	1106,7		0,871			385	15,2		
5	6,82	5,26	5,00	1182,6	1186,2	632,0	554,2	2,134						491	1082,5		0,893			372	14,6		
6	6,80	5,26	5,00	1192,6	1197,5	634,4	563,1	2,118	2,133	2,446	12,79	23,54	45,64	450	992,1	1060,4	0,898	0,887	940,6	350	13,8	14,53	
7	7,00	5,82	5,50	1190,1	1196,5	642,0	554,5	2,146						525	1157,4		0,858			472	18,6		
8	6,88	5,82	5,50	1192,2	1197,2	645,8	551,4	2,162						535	1179,5		0,881			450	17,7		
9	6,96	5,82	5,50	1190,0	1196,5	640,2	556,3	2,139	2,149	2,428	11,49	23,37	50,85	520	1146,4	1161,1	0,866	0,868	1007,8	425	16,7	17,68	
10	6,94	6,38	6,00	1186,2	1192,5	648,9	543,6	2,182						560	1234,6		0,869			500	19,7		
11	7,00	6,38	6,00	1180,4	1186,8	645,5	541,3	2,181						575	1267,6		0,858			550	21,7		
12	6,84	6,38	6,00	1188,0	1192,9	650,9	542,0	2,192	2,185	2,410	9,35	22,51	58,48	550	1212,5	1238,3	0,888	0,872	1079,8	510	20,1	20,47	
13	6,99	6,95	6,50	1193,0	1195,6	648,0	547,6	2,179						553	1219,1		0,860			600	23,6		
14	7,12	6,95	6,50	1189,0	1192,9	650,0	542,9	2,190						588	1296,3		0,836			612	24,1		
15	7,00	6,95	6,50	1190,5	1193,8	650,2	543,6	2,190	2,186	2,392	8,62	22,87	62,33	568	1252,2	1255,9	0,858	0,851	1068,8	630	24,8	24,17	
16	6,90	7,53	7,00	1187,5	1189,0	645,0	544,0	2,183						485	1069,2		0,877			690	27,2		
17	6,80	7,53	7,00	1189,8	1191,5	642,5	549,0	2,167						480	1058,2		0,898			685	27,0		
18	6,85	7,53	7,00	1192,1	1194,2	643,5	550,7	2,165	2,172	2,375	8,56	23,80	64,03	512	1128,8	1085,4	0,886	0,887	962,7	680	26,8	26,97	
OBSERVACIONES		ESPECIFICACIONES		3 - 5		≥ 15		75 - 82		≥ 1500 lb.		8 - 14											

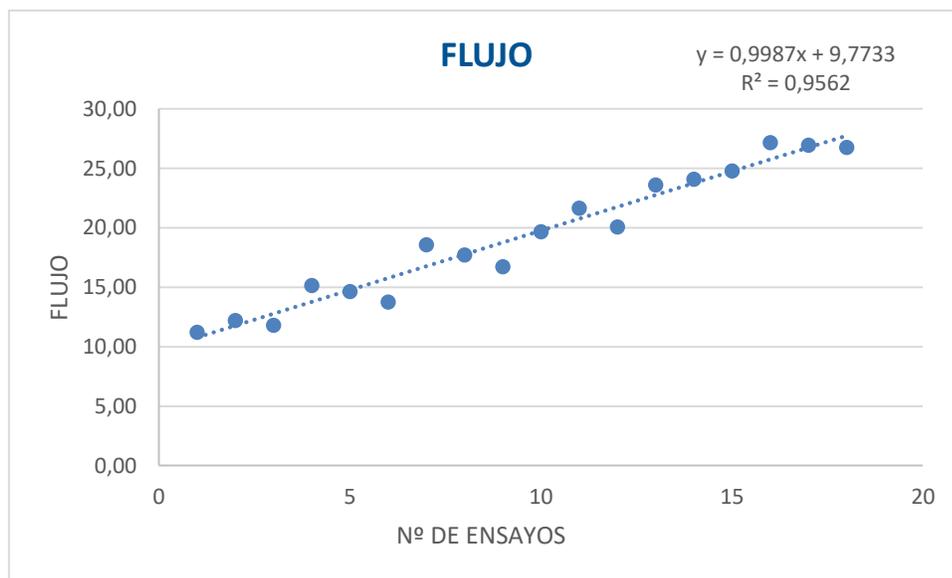
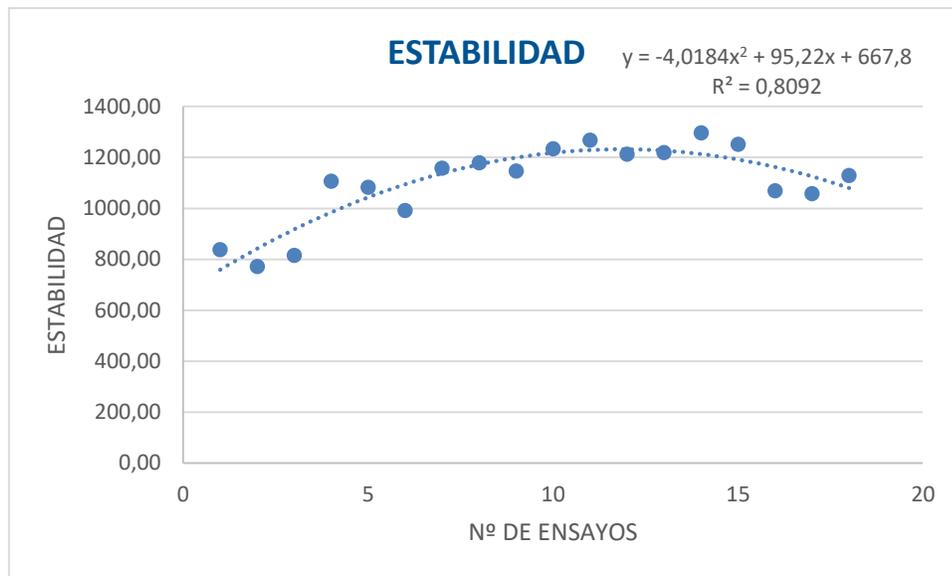
#### 4.3.4.1 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO BÁSICO AL 3% DE RESIDUO DE CAUCHO.

Nº	FLUJO	Nº	ESTABILIDAD
1	11,22	1	837,75
2	12,20	2	771,61
3	11,81	3	815,70
4	15,16	4	1106,71
5	14,65	5	1082,46
6	13,78	6	992,07
7	18,58	7	1157,42
8	17,72	8	1179,46
9	16,73	9	1146,39
10	19,69	10	1234,58
11	21,65	11	1267,65
12	20,08	12	1212,53
13	23,62	13	1219,14
14	24,09	14	1296,30
15	24,80	15	1252,21
16	27,17	16	1069,23
17	26,97	17	1058,21
18	26,77	18	1128,76

<b>Número de Datos</b>	<b>18</b>	<b>18</b>
<b>Media (hd)</b>	<b>19,261</b>	<b>1101,565</b>
<b>Desviación (Sd)</b>	<b>5,452</b>	<b>157,080</b>
<b>Moda (Ed)</b>	<b>16,775</b>	<b>1029,937</b>
<b>Característica (Ed)</b>	<b>0,584</b>	<b>0,274</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 4.10: Estabilidad y Flujo con el 3% de Residuo de Caucho**



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 4.4:** Resumen de resultados del método Marshall añadiendo 3 % de Residuo de Caucho

<b>PORCENTAJE DE RESIDUO DE CAUCHO (%)</b>	<b>DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ESTABILIDAD (Libras)</b>	<b>FLUJO</b>	<b>% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)</b>	<b>R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACÍOS) (%)</b>	<b>V.A.M. (VACÍOS DE AGREGADO MINERAL) (%)</b>
3	2,09	808,35	11,75	15,13	38,56	24,63
3	2,13	1060,41	14,53	12,79	45,64	23,54
3	2,15	1161,09	17,68	11,49	50,85	23,37
3	2,18	1238,25	20,47	9,35	58,48	22,51
3	2,19	1255,89	24,17	8,62	62,33	22,87
3	2,17	1085,40	26,97	8,56	64,03	23,80
<b>Valor promedio</b>	2,15	1101,57	19,26	10,99	53,31	23,45

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 4.4 se determinan los valores promedios de densidad, estabilidad, flujo, % de vacíos, relación betún – vacíos, y vacíos de agregado mineral, con estos resultados de los valores promedios se elaborará una tabla de resumen 4,6 donde dichos resultados serán analizados, donde se verá la mejor mezcla asfáltica variando el porcentaje de Residuo de Caucho.

### 3.5. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA CON EL 4% DE RESIDUO DE CAUCHO



LABORATORIO DE SUELOS, ASFALTOS Y HORMIGONES



**- DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE // METODO MARSHALL CON 4% DE RESIDUO DE CAUCHO -**

Proyecto: PROYECTO DE GRADO CIV - 502

Fecha: 3 de Octubre de 2016

DISEÑO - MRSH - 05

Pesos Especificos (AASHTO T-100 , T-85)		% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20		DOSIFICACION						GRAVA - Vafercon	RAVILLA - Vargas y Charaja	ARENA CHANCADA - Vaferco	ARENA - Vargas - Charaja											
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,641	gr/cm <sup>3</sup>	43,4	Tipo de asfalto AASHTO M.20	85-100	% DE AGREGADOS :						3/4"	3/8"	N°4	N°4											
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,669	gr/cm <sup>3</sup>	56,6	P. Especifico Total AASHTO T-228	1,008	ORIGEN AGREGADOS :						24%	28%	24%	24%											
P. Esp. Agregado Total (Gag.)	2,657	gr/cm <sup>3</sup>	100	Densidad del Caucho	0,158	Acopio Planta de Asfaltos Charaja																				
N° GOLPES:		75		135 °C Compactación																						
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA (CM)	% DE ASFALTO		PESO BRIQUETA EN EL AIRE	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA	VOLUMEN BRIQUETA	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacios			ESTABILIDAD (Lb)					LECT. DIAL	FLUJO 1/100	MEDIA					
		BASE AGREGADO	BASE MEZCLA					(gr)	(gr)	(gr)	(cm3)	REAL (Dr.)	PROMEDIO (Dm.)	MAXIMA TEORICA	MEZCLA (Vv)	AGREGADOS (VAM)	LENOS DE ASFALTO (RBV)	LECT. DIAL				REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION (ALTURA) mm	MEDIA f.c.	CORREGIDA
		a	b					c	r	d	e	f	g	h	i	j	k	l				m	n	o	p	
1	6,98	4,71	4,50	1190,2	1199,0	620,0	579,0	2,056						322	709,9		0,862			375	14,8					
2	6,96	4,71	4,50	1185,6	1193,2	615,8	577,4	2,053						290	639,3		0,866			400	15,7					
3	6,85	4,71	4,50	1187,5	1195,4	611,8	583,6	2,035	2,048	2,465	16,92	26,22	35,47	280	617,3	655,5	0,886	0,871	570,9	350	13,8	14,76				
4	6,98	5,26	5,00	1180,0	1195,4	632,0	563,4	2,094						402	886,2		0,862			500	19,7					
5	6,95	5,26	5,00	1185,5	1187,1	610,2	576,9	2,055						391	862,0		0,868			475	18,7					
6	6,80	5,26	5,00	1186,5	1197,7	625,8	571,9	2,075	2,075	2,446	15,20	25,64	40,75	390	859,8	869,3	0,898	0,876	761,5	450	17,7	18,70				
7	7,18	5,82	5,50	1194,1	1203,8	639,7	564,1	2,117						420	925,9		0,826			525	20,7					
8	7,15	5,82	5,50	1195,1	1204,4	636,8	567,6	2,106						425	937,0		0,830			576	22,7					
9	7,10	5,82	5,50	1192,7	1198,2	635,2	563,0	2,118	2,114	2,428	12,95	24,64	47,44	450	992,1	951,7	0,839	0,832	791,8	576	22,7	22,01				
10	7,20	6,38	6,00	1179,8	1180,8	627,2	553,6	2,131						460	1014,1		0,824			625	24,6					
11	7,18	6,38	6,00	1192,0	1198,7	632,2	566,5	2,104						475	1047,2		0,826			630	24,8					
12	7,20	6,38	6,00	1188,8	1193,4	635,2	558,2	2,130	2,122	2,410	11,97	24,76	51,65	450	992,1	1017,8	0,824	0,825	839,7	630	24,8	24,74				
13	6,98	6,95	6,50	1194,7	1202,2	642,8	559,4	2,136						453	998,7		0,862			705	27,8					
14	7,14	6,95	6,50	1194,0	1208,8	645,2	563,6	2,119						488	1075,8		0,832			710	28,0					
15	7,20	6,95	6,50	1185,5	1192,1	637,5	554,6	2,138	2,131	2,392	10,94	24,84	55,95	468	1031,8	1035,4	0,824	0,839	868,7	685	27,0	27,56				
16	6,88	7,53	7,00	1188,0	1192,1	632,1	560,0	2,121						400	881,8		0,881			690	27,2					
17	6,75	7,53	7,00	1192,1	1194,6	636,2	558,4	2,135						390	859,8		0,910			720	28,3					
18	6,80	7,53	7,00	1190,2	1192,6	635,8	556,8	2,138	2,131	2,375	10,26	25,22	59,32	435	959,0	900,2	0,898	0,896	806,6	705	27,8	27,76				

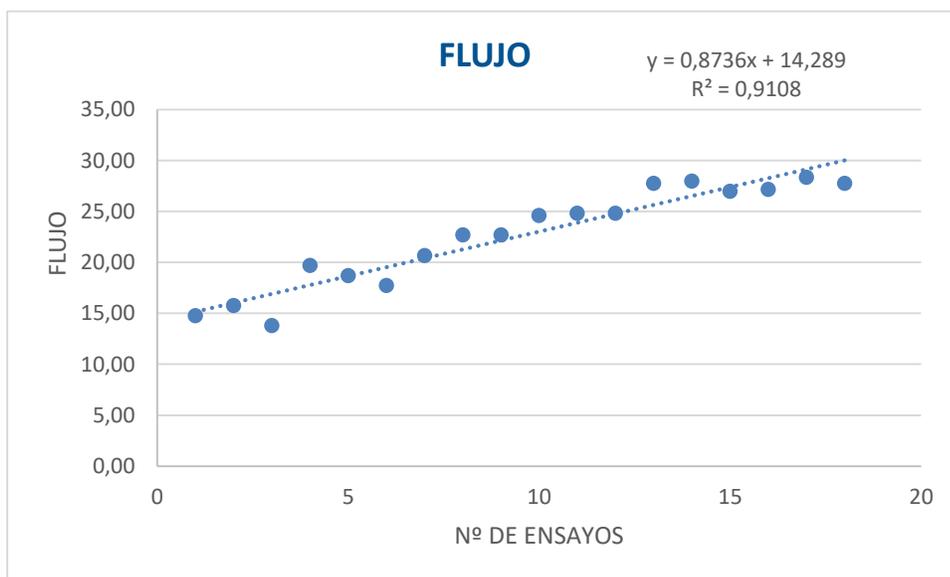
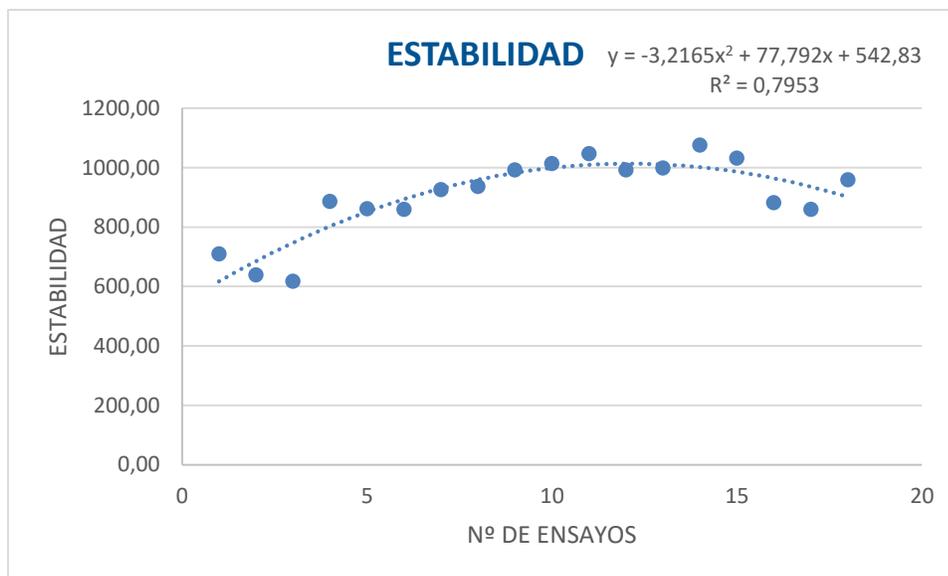
OBSERVACIONES ESPECIFICACIONES 3 - 5 ≥ 15 75 - 82 ≥ 1500 Lb. 8 - 14

#### 4.3.5.1 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO BÁSICO AL 4 % DE RESIDUO DE CAUCHO.

Nº	FLUJO	Nº	ESTABILIDAD
1	14,76	1	709,88
2	15,75	2	639,33
3	13,78	3	617,29
4	19,69	4	886,25
5	18,70	5	862,00
6	17,72	6	859,79
7	20,67	7	925,93
8	22,68	8	936,96
9	22,68	9	992,07
10	24,61	10	1014,12
11	24,80	11	1047,19
12	24,80	12	992,07
13	27,76	13	998,68
14	27,95	14	1075,84
15	26,97	15	1031,75
16	27,17	16	881,84
17	28,35	17	859,79
18	27,76	18	959,00

Número de Datos	18	18
Media (hd)	22,587	904,988
Desviación (Sd)	4,887	133,713
Moda (Ed)	20,359	844,015
Característica (Ed)	0,431	0,284

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 4.11: Estabilidad y Flujo con el 4% de Residuo de Caucho**

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 4.5:** Resumen de resultados del método Marshall añadiendo 4 % de Residuo de Caucho

<b>PORCENTAJE DE RESIDUO DE CAUCHO (%)</b>	<b>DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ESTABILIDAD (Libras)</b>	<b>FLUJO</b>	<b>% DE VACÍOS DE MEZCLA TOTAL (%)</b>	<b>R.B.V. (RELACIÓN BETÓN VACIOS) (%)</b>	<b>V.A.M. (VACÍOS DE AGREGADO MINERAL) (%)</b>
4	2,05	655,50	14,76	16,92	35,47	26,22
4	2,07	869,35	18,70	15,20	40,75	25,64
4	2,11	951,65	22,01	12,95	47,44	24,64
4	2,12	1017,79	24,74	11,97	51,65	24,76
4	2,13	1035,43	27,56	10,94	55,95	24,84
4	2,13	900,21	27,76	10,26	59,32	25,22
<b>Valor promedio</b>	2,10	904,99	22,59	13,04	48,43	25,22

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 4.5 se determinan los valores promedios de densidad, estabilidad, flujo, % de vacíos, relación betún – vacíos, y vacíos de agregado mineral, con estos resultados de los valores promedios se elaborará una tabla de resumen 4,6 donde dichos resultados serán analizados, donde se verá la mejor mezcla asfáltica variando el porcentaje de Residuo de Caucho.

#### 4.4. RESUMEN DE LOS RESULTADOS FINALES CON CADA PORCENTAJE DE RESIDUO DE CAUCHO.

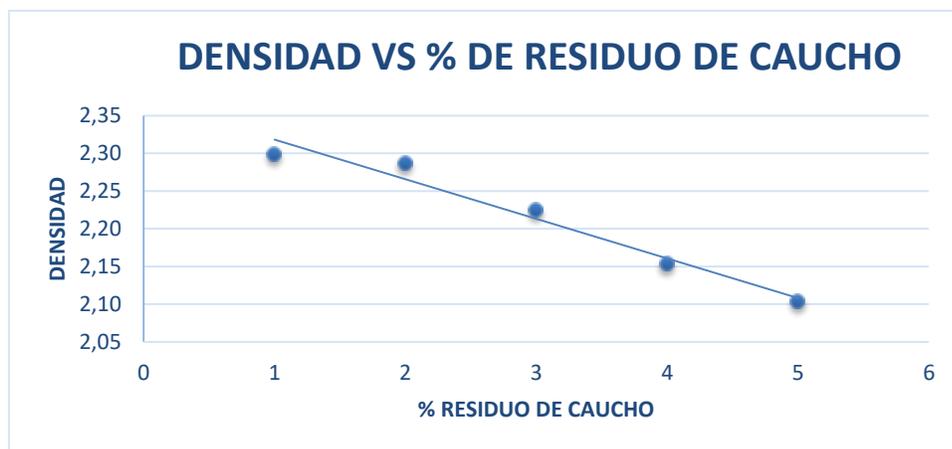
**Tabla 4.6:** Resumen de resultados finales por cada porcentaje

<b>PORCENTAJE DE RESIDUO DE CAUCHO (%)</b>	<b>DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ESTABILIDAD (Libras)</b>	<b>FLUJO</b>	<b>% DE VACÍOS DE MEZCLA TOTAL (%)</b>	<b>R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACÍOS) (%)</b>	<b>V.A.M. (VACÍOS DE AGREGADO MINERAL) (%)</b>
0	2,30	2607,06	12,81	5,32	71,18	18,45
1	2,29	1856,27	14,51	5,47	70,95	18,69
2	2,22	1266,42	17,86	8,04	61,89	20,91
3	2,15	1101,57	19,26	10,99	53,31	23,45
4	2,10	904,99	22,59	13,04	48,43	25,22

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.4.1. Análisis de Figuras

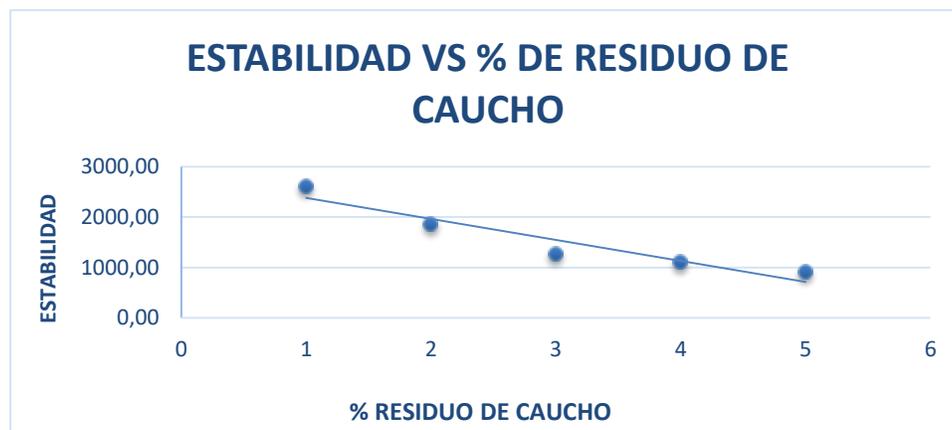
**Figura 4.12: Densidad vs % de Residuo de Caucho**



Fuente: Elaboración Propia.

En la figura la densidad es directamente proporcional a diferentes porcentajes de residuo de caucho en reemplazo de los agregados, se observa que la densidad disminuye en función al incremento del porcentaje de residuo de caucho.

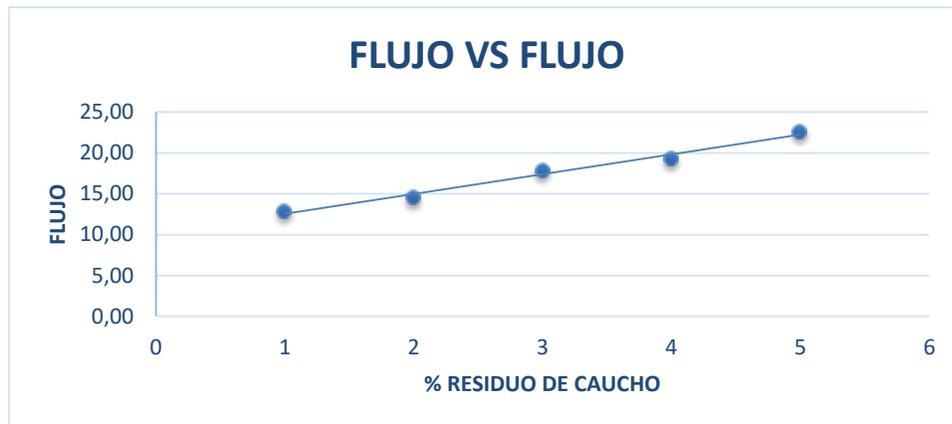
**Figura 4.13: Estabilidad vs % de Residuo de Caucho**



Fuente: Elaboración Propia.

En la figura la Estabilidad revela que a menor porcentaje de Residuo de Caucho tiene mayor estabilidad y a mayor porcentaje de Residuo de Caucho la Estabilidad es menor.

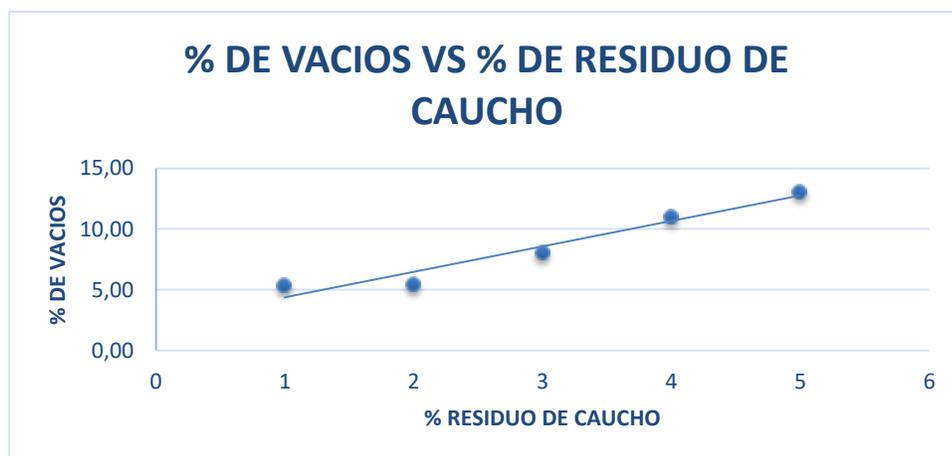
**Figura 4.14: Flujo vs % de Residuo de Caucho**



Fuente: Elaboración Propia.

En la figura el flujo es directamente proporcional a diferentes porcentajes de Residuo de caucho en reemplazo del agregado, se observa que el Flujo aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de Residuo de Caucho.

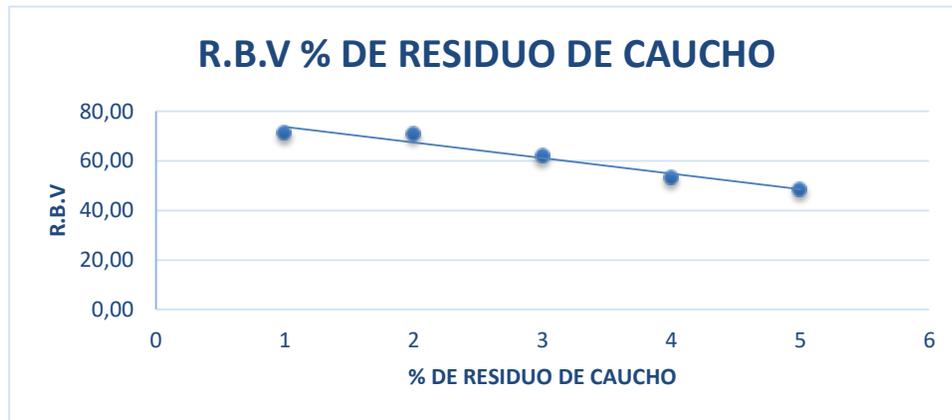
**Figura 4.15: % de Vacíos de las Mezclas vs % de Residuo de Caucho**



Fuente: Elaboración Propia.

En la figura se observa que el porcentaje de los vacíos en la mezcla ( $V_v$ ) es directamente proporcional a diferentes porcentajes de Residuo de Caucho en reemplazo de los agregados, se identifica que el porcentaje de vacíos asciende en cuanto se va aumentando el porcentaje de Residuo de Caucho.

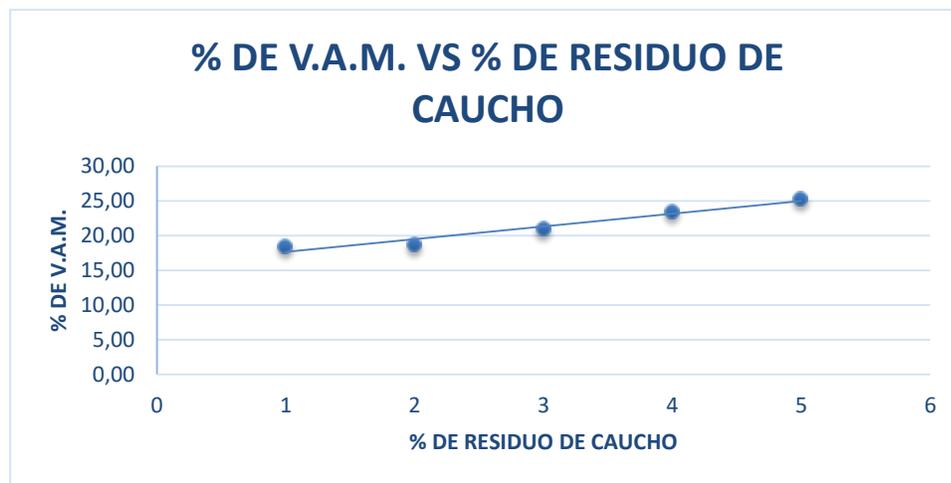
**Figura 4.16: % Relación Betún Vacíos vs % de Residuo de Caucho**



Fuente: Elaboración Propia.

En la figura se observa que el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV) en la mezcla es directamente proporcional a diferentes porcentajes de Residuo de Caucho en reemplazo de los agregados, se observa que el porcentaje de (RBV) desciende en cuanto se va añadiendo el porcentaje de Residuo de Caucho.

**Figura 4.17: % de Vacíos de Agregado Mineral vs % de Residuo de Caucho**



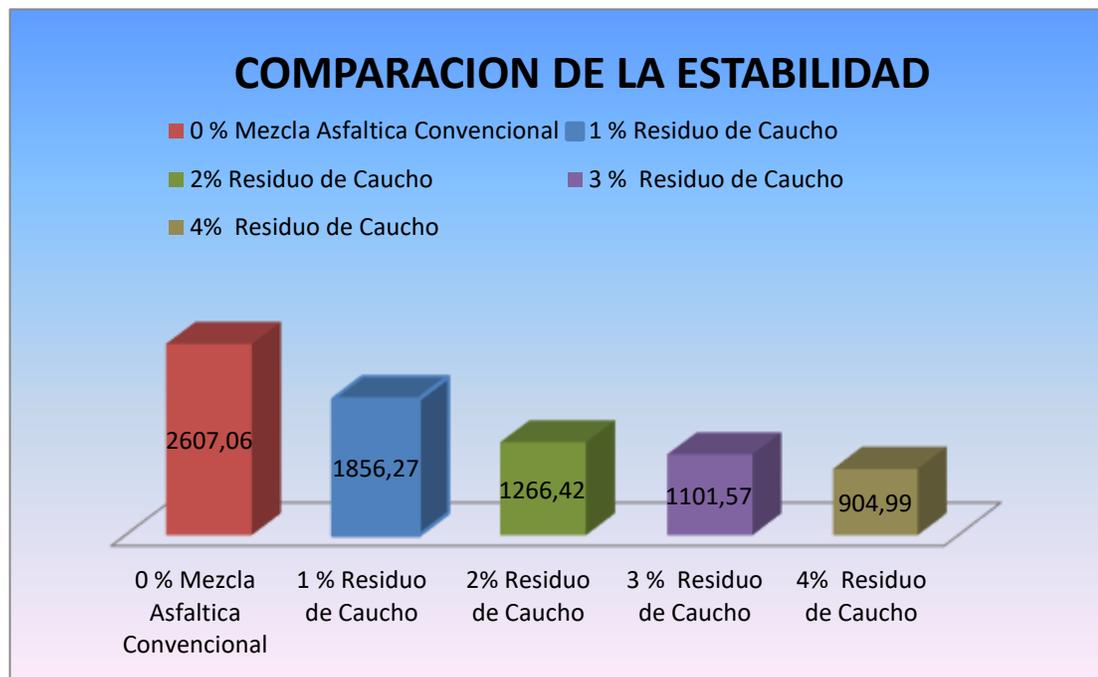
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) es directamente proporcional a diferentes porcentajes de Residuo de Caucho en reemplazo de los agregados, se observa que el porcentaje de vacíos aumenta en cuanto se va aumentando el porcentaje de Residuo de Caucho.

## 4.4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.4.2.1. Análisis de resultados del Método Marshall con diferentes porcentajes de Residuo de Caucho.

**Figura 4.18: Comparación de los Resultados de la Estabilidad**

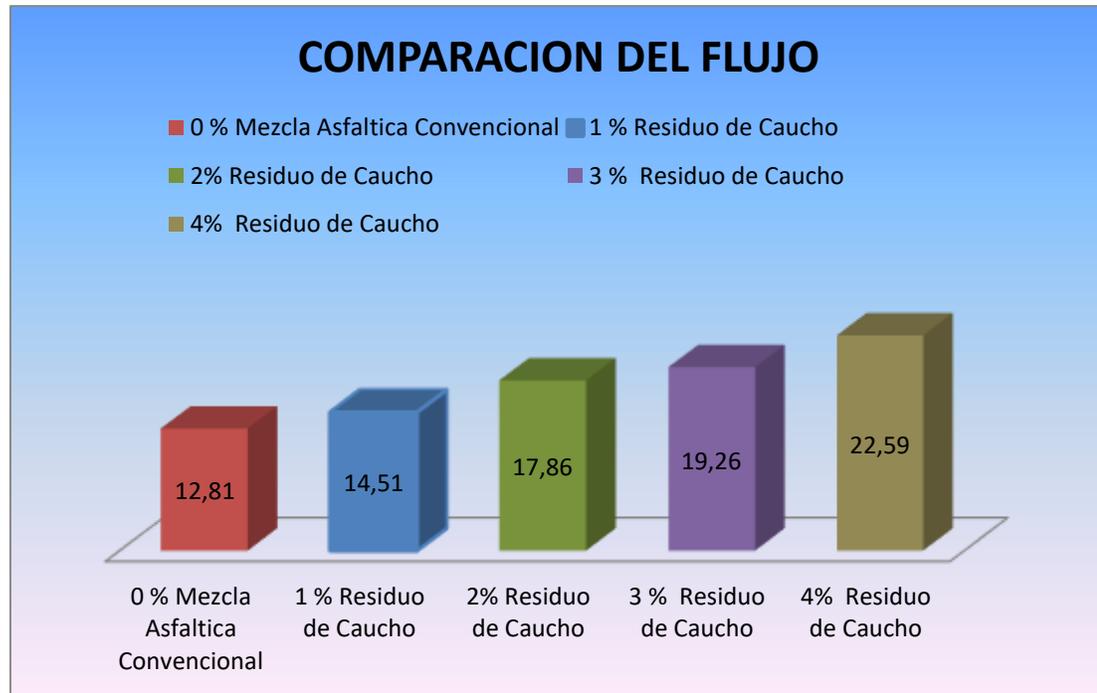


Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a los resultados de ESTABILIDAD del Marshall que por norma esta entre lo mínimo es 1500 libras para tráfico liviano observamos en la gráfica que:

- Se observa que en el porcentaje de 1% este cumple con el mínimo de la estabilidad requerida para tráfico liviano, pero disminuyo en cuanto a la estabilidad de la Mezcla Asfáltica convencional como se muestra en el gráfico.
- El porcentaje de 2% 3% y 4% baja su valor por debajo de la ESTABILIDAD requerida como mínimo.

**Figura 4.19: Comparación de los Resultados del Flujo**

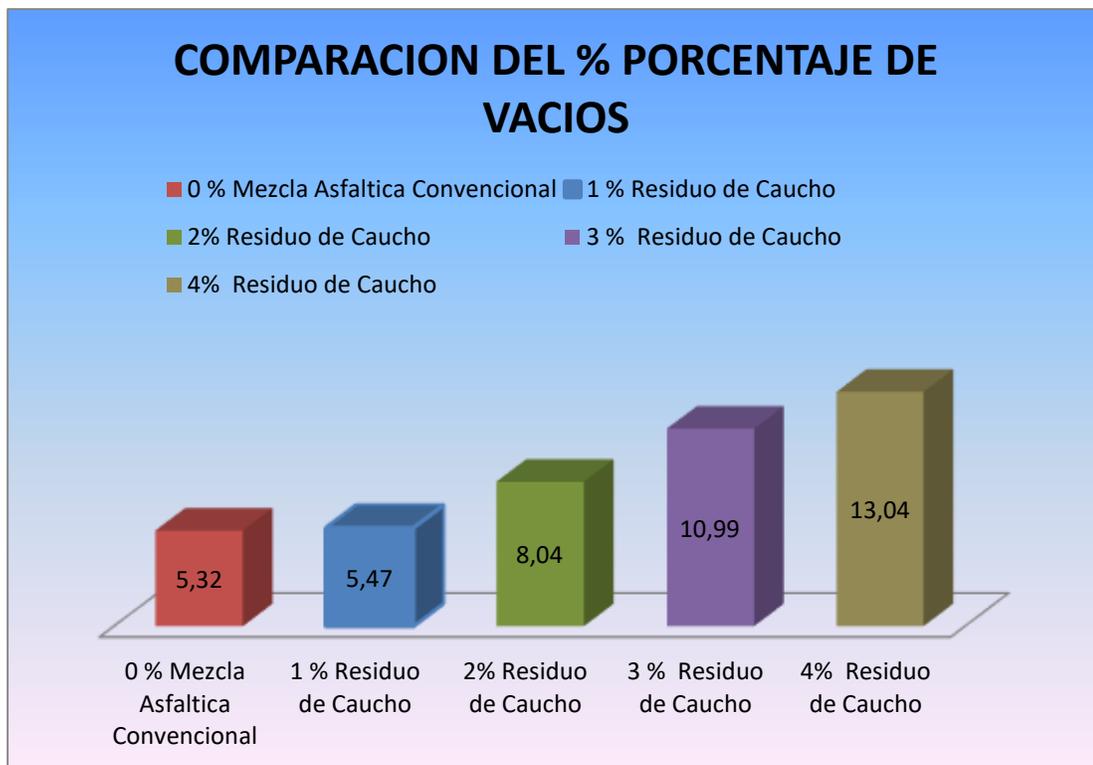


Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a los resultados de FLUJO del Marshall que por norma esta entre (8 y14), observamos en la gráfica que:

- Porcentajes 1%,2% 3% y 4% de Residuo de Caucho tienden a aumentar sus valores y en ambos casos se salen del rango del flujo que por norma es (8 -14).
- En los casos del porcentaje de 0% de Residuo de Caucho sus valore están dentro del rango que se tiene por norma del flujo.

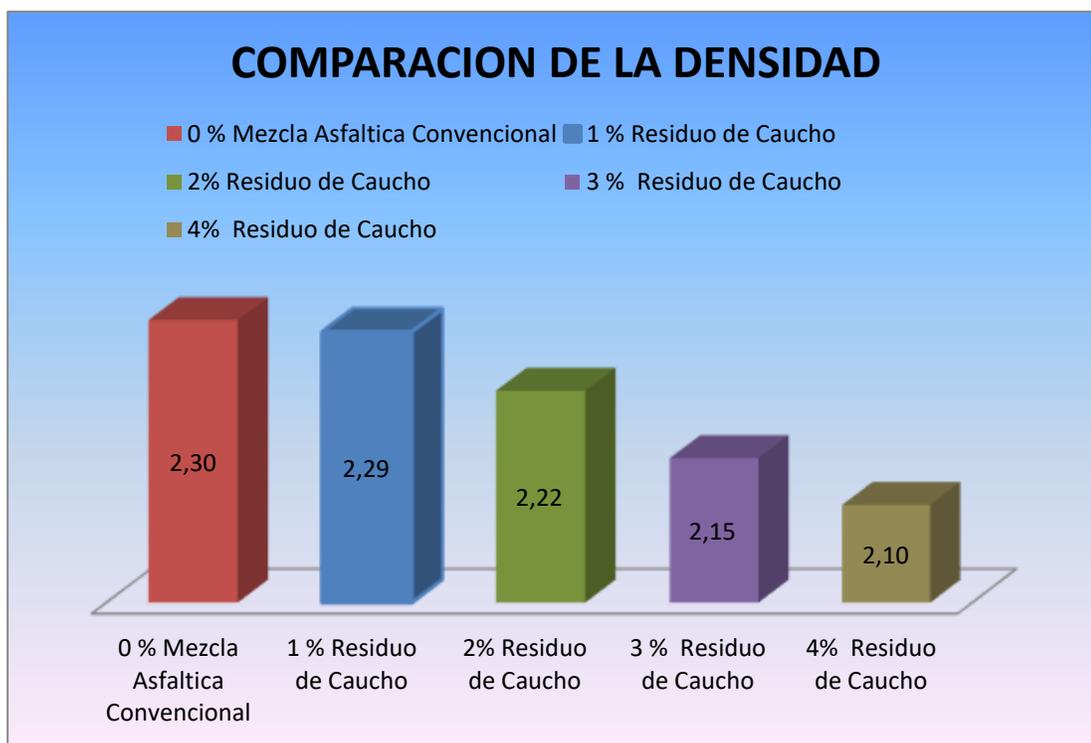
**Figura 4.20: Comparación de los Resultados del % de Vacíos**



Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a los resultados del % DE VACIOS del Marshall que por norma esta entre (3 y 5 %), observamos en la gráfica que:

- El porcentaje de 0% de Residuo de Caucho tienden a aumentar su valor por arriba del (5% de vacíos) por norma no cumple.
- Con los porcentajes del 1%, 2%, 3% y 4% de Residuo de Caucho no se pudo obtener mejoras en el % de vacíos ya que sus resultados fueron aumentando.

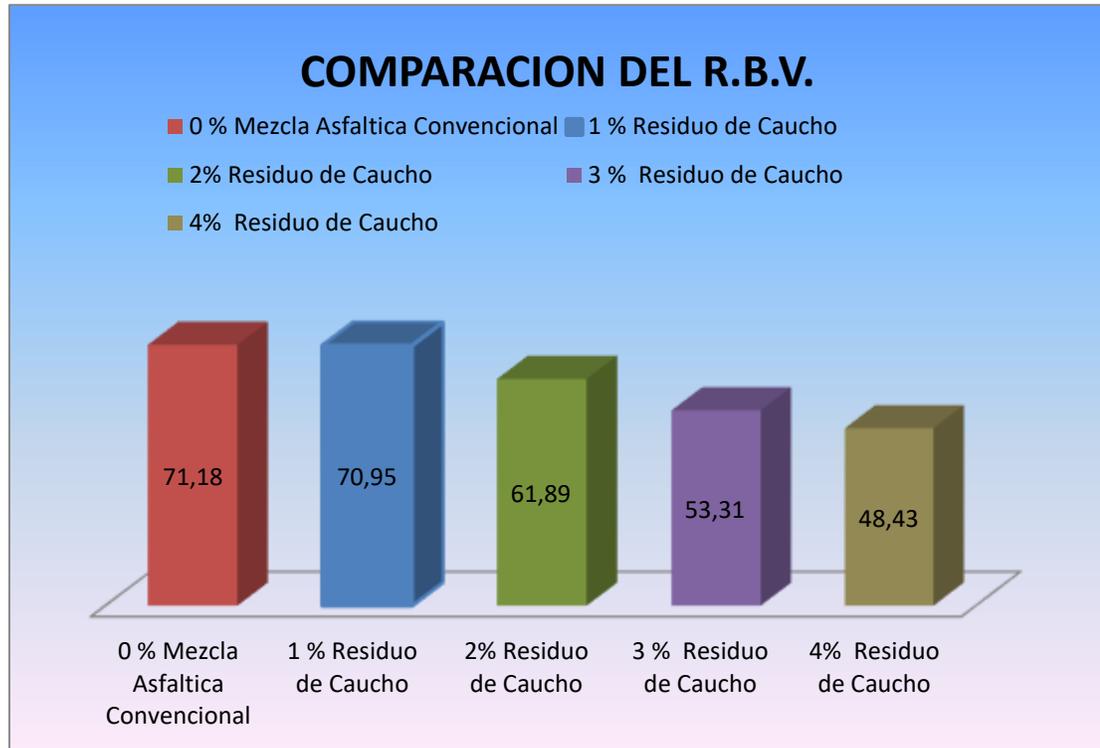
**Figura 4.21: Comparación de los Resultados de Densidad**

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a los resultados de la Densidad del Marshall, observamos en la gráfica que:

- Porcentajes 1%, 2%, 3% y 4% de Residuo de Caucho tienden a disminuir sus valores.

**Figura 4.22: Comparación de los Resultados del Relación Betún Vacíos.**

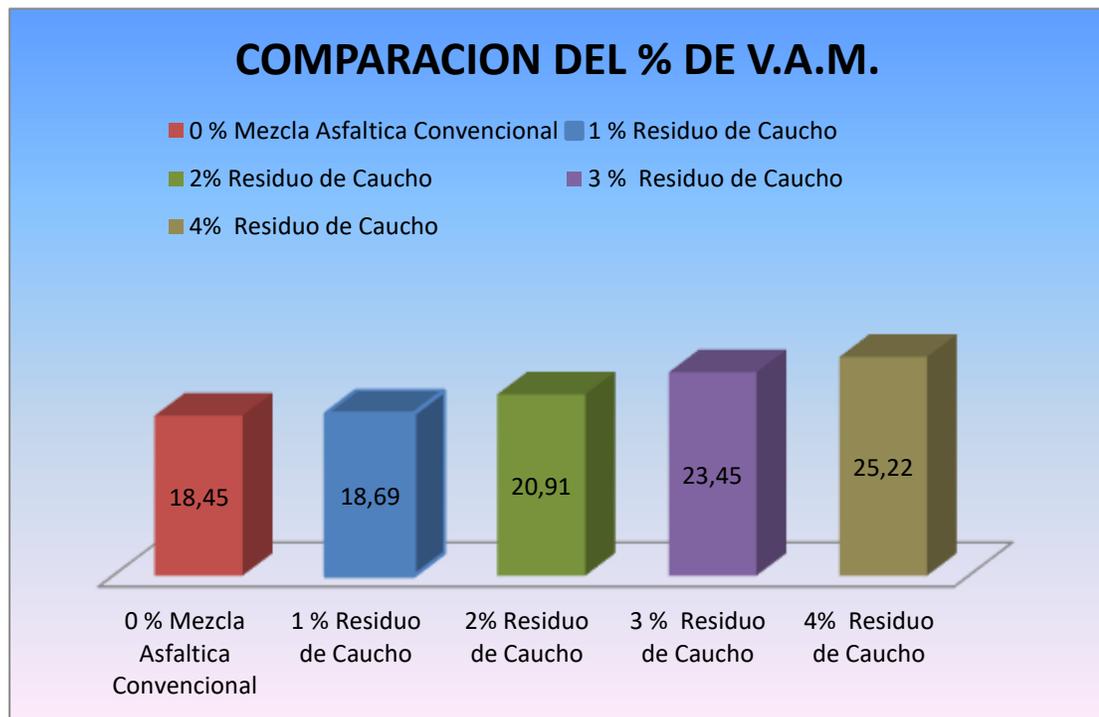


Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a los resultados del % de R.B.V. del Marshall que por norma esta entre (75 y 82), observamos en la gráfica que:

- El porcentaje de 0% de Residuo de Caucho por norma no cumple.
- Con los porcentajes del 1%, 2%, 3% y 4% de Residuo de Caucho no se pudo obtener mejoras en el R.B.V. ya que sus resultados fueron disminuyendo.

**Figura 4.23: Comparación de los Resultados del % de Vacíos de Agregado Mineral.**

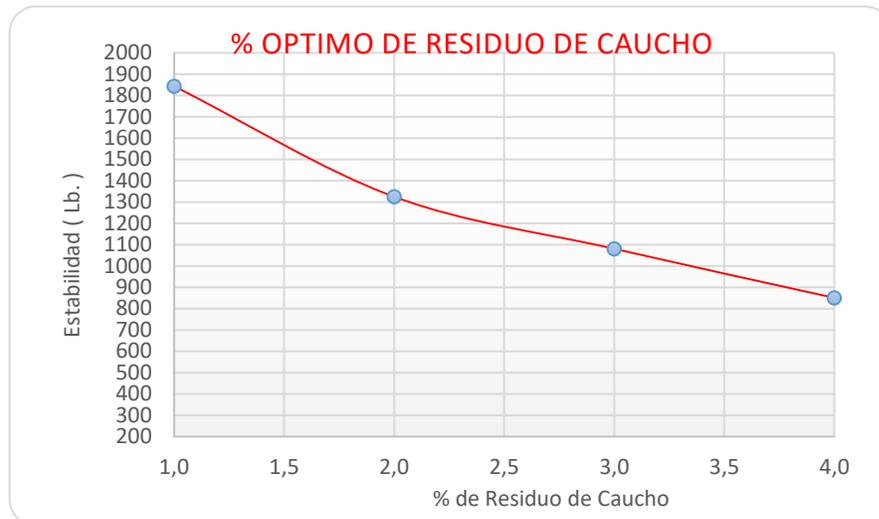


Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a los resultados del % del V.A.M del Marshall que por norma es (15 %), observamos en la gráfica que:

- El porcentaje de 0% de Residuo de Caucho su valor está por arriba del (15% de vacíos) por norma no cumple.
- Con los porcentajes del 1%, 2%, 3% y 4% de Residuo de Caucho no se pudo obtener mejoras en el % del V.A.M ya que sus resultados fueron aumentando.

**Figura 4.24: Proyección y Explicación de la Definición del Porcentaje de Residuo de Caucho**



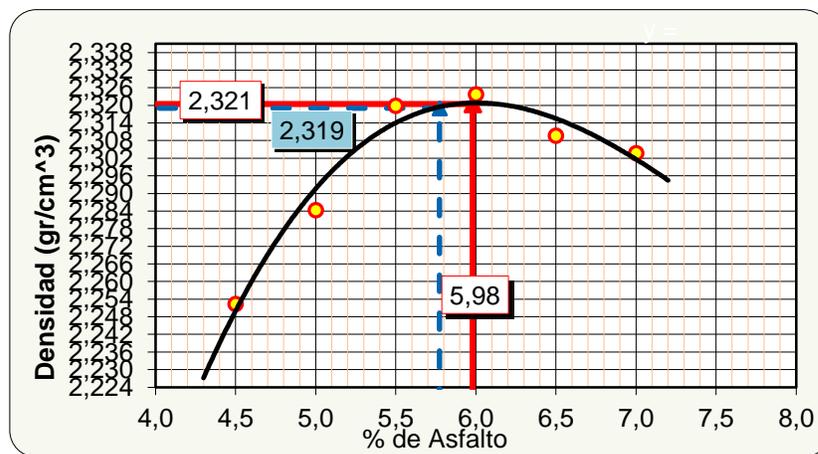
Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica nos muestra que a mayor porcentaje de residuo de caucho menor estabilidad.

Y el mejor resultado de estabilidad se obtuvo con el 1% de residuo de caucho llegando a cumplir con el mínimo de resistencia para tráfico liviano.

## RESULTADOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

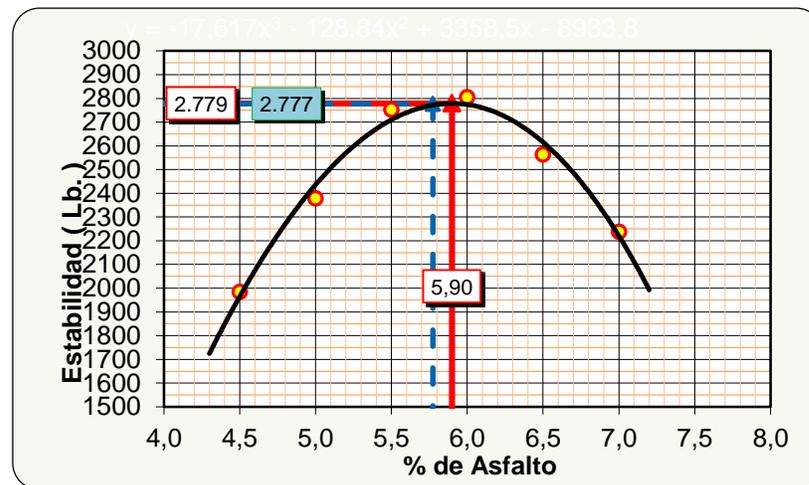
**Figura 4.25: Curva Densidad vs % de Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura la densidad es directamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será la Densidad.

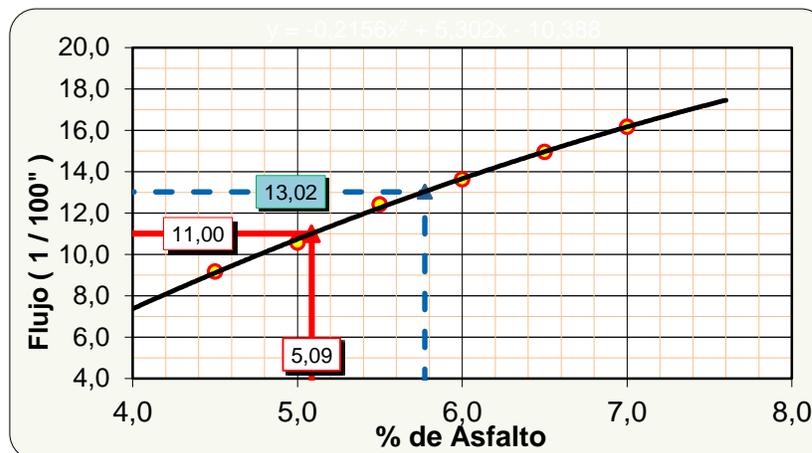
**Figura 4.26: Curva Estabilidad vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura la estabilidad crece a medida que el % de Asfalto aumenta, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será la Estabilidad hasta llegar al valor Óptimo % de Asfalto donde vuelve a decrecer la Estabilidad.

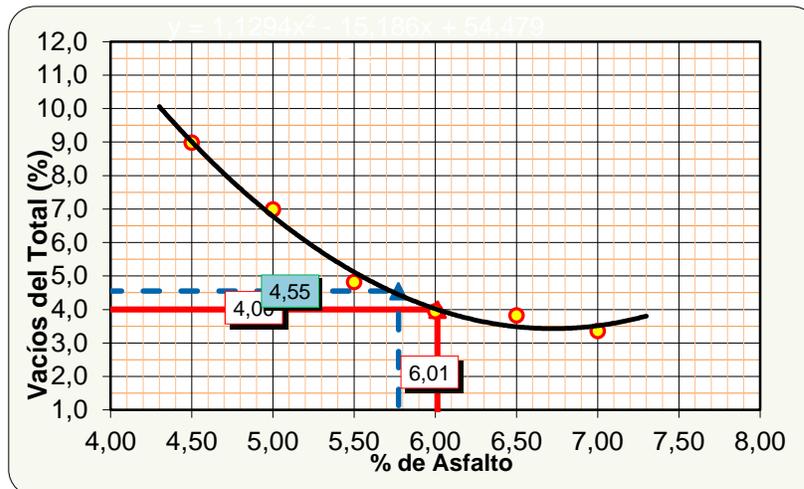
**Figura 4.27: Flujo vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura el Flujo (fluencia) es proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será el Flujo.

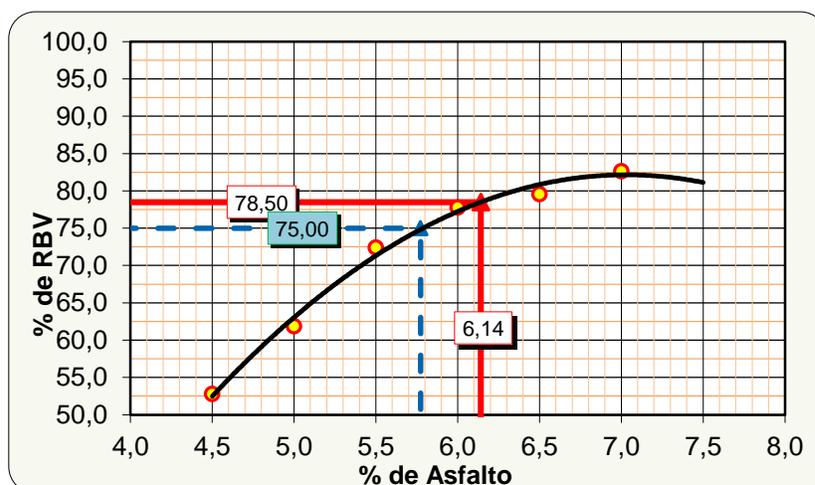
**Figura 4.28: Curva % de Vacíos vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura se observa que el % de Vacíos es inversamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, existiría menos Vacíos en la carpeta Asfáltica.

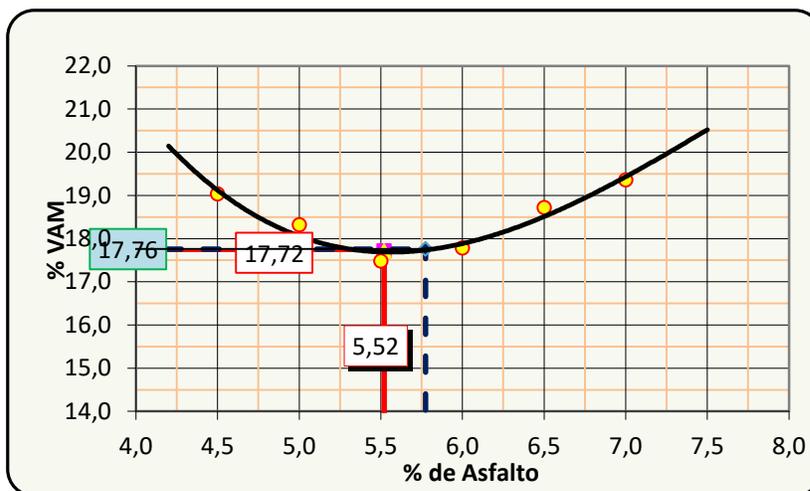
**Figura 4.29: Curva % de RBV vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura él % RBV es directamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será el % de RBV.

**Figura 4.30: Curva Vacíos Agregado Mineral vs % Asfalto**

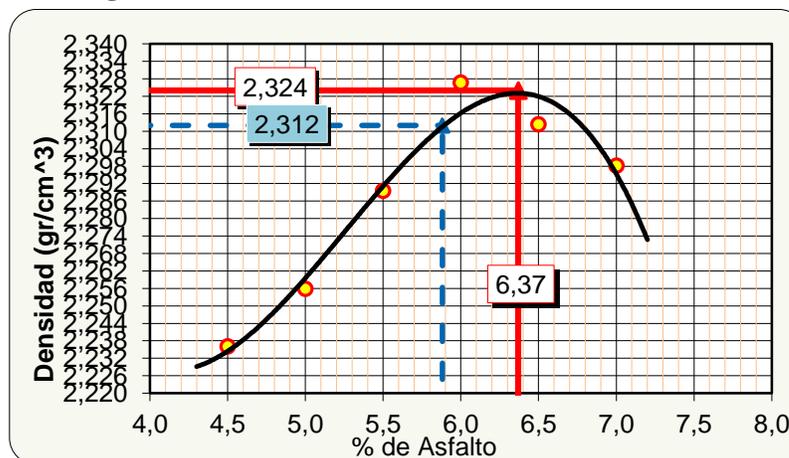


Fuente: Elaboración Propia

De la figura los Vacíos del Agregado Mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con los incrementos de % de Asfalto. En este caso el Porcentaje Optimo de Asfalto expresa un valor intermedio de Vacíos de Agregado Mineral.

## RESULTADOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON EL 1% DE RESIDUO DE CAUCHO

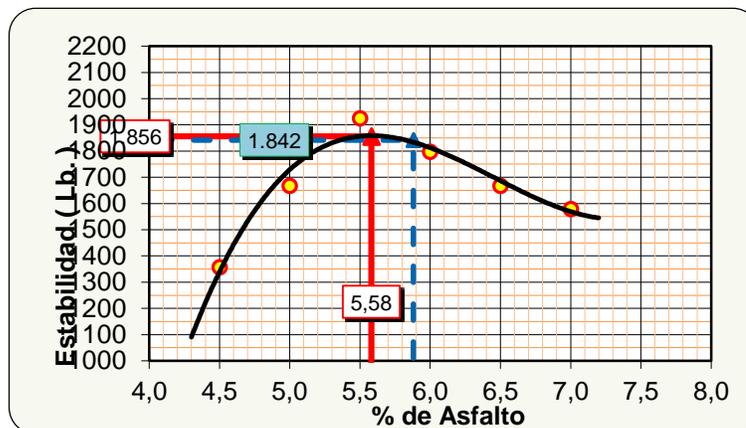
**Figura 4.31: Curva Densidad vs % de Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura la densidad es directamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será la Densidad.

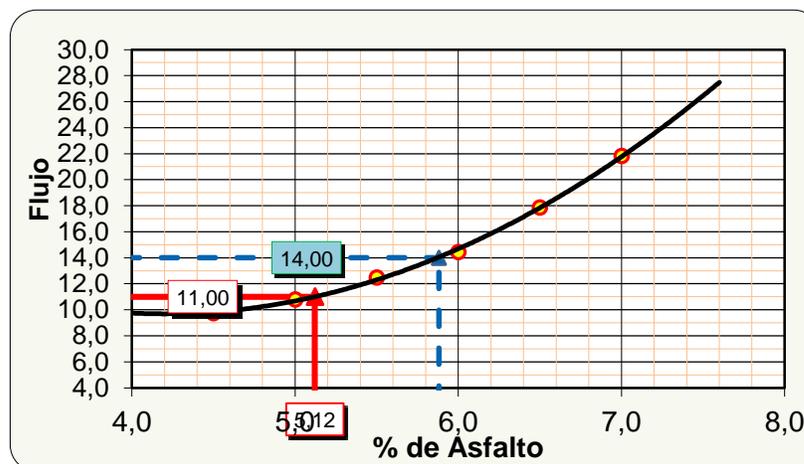
**Figura 4.32: Curva Estabilidad vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura la estabilidad crece a medida que el % de Asfalto aumenta, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será la Estabilidad hasta llegar al valor Óptimo % de Asfalto donde vuelve a decrecer la Estabilidad.

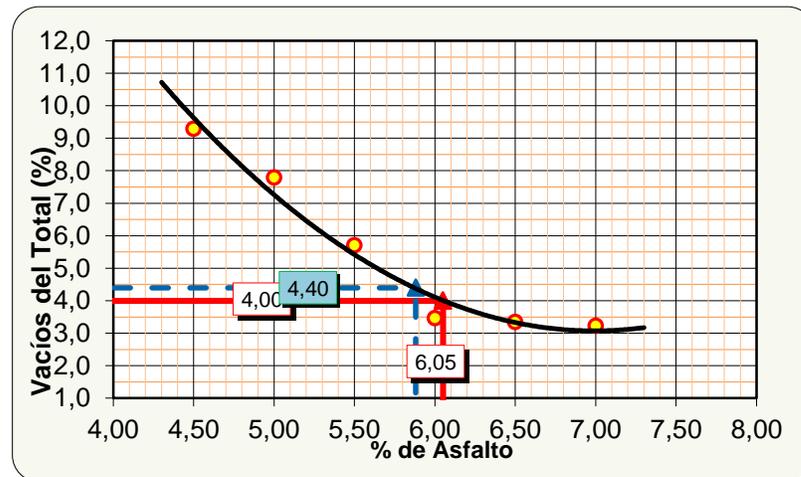
**Figura 4.33: Flujo vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura el Flujo (fluencia) es proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será el Flujo.

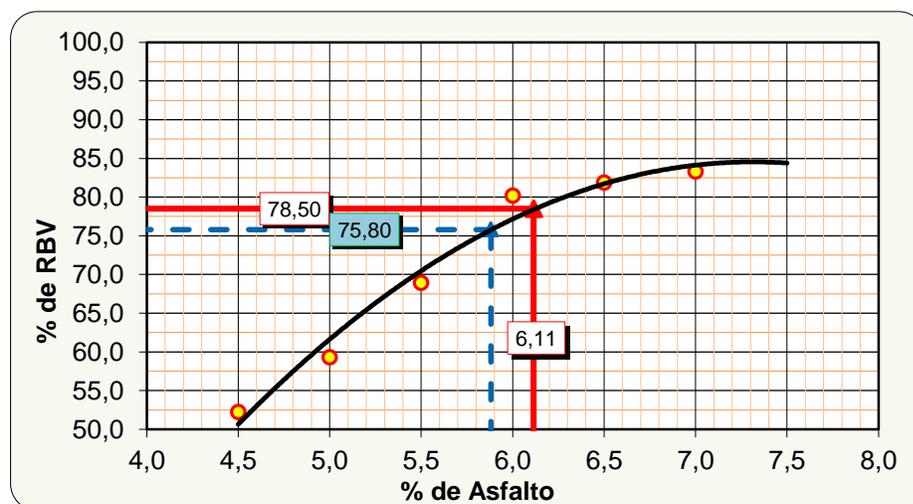
**Figura 4.34: Curva % de Vacíos vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura se observa que el % de Vacíos es inversamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, existiría menos Vacíos en la carpeta Asfáltica.

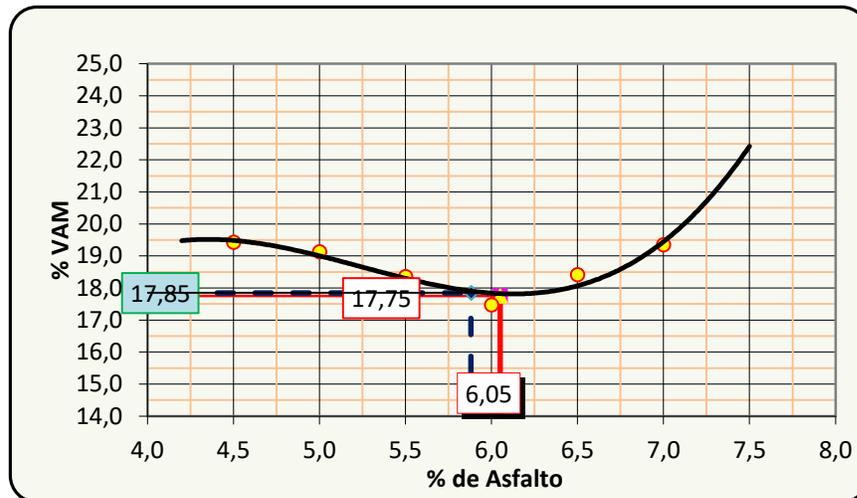
**Figura 4.35: Curva % de RBV vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura él % RBV es directamente proporcional al % de Asfalto, es decir que a mayor % de Asfalto, mayor será el % de RBV.

**Figura 4.36: Curva Vacíos Agregado Mineral vs % Asfalto**



Fuente: Elaboración Propia

De la figura los Vacíos del Agregado Mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con los incrementos de % de Asfalto. En este caso el Porcentaje Optimo de Asfalto expresa un valor intermedio de Vacíos de Agregado Mineral.

La valoración técnica que se lo realiza a esta metodología de aplicación del residuo de caucho es que cumple con las especificaciones técnicas mínimas requeridas por la ABC.

- **Validar o demostrar la factibilidad del uso del caucho**

Para la validación del residuo de caucho se puede recurrir a los resultados de los ensayos que se realizó.

Llegando a resultados óptimos con el 1% de residuo de caucho y cumpliendo con las especificaciones técnicas de la ABC.

**Tabla 4.7: VALORES DE MARSHALL**

VALORES OBTENIDOS DISEÑO MARSHALL				
CARACTERISTICAS	% DE ASFALTO	VALORES CON EL % OPTIMO	ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DENSIDAD	5,88	2,312	-----	-----
% VACIOS	5,88	4,40	<b>3</b>	<b>5</b>
R.B.V.	5,88	75,80	<b>75</b>	<b>82</b>
V.A.M	5,88	17,85		
ESTABILIDAD (Lb)	5,88	1842	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	5,88	14,00	<b>8</b>	<b>14</b>
<b>% OPTIMO DE ASFALTO PROPUESTO</b>			<b>5,9</b>	

Fuente: Elaboración Propia

Además, otra validación de que se podría dar es en el costo ya este disminuye en un 3,48 bs/m<sup>3</sup> respecto al convencional.

### METODO DE AJUSTE POR EL CHI<sup>2</sup>

DATOS					
1521,174	1554,243	1598,335	1635,8132	1657,8592	1686,519
1774,703	1818,795	1843,0456	1851,864	1906,979	1957,6848
1984,14	2039,255	2063,5056	2138,462	2164,9172	2215,623

CALCULO DEL NUMERO DE INTERVALOS

NC= 4

CALCULO DE LA AMPLITUD DE CADA INTERVALO

$\Delta x =$  347,2245 348

$\Delta x/2 =$  173,61225 174

INTERVALOS DE CLASE	MARCAS DE CLASE	FRECUENCIA ABS	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA ACUMULADA
1347,174   1695,17	1521,174	6	0,333333333	0,333333333



DE TABLA DISTRUBUCION  
NORMAL 0.1

F1= 0,95

PARA LA RESISTENCIA BAJA

Z= -1,54

DE TABLA DISTRUBUCION  
NORMAL 0.1

F2= 0,061

F1-F2= 0,88 88,872 %

El resultado de la estadística nos muestras que los datos tienen una confiabilidad de casi el 89 %.

#### **4.5. PRESUPUESTO**

Un presupuesto es considerado una suposición de valor de un producto para condiciones definidas y en un tiempo determinado.

Además, un presupuesto nos permite llevar un control de gastos, el seguimiento de gastos reales en los materiales, mano de obra y equipo.

#### 4.5.1. PRECIOS UNITARIOS MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

<b>ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO</b>							
Actividad: SUMINISTRO DE CEMENTO ASFALTICO							
Unitario: TON							
Cantidad:							
Moneda: Bolivianos							
	Descripción	Und.	Cantidad	% Productiv.	Precio Improductivo	Precio Productiv.	Costo Total
<b>1.-</b>	<b>MATERIALES</b>						
	CEMENTO ASFALTICO	TON	1,00000			8.700,00	8.700,00
						<b>TOTAL MATERIALES</b>	<b>8.700,00</b>
<b>2.-</b>	<b>MANO DE OBRA</b>						
			0,00000			0,00	0,00
						<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>0,00</b>
	BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA					71,18%	0,00
	IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES					14,94%	0,00
						<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>0,00</b>
<b>3.-</b>	<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>						
			0,00000	0,00%	0,00	0,00	0,00
	HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA					5,00%	0,00
						<b>TOTAL EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>	<b>0,00</b>
<b>4.-</b>	<b>GASTOS GENERALES</b>						
	GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3					18,00%	1.566,00
						<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>	<b>1.566,00</b>
<b>5.-</b>	<b>UTILIDAD</b>						
	UTILIDAD - % DE 1+2+3 +4					0,00%	0,00
						<b>TOTAL UTILIDAD</b>	<b>0,00</b>
<b>6.-</b>	<b>IMPUESTOS</b>						
	IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5					3,09%	317,22
						<b>TOTAL IMPUESTOS</b>	<b>317,22</b>
						<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>	<b>10.583,22</b>

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO							
Actividad: CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO CONVENCIONAL							
Unitario: M3							
Cantidad:							
Moneda: Bolivianos							
	Descripción	Und.	Cantidad	% Productiv.	Precio Improductivo	Precio Productiv.	Costo Total
<b>1.-</b>	<b>MATERIALES</b>						
	GRAVA TRITURADA CLASIFICADA DE PLANT.SEDECA	M3	0,48000			152,00	72,96
	ARENA CLASIFICADA	M3	0,49000			145,00	71,05
	CEMENTO ASFALTICO	LT	110,00000			10,58	1.163,80
	DIESEL	LT	18,00000			3,74	67,32
						<b>TOTAL MATERIALES</b>	<b>1.375,13</b>
<b>2.-</b>	<b>MANO DE OBRA</b>						
	AYUDANTE DE OPERADOR	HR.	0,02800			16,00	0,45
	CAPATAZ A	HR.	1,80000			25,00	45,00
	OPERADOR A	HR.	0,82010			20,00	16,40
	OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	HR.	0,08200			18,00	1,48
	OPERADOR DE PLANTA	HR.	0,09000			23,19	2,09
	OBrero A	HR.	0,07200			12,07	0,87
	CHOFER A	HR.	0,00120			18,00	0,02
						<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>66,30</b>
	BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA					71,18%	47,20
	IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES					14,94%	16,96
						<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>130,46</b>
<b>3.-</b>	<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>						
	COMPAC ROD LISO Y PATA DE CABRA AUTOP.	HR.	0,03500	100,00%	90,86	303,85	10,63
	DISTRIBUIDOR DE AGREGADOS AUTOP.	HR.	0,02800	100,00%	156,15	455,03	12,74
	ESCOBA MECANICA AUTOP.	HR.	0,02800	100,00%	12,25	71,55	2,00
	PLANTA CALENTAMIENTO DE ASFALTO	HR.	0,09000	100,00%	17,00	965,23	86,87
	RODILLO NEUMATICO TSP 10000	HR.	0,08400	100,00%	85,11	332,81	27,96
	TERMINADORA DE ASFALTO	HR.	0,07500	100,00%	416,69	669,06	50,18
	CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS >=950 M3	HR.	0,00010	100,00%	168,88	421,29	0,04
	VOLQUETE >=12M3	HR.	0,00120	100,00%	8,34	227,87	0,27
	HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA					5,00%	6,52
						<b>TOTAL EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>	<b>197,22</b>
<b>4.-</b>	<b>GASTOS GENERALES</b>						
	GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3					18,00%	97,02
						<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>	<b>97,02</b>
<b>5.-</b>	<b>UTILIDAD</b>						
	UTILIDAD - % DE 1+2+3 +4					0,00%	0,00
						<b>TOTAL UTILIDAD</b>	<b>0,00</b>
<b>6.-</b>	<b>IMPUESTOS</b>						
	IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5					3,09%	19,65
						<b>TOTAL IMPUESTOS</b>	<b>19,65</b>
						<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>	<b>1.819,48</b>

#### 4.5.2. PRECIOS UNITARIOS MEZCLA ASFÁLTICA CON RESIDUO DE CAUCHO

<b>ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO</b>							
Actividad: SUMINISTRO DE RESIDUO DE CAUCHO							
Unitario: TON							
Cantidad:							
Moneda: Bolivianos							
	Descripción	Und.	Cantidad	% Productiv.	Precio Improductivo	Precio Productiv.	Costo Total
1.-	<b>MATERIALES</b>						
	RESIDUO DE CAUCHO	TON	1,00000			2.000,00	2.000,00
						<b>TOTAL MATERIALES</b>	<b>2.000,00</b>
2.-	<b>MANO DE OBRA</b>						
			0,00000			0,00	0,00
						<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>0,00</b>
	BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA					71,18%	0,00
	IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES					14,94%	0,00
						<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>0,00</b>
3.-	<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>						
			0,00000	0,00%	0,00	0,00	0,00
	HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA					5,00%	0,00
						<b>TOTAL EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>	<b>0,00</b>
4.-	<b>GASTOS GENERALES</b>						
	GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3					18,00%	360,00
						<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>	<b>360,00</b>
5.-	<b>UTILIDAD</b>						
	UTILIDAD - % DE 1+2+3 +4					0,00%	0,00
						<b>TOTAL UTILIDAD</b>	<b>0,00</b>
6.-	<b>IMPUESTOS</b>						
	IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5					3,09%	72,92
						<b>TOTAL IMPUESTOS</b>	<b>72,92</b>
						<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>	<b>2.432,92</b>

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO							
Actividad: CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO CON RESIDUO DE CAUCHO							
Unitario: M3							
Cantidad:							
Moneda: Bolivianos							
	Descripción	Und.	Cantidad	% Productiv.	Precio Improductivo	Precio Productiv.	Costo Parcial
1.-	<b>MATERIALES</b>						
	GRAVA TRITURADA CLASIFICADA DE PLANT.SEDECA	M3	0,47030			152,00	71,49
	ARENA CLASIFICADA	M3	0,48030			145,00	69,64
	CEMENTO ASFALTICO	LT	110,00000			10,58	1.163,80
	RESIDUO DE CAUCHO	M3	0,00970			2,43	0,02
	DIESEL	LT	18,00000			3,74	67,32
						<b>TOTAL MATERIALES</b>	<b>1.372,27</b>
2.-	<b>MANO DE OBRA</b>						
	AYUDANTE DE OPERADOR	HR.	0,02800			16,00	0,45
	CAPATAZ A	HR.	1,80000			25,00	45,00
	OPERADOR A	HR.	0,82010			20,00	16,40
	OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	HR.	0,08200			18,00	1,48
	OPERADOR DE PLANTA	HR.	0,09000			23,19	2,09
	OBRERO A	HR.	0,07200			12,07	0,87
	CHOFER A	HR.	0,00120			18,00	0,02
						<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>66,30</b>
	BENEFICIOS SOCIALES - % DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA					71,18%	47,20
	IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % SUBTOT M.O.+ CARGAS SOCIALES					14,94%	16,96
						<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>	<b>130,46</b>
3.-	<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>						
	COMPACTADOR LISO Y PATA DE CABRA AUTOP.	HR.	0,03500	100,00%	90,86	303,85	10,63
	DISTRIBUIDOR DE AGREGADOS AUTOP.	HR.	0,02800	100,00%	156,15	455,03	12,74
	ESCOBA MECANICA AUTOP.	HR.	0,02800	100,00%	12,25	71,55	2,00
	PLANTA CALENTAMIENTO DE ASFALTO	HR.	0,09000	100,00%	17,00	965,23	86,87
	RODILLO NEUMATICO TSP 10000	HR.	0,08400	100,00%	85,11	332,81	27,96
	TERMINADORA DE ASFALTO	HR.	0,07500	100,00%	416,69	669,06	50,18
	CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS>=950 M3	HR.	0,00010	100,00%	168,88	421,29	0,04
	VOLQUETE >=12M3	HR.	0,00120	100,00%	8,34	227,87	0,27
	HERRAMIENTAS - % DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA					5,00%	6,52
						<b>TOTAL EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>	<b>197,22</b>
4.-	<b>GASTOS GENERALES</b>						
	GASTOS GENERALES - % DE 1+2+3					18,00%	96,50
						<b>TOTAL GASTOS GENERALES</b>	<b>96,50</b>
5.-	<b>UTILIDAD</b>						
	UTILIDAD - % DE 1+2+3 +4					0,00%	0,00
						<b>TOTAL UTILIDAD</b>	<b>0,00</b>
6.-	<b>IMPUESTOS</b>						
	IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % DE 1+2+3+4+5					3,09%	19,55
						<b>TOTAL IMPUESTOS</b>	<b>19,55</b>
						<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>	<b>1.816,00</b>

#### **4.5.3. ANÁLISIS DE COMPARACIÓN COSTO MEZCLA CONVENCIONAL VS COSTO MEZCLA CON RESIDUO DE CAUCHO**

- En el estudio del costo de la mezcla asfáltica convencional se obtuvo un precio unitario de 1819.48 bolivianos.
- En el estudio de costo de la mezcla asfáltica con residuo de caucho se obtuvo un unitario por metro cubico de 1816.00 bolivianos.
- Realizando una comparación de costos hay una diferencia de 3.48 bolivianos por metro cubico entre la mezcla asfáltica con residuo de caucho al 1% con la mezcla asfáltica convencional.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- En proyecto de investigación cuando se plantea hipótesis las mismas al final podrán determinar o concluir con respuestas positivas y/o negativas lo cual también significa un aporte en el futuro análisis posterior de lo realizado para mejorar y/o descartar.
- Para la realización de los ensayos de las mezclas asfálticas con porcentajes de residuo de caucho se utilizó el tamaño de la muestra pasante el tamiz #30 en referencia a una guía práctica de laboratorio cumpliendo con los parámetros del agregado fino (en granulometría).
- Se elaboraron briquetas de mezcla asfáltica convencional, que se sometieron a ensayos Marshall para determinar sus propiedades físicas y mecánicas, con los siguientes resultados de estabilidad de 2777 lb y se realizó el mismo procedimiento con briquetas agregando porcentajes (1%, 2%, 3%, y 4%) de residuo de caucho a las mezclas asfálticas obteniendo los valores de estabilidad al 1% de 1842 lb, al 2% de 1324 lb, al 3% de 1080 lb, y al 4% de 850 lb, por lo que se determina valores muy diferentes en estabilidad, porosidad, fluencia, las que se detallaron en el análisis de resultados.
- De los resultados obtenidos en el estudio, se determinó que el valor de porcentaje de 1% de residuo de caucho cumple con las condiciones mínimas de estabilidad para tráfico liviano de 1500 lb.

- Realizado el análisis de costo se determinó una reducción de 3,48 bs / m<sup>3</sup> respecto de la mezcla convencional vs mezcla con 1% de adicción de residuo de caucho.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- Es recomendable antes de la selección del tamaño de partícula del residuo de caucho que se utilizara, realizar un cuarteo para la mejor selección de muestra y otras actividades que permitan subclasificarlos. (del estado, uso, marca, procedencia, etc.)
- Se recomienda que al trabajar con mezcla asfáltica a temperaturas altas se utilice el equipo necesario de seguridad para su manipuleo: guantes de cuero o lona, gafas de seguridad, ropa adecuada de preferencia un overol y mascarillas (tipo barbijo) para evitar la inhalación de gases u otras sustancias; es decir aplicar lo que corresponde a la Seguridad Industrial.
- Es necesario tener mucho cuidado al utilizar los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos; además de la sensibilidad de los mismos.
- También es importante considerar que al utilizar el martillo Marshall manualmente hacerlo con cuidado con los golpes ya que al no hacerse a la misma intensidad pueden variar en los resultados.
- Es importante y se recomienda dar mantenimiento al equipo Marshall para compactación y la prensa Marshall, para obtener valores correctos.

