

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

# **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

## **1.1.- INTRODUCCIÓN**

Las botellas de plástico y las bolsas de leche son residuos sólidos, los cuales una parte de estos desechos en el país son reciclados pero gran parte no presentan utilización alguna después de ser usados, siendo tratados como desechos, contaminando cada vez más nuestro ecosistema por su lenta descomposición y degradación.

La basura generada por las actividades humanas hasta mediados del siglo XX consistía principalmente en desechos biodegradables o reciclables, al incorporarse el plástico a la vida cotidiana, una parte considerable de los desechos producidos comenzó a acumularse en el ambiente, precisamente por la resistencia de los plásticos a la corrosión, la intemperie y la degradación por microorganismos (biodegradación), por lo cual viene a ser una de las principales contaminaciones en el país, como también en el mundo.

Se debe ser consciente que se vive en la cultura del usar y tirar, y en la basura de cada día están los recursos que dentro de poco tiempo harán falta. Se trata, en definitiva, de que se ponga en práctica la consigna de las tres erres, reducir, reciclar y reutilizar, en este orden de importancia, mediante esta investigación se puede llegar a una reducción en los residuos sólidos y adicionalmente mejorar el desempeño de los pavimentos en Bolivia.

Nuestro país no cuenta con planes para el tratamiento de dicho residuo, aunque si existen recicladoras independientes no llegan a reciclar la totalidad del residuo, existe poca conciencia sobre el reciclaje de dicho producto por lo que el presente proyecto intenta encontrar una solución razonable que se le puede brindar a dicho producto y así poder contribuir con el medio ambiente y con el desarrollo vial.

La adición de productos industrializados como las botellas plástico y las bolsas de leche recicladas podrían hacer parte constitutiva de la estructura de un pavimento al dar a las mezclas asfálticas un mejor comportamiento mecánico y por ende una mayor duración de vida.

## **1.2.- ANTECEDENTES**

En las décadas de los setenta las mezclas asfálticas utilizadas en la capa de rodadura eran específicamente diseño de mezclas asfálticas en caliente cuyos diseños y especificaciones aún se siguen utilizando tanto para mezclas densas como mezclas abiertas.

En años recientes las mezclas asfálticas utilizadas en la capa de rodadura eran específicamente diseños de mezclas asfálticas en caliente cuyos diseños y especificaciones aún se siguen utilizando tanto para mezclas densas como para mezclas abiertas.

Con el avance de nuevas tecnologías en el diseño de mezclas asfálticas se dio el surgimiento de las mezclas en frío, en donde se sustituyó el cemento asfáltico por emulsión asfáltica como ligante, estas mezclas como su nombre lo dice, son mezclas en frío, ya que los agregados y la emulsión asfáltica no se calientan a grandes temperaturas para su mezclado, este tipo de mezclas también ha sido utilizado tanto para mezclas densas como para mezclas abiertas.

Actualmente estos diseños de mezclas son utilizados en nuestro país, las mezclas convencionales en caliente para la conformación de carpetas asfálticas en pavimentos flexibles de calles urbanas y carreteras, y las mezclas con emulsión para mantenimiento, tratamiento o recapamiento de las mismas, pero también son utilizadas en carreteras intercomunales.

## **1.3.- JUSTIFICACIÓN**

### **1.3.1.- Justificación tecnológica**

Conocer nuevas tendencias en la construcción de pavimentos en frío mejorándolos con las propiedades que nos brindan los materiales plásticos a adicionar para así mejorar las propiedades mecánicas del pavimento en frío.

### **1.3.2.- Justificación ambiental**

Reducir la explotación masiva de los materiales utilizados en la construcción, optimizando la dosificación de los materiales utilizados en la obtención de pavimento

en frío, mejorando las propiedades de este, tal que se refleje en la calidad del pavimento. Al utilizar material reciclado se contribuye a la descontaminación ambiental.

### **1.3.3.- Justificación social**

Brindar un aporte al diseño del pavimento en frío con adiciones de fibras de botella de plástico (polietileno), más los micro-retazos de bolsas de leche líquida tricapa. Al conocer la influencia de estos materiales sobre las propiedades del pavimento. Porque se puede obtener un producto de mejor calidad, que al poseer un producto reciclado se puede contribuir a la descontaminación del ambiente, a lo largo del tiempo.

### **1.3.4.- Justificación económica**

Mantener las vías (carreteras) libres de baches grietas y fisuras con la mezcla asfáltica modificada con fibras de botella de plástico más los micro-retazos de bolsas de leche tricapa con emulsión en frío, se incrementaría el comercio entre ciudades de manera más rápida y eficiente por lo cual mejora la calidad de vida. Incremento e impacto en el comercio, y la producción al tener vías en buen estado esto hará más rápido el traslado de los mismos.

## **1.4.- DISEÑO TEÓRICO**

### **1.4.1.- Planteamiento del problema**

#### **1.4.1.1.- Situación problemática**

Las estructuras viales son prioridad fundamental de la sociedad y de la economía de un territorio, son el medio principal de comunicación y transacción de bienes y servicios, entre dos o más puntos. Un mal estado de estas recaería fuertemente como problemática para una comunidad y su desarrollo.

En Bolivia la mayor parte de la red vial que está pavimentada, está constituida por pavimentos flexibles, debido a que estos permiten mayores deformaciones sin rotura y además son más económicos que otros tipos de pavimentos. No obstante, estos pavimentos presentan otros inconvenientes principalmente generados por las fuertes variaciones de temperatura, las precipitaciones, la erosión, las corrientes de agua, la

creciente demanda del tráfico en las vías, y la capacidad portante del suelo que soporta la infraestructura vial, entre otros.

Los pavimentos flexibles están conformados por una capa asfáltica, la cual es el producto obtenido de la adición y mezclado uniforme de un cemento asfáltico en un agregado granular. Estas mezclas son conocidas como mezclas asfálticas y según el procedimiento de mezclado se pueden clasificar en mezclas densas en caliente y mezclas densas en frío.

Por lo anterior, y por muchas otras causas la cantidad de vías en excelente estado del territorio boliviano son muy pocas, debido a que los pavimentos muchas veces trabajan en condiciones extremas de diseño, y terminan por hacer fallar el pavimento antes del periodo para el cual se diseñó. Por consiguiente, para solucionar estos problemas se han realizado diversas investigaciones que buscan mejorar las capacidades mecánicas de las mezclas asfálticas, adicionado a su composición polímeros o materiales de reciclaje que aumenten sus capacidades de resistencia y durabilidad, y sean amigables con el medio ambiente.

A lo largo de dichas investigaciones se han planteado soluciones para que el comportamiento del asfalto mejore; que además de cumplir con sus funciones básicas de diseño, también aporte a mitigar los impactos y sea amigable con el medio ambiente incorporando a su composición materiales reciclados, como lo pueden ser: cauchos, cueros, plásticos, escoria, PVC, entre otros.

#### **1.4.1.2.- Problema**

La durabilidad en los pavimentos flexibles es una propiedad fundamental ya que los pavimentos flexibles son muy propensos a tener un envejecimiento prematuro, llegando así a no cumplir su vida útil de proyecto por motivo a distintos factores como ser: falta de mantenimiento, las cargas producidas por el tráfico, el frenado producido por el tráfico, las corrientes de agua, la capacidad portante del suelo, la temperatura, entre otros, provocando así distintos tipos de fallas en el pavimento flexible, como ser: fisuras, ahuellamientos, grietas, deterioro superficial, baches, entre otros.

Este análisis experimental tiene como estudio dar a conocer la aplicación de las fibras de botella de plástico más bolsas de leche tricapa recicladas y su aplicación en una mezcla asfáltica con emulsión en frío, la problemática que existe es que el pavimento no llega a cumplir su vida útil por los esfuerzos a los que está sometido por tal motivo se estudia a los pavimentos modificados.

## **1.4.2.- Objetivos**

### **1.4.2.1.- Objetivo general**

Analizar y comparar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica con emulsión en frío, aprovechando el comportamiento viscoso que experimenta la mezcla en su elaboración, mediante la utilización de fibras de botellas de plástico y micro-retazos de bolsas de leche tricapa recicladas.

### **1.4.2.2.- Objetivos específicos**

- Seleccionar y caracterizar el material granular y la emulsión para la mezcla.
- Realizar el diseño de mezcla en el cual se utilice emulsión en frío sin fibras de botella de plástico, ni bolsas de leche tricapa que será patrón de comparación con la mezcla que si lo contenga.
- Realizar el diseño de la mezcla en el cual se utilice la emulsión en frío y las fibras de botella de plástico más las bolsas de leche tricapa.
- Analizar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica con emulsión en frío sin la adición de fibras de botella de plástico, ni las bolsas de leche tricapa.
- Analizar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica con emulsión en frío con fibras de botella de plástico más las bolsas de leche tricapa.
- Comparar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica con emulsión en frío sin la adición de fibras de botella de plástico, ni las bolsas de leche tricapa con las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica con emulsión en frío con fibras de botella de plástico más las bolsas de leche tricapa.

### **1.4.3.- Hipótesis**

Mediante la adición de fibras de botellas de plástico más los micro-retazos de bolsas de leche tricapa se busca darle un mejor manejo al comportamiento viscoso que experimenta la mezcla asfáltica en su preparación y de alguna manera mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica con emulsión en frío al adicionarle polímeros en su composición, en comparación con una mezcla asfáltica convencional (solo con emulsión asfáltica).

## 1.4.4.- Definición de variables independientes y dependientes

### 1.4.4.1.- Variable independiente

Fibra de botellas de plástico y los retazos de bolsas de leche líquida.

*Tabla 1.1. Operacionalización de la Variable Independiente*

Variable nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor acción técnicas a usar
Adición de las fibras de botellas de plásticos más los micro-retazos de bolsas de leche tricapa en las mezclas asfálticas con emulsión en frío	Se realizarán ensayos Marshall en diferentes etapas de la mezcla y a diferentes porcentajes de los materiales adicionantes	Mezcla asfáltica en frío	Emulsión asfáltica	Tipo de emulsión asfáltica
				Dosificación constante
			Agregados	Tipo de agregados
				Dosificación constante
		Temperaturas	A la salida de la planta	Ensayo Marshall
			En el transporte	Ensayo Marshall
			En el colocado	Ensayo Marshall
			Máximos y mínimos	Ensayo Marshall

*Fuente: Elaboración personal*



### 1.4.4.2.- Variable dependiente

Mezclas asfálticas con emulsión en frío.

**Tabla 1.2. Operacionalización de la Variable Dependiente**

Variable nominal	Conceptualización	Operacionalización			
		Dimensión	Indicador	Valor acción técnicas a usar	
Propiedades Mecánicas de la Mezcla Asfáltica con Emulsión en Frío	Se analizará las propiedades de la Mezcla Asfáltica mediante el Método Marshall	Ensayos de Caracterización	Emulsión Asfáltica	Destilación	Método para determinar el residuo por destilación (ASTM D6997 AASHTO T59-97)
				Penetración	Método para determinar el índice de penetración (ASTM D5 AASHTO T49-97)
				Punto de Ablandamiento	Método para determinar el punto de ablandamiento mediante el aparato de anillo y bola (ASTM D36 AASHTO T53-96)
				Peso Específico	Método para determinar la Gravedad Específica ASTM D71-94 AASHTO T229-97)
				Punto de inflamación y Combustión	Método para determinar el punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASTHO T79-96)
				Ductibilidad	Método para determinar la ductibilidad (ASTM D113 AASHTO T51-00)
				Viscosidad	Método para determinar la viscosidad Saybolt (ASTM D244 AASHTO T59-97)
		Agregados	Granulometría	Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E40 AASHTO T27-99)	
			Equivalente de Arena	Método para determinar el equivalente de Arena (ASTM D2419 AASHTO T176-00)	
			Resistencia al desgaste por Abrasión	Método para determinar el Desgaste mediante la maquina de los Angeles (ASTM E131 AASHTO T96-99)	
			Peso Específico y Absorción del Agregado	Determinación del peso específico de los suelos (ASTM E127; ASTM E128)	
		Ensayo de Resistencia	Mezcla Asfáltica Convencional y con Polímeros	Resistencia a la deformación Plástica	Método para determinar la resistencia a la deformación plástica (Estabilidad y Fluencia) de mezclas asfálticas utilizando el aparato de Marshall (AASHTO T245-97)

**Fuente:** Elaboración personal

## **1.5.- DISEÑO METODOLÓGICO**

### **1.5.1.- Componentes**

#### **1.5.1.1.- Unidad de estudio**

Todo lo referido a los pavimentos flexibles.

#### **1.5.1.2.- Población**

Mezclas asfálticas con emulsión en frío.

#### **1.5.1.3.- Muestra**

Mezclas asfálticas con emulsión en frío con las fibras de botellas de plásticos más los micro-retazos de bolsas de leche tricapa.

Según la ASTM para un trabajo de investigación se debe realizar el análisis estadístico con un tamaño mínimo de 30 muestras, de tal manera que los componentes de las mezclas como los agregados serán extraídos de una chancadora, se obtendrán de la chancadora “GARZON”, la emulsión asfáltica tiene 180 días de vigencia y será provisionada de una empresa privada de la ciudad de Santa Cruz de la sierra, y los materiales adicionantes como las botellas de plástico estas serán recicladas de bebidas gaseosas, las bolsas de leche tricapa también serán recicladas de las bolsas de leche de la planta industrializadora de leche “PIL TARIJA”.

#### **1.5.1.4.- Muestreo**

Los diferentes ensayos de las mezclas asfálticas en frío, con los distintos porcentajes de fibras adicionantes, que cumpla con las propiedades de acuerdo a la norma para posteriormente realizar una comparación con la mezcla asfáltica convencional.

### **1.5.2.- Métodos y técnicas empleadas**

#### **1.5.2.1.- Métodos de investigación**

##### **Deductivo**

Se podrá deducir los beneficios en proporción a la utilización de fibras de botellas de plástico más los micro-retazos de bolsas de leche tricapa; además, conociendo las características y propiedades, se establecerá el porcentaje de fibras de botella de

plástico y micro-retazos de bolsas de leche tricapa que se van a añadir en la mezcla asfáltica en frío.

### **Inductivo**

Se obtendrá las características y propiedades de cada mezcla asfáltica con cierto porcentaje de fibras de botella de plástico y micro-retazos de bolsas de tricapa, determinando así la mejor mezcla asfáltica con porcentaje de fibras de botella de plástico y micro-retazos de bolsas de leche tricapa y se confirmará si habrán las mejoras en sus propiedades que presentará este nuevo material.

### **Análisis**

Se separará los componentes de la mezcla asfáltica en frío y posteriormente se estudiará cada uno de ellos a través de ensayos para determinar la contribución de los mismos al producto final.

### **Síntesis**

Se evaluarán las fibras de botella de plástico y los micro-retazos de bolsas de leche tricapa, las características en el comportamiento para la formación de una formación de mezclas asfálticas en frío con fibras de botella de plástico más los micro-retazos de bolsas de leche tricapa.

## **1.5.2.2.- Técnicas de recolección de información**

### **Técnica experimental**

Está centrado en la consecución de las destrezas necesarias para la utilización de la instrumentación científica, para el análisis de datos experimentales y para la presentación clara y honesta de los resultados obtenidos de nuestro presente proyecto. Se pretende que el estudiante tenga las destrezas adecuadas en contacto con las prácticas del laboratorio ya sea de asfaltos o el laboratorio de suelos, que empiece a entender la naturaleza del trabajo experimental y se familiarice con la redacción de informes científicos. Desde este punto de vista, las técnicas experimentales deben servir para desarrollar en el estudiante las cualidades del científico, como son la

curiosidad por los fenómenos naturales, el rigor en el análisis y la destreza en la experimentación. También para adquirir la convicción de que es imprescindible contrastar la teoría con el experimento para que el avance de la creación científica sea fructífero.

### **Revisión de documentos**

Se utilizará esta técnica para revisar normas, tablas, manuales, y especificaciones, para establecer los pasos a seguir y definir el intervalo de resultados aceptables para el material en estudio. Esta técnica nos permitirá recabar datos que se registraron en el laboratorio.

### **1.5.2.3.- Descripción de los instrumentos para la obtención de datos**

#### **Guía de documentos**

Para poder llevar acabo la recolección de información, se utilizará procedimientos especificados en manuales de la ABC, normas nacionales y normas internacionales (ASTM Y AASHTO), estos son:

Análisis granulométrico de agregado FINO.

Análisis granulométrico de agregado GRUESO.

Peso específico y absorción de agregados FINO.

Peso específico y absorción de agregados GRUESO.

Abrasión Los Ángeles (L.A.) de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm – 1 ½”.

Peso Unitario agregado grueso y fino.

Porcentaje de caras fracturadas en los agregados.

Porcentaje de partículas chatas y alargadas.

Cantidad de material fino que pasa por el tamiz N° 200.

Resistencia de las mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall seco al aire y en estado saturado, (estabilidad y flujo).

Peso específico y absorción de las briquetas.

#### **1.5.2.4.- Procedimientos de aplicación**

Procedimientos:

Determinar la calidad de las botellas de plástico y bolsas de leche tricapa.

Medir la calidad de los materiales (emulsión, agregado grueso y agregado fino) usados para la elaboración de la mezcla asfáltica en frío con las fibras plásticas adicionantes.

Diseñar la mezcla asfáltica en frío con diferentes porcentajes de fibras de botella de plástico y micro-retazos de bolsas de leche tricapa.

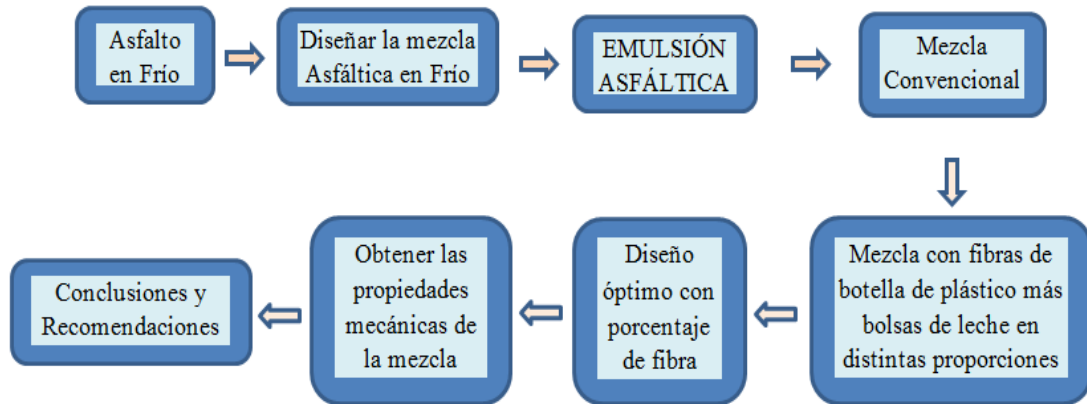
Elaborar la mezcla asfáltica con las fibras adicionantes según los diseños obtenidos

Obtener las características de las mezclas asfálticas en frío.

Comparar los datos obtenidos de las mezclas asfálticas en frío con fibras de botellas de plástico más los micro-retazos de bolsas de leche tricapa y mezclas asfálticas convencionales.

Diagrama de flujo:

**Gráfico 1.1. Procedimiento de aplicación**



*Fuente: Elaboración personal*

### 1.5.3.- Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

#### 1.5.3.1.- Tratamiento de los datos (empleo de la estadística)

##### La estadística descriptiva

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

##### La media aritmética

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

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

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

## La mediana

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

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

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

## La moda

Otra medida de posición de amplio uso es la moda, que sin imaginarlo se usa frecuentemente.

En un conjunto de datos  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  de tamaño  $n$ , de una variable o característica  $X$ , la moda se define como el valor que ocurre con mayor frecuencia, se denota por  $Mo_{(X)}$ . En algunos conjuntos de datos, la moda puede no existir, o no ser única en otros casos.

## La varianza

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

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

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

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

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

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

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

### **Desviación estándar**

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{Desviación estándar poblacional } \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N}} = \sqrt{\overline{(X - \mu)^2}} ; N \\ &= \sum_{j=1}^k f_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Desviación estándar muestral } s &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{\overline{(X - \bar{X})^2}} ; n \\ &= \sum_{j=1}^k f_j \end{aligned}$$

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

### **Coficiente de variación**

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



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

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

## **1.6.- ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

Esta investigación está orientada para poder utilizar un material de reciclaje, como botellas plásticas y bolsas de leche líquida para la fabricación de mezcla asfáltica en frío con emulsión asfáltica.

En el primer capítulo se presentará, algunos antecedentes históricos del uso de las mezclas y emulsiones asfálticas, su situación y uso actual, familiarizando y dando a conocer las emulsiones asfálticas que no son tan usadas en Bolivia. Haciendo referencia al contexto teórico se tomará en cuenta conceptos fundamentales desde los pavimentos flexibles en general su clasificación, tipologías, funcionalidades, como también de las mezclas asfálticas, indicaremos su clasificación, propiedades, tipologías, funcionalidades de las mismas. La descripción de los materiales para una mezcla asfáltica tales como; cemento asfáltico, emulsiones asfálticas, agregados pétreos, además de los precedentes químicos de los materiales importantes de este objeto de estudio “botellas de plástico y bolsas de leche tricapa recicladas”. Desde el punto de vista práctico se realizará:

Caracterización de todos los materiales componentes de la mezcla asfáltica como ser agregado pétreo y emulsión asfáltica.

Caracterización de los materiales a adicionar (botellas de plástico y bolsas de leche líquida), volviéndoles polvo a los mismos.

Realización del diseño de mezcla en el cual se utilice emulsión en frío sin fibras de botella de plástico, ni bolsas de leche tricapa que será patrón de comparación con la mezcla que si lo contenga.

Hallar el contenido óptimo de emulsión asfáltica a través de las curvas encontradas por el método Marshall (Estabilidad y Fluencia).

Elaboración de las mezclas variando el porcentaje del material reciclado en un valor extremo, medio y mínimo.

Dar un mejor manejo a la preparación de la mezcla asfáltica más los polímeros, gracias a la ayuda del comportamiento viscoso que experimenta la mezcla en el proceso de elaboración de las briquetas.

Analizar el porcentaje óptimo de material reciclado la mejor opción de diseño en pavimentos, el cual cumpla con todas las especificaciones técnicas.

Hacer un análisis comparativo del porcentaje de botellas de plástico y bolsas de leche líquida en las mezclas con emulsión asfáltica y como afecta en las propiedades del Marshall.

Finalmente, se presenta las conclusiones generales y algunas recomendaciones resultantes de la aplicación a realizar.

## **CAPÍTULO II**

# **GENERALIDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

## **CAPÍTULO II: GENERALIDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.1.- ANTECEDENTES DE ESTUDIO**

El concreto asfáltico en nuestro medio y en todo el mundo se ha convertido en uno de los principales materiales para la construcción de carreteras, principalmente elegido por su rapidez de construcción y sus buenas propiedades de funcionalidad y durabilidad. Por lo tanto por ser un material muy utilizado en la construcción de obras viales, se ha tenido la necesidad de hacer muchas investigaciones cuya finalidad es obtener un material más durable pero que mantenga sus propiedades de funcionalidad.

Por lo general el concreto asfáltico utilizado es el concreto hecho en mezcla asfáltica en caliente cuyos materiales constituyentes son agregados pétreos y cemento asfáltico, para poder realizar esta mezcla ambos materiales son calentados a una temperatura adecuada para mezclarse y posteriormente colocarse y compactarse. Con el pasar de los años aparecieron las mezclas asfálticas en frío en donde el concreto asfáltico es obtenido utilizando emulsión asfáltica como ligante y los materiales pétreos al igual que la emulsión asfáltica no se han tenido que calentar a temperaturas altas, trayendo consigo un ahorro económico significativo en comparación a las mezclas asfálticas en caliente ya que con este concreto se necesita menor consumo de combustible y ahorro de energía para su elaboración.

Las emulsiones asfálticas fueron originalmente desarrolladas para resolver dificultades constructivas asociadas a la construcción con asfalto en caliente, y también fueron ideadas como aplicaciones para eliminar la emisión de polvo. El incentivo para reducir el consumo de combustibles en la crisis energética de los años 70, hizo que se generara un explosivo aumento en el uso de las emulsiones en la estabilización de agregado mineral, incluyendo el mezclado con material húmedo a temperaturas ambientales.

La mayoría de las emulsiones utilizadas como agentes estabilizadores tienen un componente de “asfalto residual” de 60%, que significa que el 60% de volumen de la

emulsión está compuesto de asfalto disperso en un 40% del volumen que es agua. El porcentaje de asfalto puede, sin embargo, variar entre 30% y 70%, pero los porcentajes de asfalto mayores a 60% no son recomendables para el reciclado debido a que la emulsión se torna viscosa, más difícil de bombear y por lo tanto es más difícil cubrir el agregado.

## **2.2.- LOS PAVIMENTOS**

### **2.2.1.- Marco conceptual**

Un pavimento es una estructura, asentado sobre una fundación apropiada, tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas bajo cualquier condición climática. Hay una gran diversidad de tipos de pavimento, dependiendo del tipo de vehículos que transitaran y del volumen de tráfico.

### **2.2.2.- Pavimento**

Es la estructura generalmente integrada por la sub-base, base y carpeta de rodadura, construida sobre una terracería debidamente compactada, para poder soportar las cargas de tránsito de acuerdo al diseño, pero al mismo tiempo, deben resistir las abrasiones y los punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por el paso de personas o vehículos, la caída de objetos y la compresión de los elementos que se apoyan en él.

#### **2.2.2.1.- Tipos de pavimentos**

Los pavimentos pueden clasificarse en:

Pavimentos flexibles.

Pavimentos rígidos.

Pavimentos semirrígidos.

Generalmente el diseñador se decide por implementar el sistema Flexible – Pavimentos con tratamiento superficial debido a que presenta algunas ventajas sobre el sistema rígido como:

Bajo costo inicial.

No requiere de juntas por lo que es más cómodo el tránsito por la carretera.

Puede ser reciclado, etc.

#### **2.2.2.2.- Pavimentos flexibles**

Son aquellos que tienen un revestimiento asfáltico sobre una capa base granular. La distribución de tensiones y deformaciones generadas en la estructura por las cargas de rueda del tráfico, se da de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión del suelo de fundación por medio de la absorción de tensiones cizallantes. En este proceso ocurren tensiones de deformación y tracción en la fibra inferior del revestimiento asfáltico, que provocara su fisuración por fatiga por la repetición de las cargas del tráfico.

#### **2.2.2.3.- Pavimentos rígidos**

Son aquellos en los que la losa de concreto de cemento Portland (C.C.P.) es el principal componente estructural, que alivia las tensiones en las capas subyacentes por medio de su elevada resistencia a la flexión, cuando se generan tensiones y deformaciones de tracción debajo de la losa producen su fisuración por fatiga.

#### **2.2.2.4.- Pavimentos semirrígidos**

En términos amplios, un pavimento semirrígido o compuesto es aquel en el que se combinan tipos de pavimentos diferentes, es decir, pavimentos “flexibles” y “rígidos”, normalmente la capa rígida está por debajo y la capa flexible por encima.

La estabilidad de suelos por medio de ligantes hidráulicos (cemento Portland) permite que se obtengan materiales con capacidad de soporte suficiente para construir capas para base en pavimentos sujetos a cargas pesadas como ser camiones o aeronaves.

#### **2.2.2.5.-Tipos de pavimentos flexibles**

Se menciona los diferentes tipos de pavimentos flexibles:

Convencionales de base granular.

Deep-Strength de base asfáltica.

Pavimentos full-depth.

Pavimentos con tratamiento superficial (pueden ser semirrígidos también).

#### **2.2.2.6.- Pavimentos con tratamiento superficial**

Los tratamientos superficiales dobles o triples pueden ser utilizados como capas de revestimiento en carreteras de tráfico leve a medio. Se construyen mediante la aplicación de capas de ligante bituminoso sobre las cuales se conforman capas de materiales pétreos compactados, cuya granulometría debe ser rigurosamente controlada para satisfacer las exigencias de las especificaciones técnicas adoptadas en el proyecto. El deterioro del revestimiento se produce principalmente por la fisuración debida a la fatiga y/o al desgaste.

### **2.3.- MARCO REFERENCIAL**

#### **2.3.1.- El cemento asfáltico**

##### **2.3.1.1.- Definición**

La American Society for Testing and Materials (**ASTM**) define al asfalto o cemento asfáltico como “un cementante de color marrón oscuro a negro en el que sus componentes predominantes son los asfaltenos (hidrocarburos de alto peso molecular, como los asfaltos, alquitranes, breas, etc.) que pueden ser naturales u obtenidos como residuo en la refinación del petróleo crudo”.

El asfalto posee características tanto químicas como físicas, que son los elementos que le proveen todas sus particularidades y hacen de este el producto esencial que es hoy en la industria de la construcción. Este cementante contiene tres importantes propiedades químicas: consistencia pureza y seguridad, donde la primera se debe a su habilidad para fluir a diferentes temperaturas, esto en razón a que el asfalto es un material termoplástico, es decir, se fluidifica a altas temperaturas. La segunda define la composición química del asfalto, donde las impurezas de este, son prácticamente inertes. La tercera precisa el comportamiento de afinidad química con las diferentes cargas eléctricas. De la misma manera, dentro de su composición química contiene características de aglutinación, esto debido a su constitución principalmente de asfaltenos y maltenos, que son los elementos que le proporcionan dichas

particularidades; este último define la capacidad del asfalto para ser manejado a altas temperaturas con seguridad.

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 contienen 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.

**Tabla 2.1. Historia del asfalto**

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

**Fuente: Pfeiffer (1950)**



### 2.3.1.2.- Origen y naturaleza del asfalto

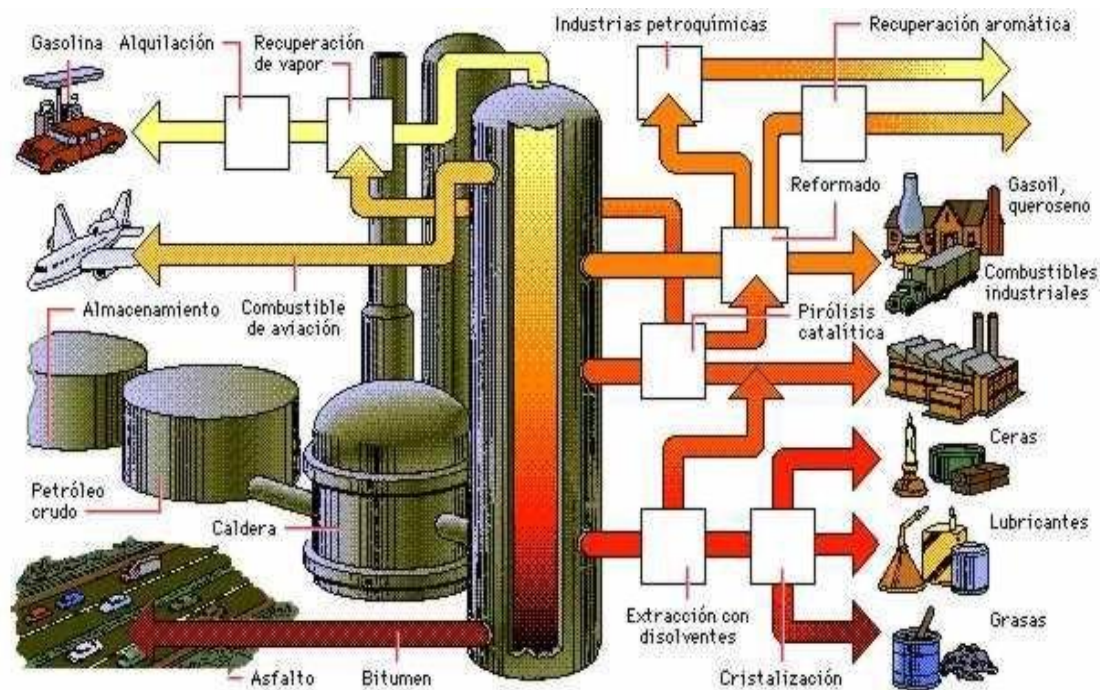
#### a) Refinación de petróleo

El crudo de petróleo es refinado por destilación. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento, en etapas, de la temperatura.

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. El asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480°C. Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo de petróleo que se esté refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo.

En la figura 2.1, se muestra una ilustración esquemática de una refinería típica. La figura muestra el flujo de petróleo durante el proceso de refinación. (Franco, 2002)

*Gráfico 2.1. Refinación del petróleo*



*Fuente: Petróleo, proceso y refinado, Profesor en línea.*

## **b) Refinación de asfalto**

Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfalto. Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen para que estos cumplan ciertos requisitos. Esto se logra, usualmente, mezclando varios tipos de crudos de petróleo antes de procesarlos. El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

Existen dos procesos por los cuales puede ser producido un asfalto, después que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción con solventes.

Como se discutió anteriormente, la destilación por vacío consiste en separar el asfalto del crudo mediante la aplicación de calor y vacío. En el proceso de extracción con solvente, se remueven más gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual.

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto. Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia.

En resumen, para producir asfaltos con características específicas, se usa el crudo de petróleo o mezclas de crudos de petróleo. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de destilación por vacío o extracción con

### **2.3.1.3.- Clasificación y grados del asfalto**

Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales:

Cemento asfáltico.

Asfalto diluido (o cortado).

Asfalto emulsionado.

Los asfaltos diluidos y los emulsificadores son usados, casi por completo, en mezclas en frío y en riegos. Los cementos asfálticos, por el contrario, en mezclas en caliente y no se discutirán más por no ser tema de estudio para la presente tesis.

#### **2.3.1.4.- Propiedades físicas del asfalto**

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

##### **Durabilidad**

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto.

Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar el comportamiento del asfalto frente al envejecimiento en horno. Estas son la Prueba de Película delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO). [Asphalt Institute; 1992]

##### **Adhesión y cohesión**

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunos, como relacionada con la adhesión y la cohesión. En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica – no califica”,

y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos. [Asphalt Institute; 1992]

### **Susceptibilidad a la temperatura**

Los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura o tasa de variación de viscosidad con la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera.

Debe entenderse que es de vital importancia conocer las características de viscosidad de un asfalto en todo el rango de temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación.

Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado. [Asphalt Institute; 1992]

### **Endurecimiento y envejecimiento**

Los asfaltos tienden a endurecerse aumentando sus características de consistencia en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).

En el proceso de elaboración de la mezcla el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras se encuentra en el tambor mezclador. Esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa de mezclado. El margen de viscosidad del material original (antes de la Prueba de Película Delgada en Horno rotatorio – RTFO) es mucho menor que el margen obtenido después del calentamiento.

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder minimizar el endurecimiento.

Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado. [Asphalt Institute; 1992]

### **2.3.1.5.- Ensayos de caracterización del cemento asfáltico convencional**

#### **Ensayos de viscosidad**

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

En el ensayo Saybolt-Furol se emplea un viscosímetro Saybolt con un orificio Furol. Se coloca en tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho una cantidad especificada de betún asfáltico. Como las temperaturas a que se determina la viscosidad de los betunes asfálticos son frecuentemente superiores a los 100°C, el baño de temperatura constante del viscosímetro se llena con algún tipo de aceite.

Cuando el asfalto ha alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide el tiempo necesario en segundos para que pasen a través del orificio Furol 60 milímetros del material. Cuando más viscosos son los materiales más tiempo es necesario para que pasen a través del orificio. Los valores obtenidos se expresan como segundos Saybolt-Furol (SSF). Los aparatos y procedimiento para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el Método ASTM E102.

La viscosidad cinemática del betún asfáltico se mide normalmente con viscosímetros de tubo capilar de cristal. Como consecuencia de la comodidad del ensayo y de la mayor exactitud de los resultados, hay una reciente tendencia a medir la viscosidad cinemática de los betunes asfálticos y de los asfaltos fluidificados. Para este ensayo son necesarios, como consecuencia de la amplia gama de viscosidades de los asfaltos, varios viscosímetros calibrados que difieren entre sí en el tamaño del tubo capilar. La base de este ensayo es la medida del tiempo necesario para que fluya un volumen constante de material bajo condiciones de ensayo, como temperatura y altura de líquido, rígidamente controladas. Mediante el tiempo medido en segundos y la constante de calibración del viscosímetro es posible calcular la viscosidad cinemática del material en la unidad fundamental, centistokes.

### **Ensayos de penetración**

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100 gramos y que la carga se aplica durante 5 segundos. La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal. La unidad de penetración es la décima de milímetro. Es evidente que cuando más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración. Los betunes asfálticos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración. El instituto del asfalto ha adoptado cuatro grados de betún asfáltico para pavimentación con penetraciones comprendidas dentro de los márgenes siguientes: 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300.

Además, el instituto tiene especificaciones para un betún asfáltico de penetración comprendida en el margen 40-50, que se usa en aplicaciones especiales e industriales. Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo se describen en el Método AASHTO T49 y en el ASTM D5.

### **Ensayo de punto de inflamación y combustión**

El punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos.

El punto de inflamación de un betún asfáltico se mide por el ensayo del vaso abierto de Cleveland según condiciones normalizadas prescritas en los métodos AASHTO T48 y ASTM D92. Un vaso abierto de latón se llena parcialmente con betún asfáltico y se calienta a una viscosidad establecida. Se hace pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define como punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina.

### **Ensayo de ductilidad**

La ductilidad es una característica de los betunes asfálticos importante en muchas aplicaciones. La presencia o ausencia de ductilidad, sin embargo, tiene usualmente mayor importancia que el grado de ductilidad existente. Los betunes asfálticos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos a los que les falta esta característica. Por otra parte, los betunes asfálticos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura. En algunas aplicaciones, como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder aglomerante, mientras en otras, como la inyección bajo losas de hormigón y en el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.

## **Peso específico**

Aunque normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del betún asfáltico que se emplea. Este conocimiento es útil para hacer las correcciones de volumen cuando este se mide a temperaturas elevadas. Se emplea como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactadas. El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada. El peso específico del betún asfáltico se determina normalmente por el método del picnómetro.

### **2.3.1.6.-Temperaturas de aplicación del asfalto**

Normalmente se especifican las temperaturas de aplicación para diversos empleos de los materiales asfálticos, pero como consecuencia de las variaciones de viscosidad, el especificar solamente la temperatura no es suficiente para hacer uso adecuado de los materiales. Por ello el instituto del asfalto recomienda que se tenga en cuenta la relación viscosidad-temperatura de cada material asfáltico antes de fijar la temperatura adecuada para el tipo de procedimiento constructivo empleado.

Las temperaturas más elevadas de este campo de variación son normalmente más adecuadas para mezclas con áridos finos. No hay que olvidar que la temperatura de los áridos regula en medida importante la temperatura de la mezcla.



**Tabla 2.2.** *Temperaturas de aplicación del asfalto*

Tipo y grado de asfalto	Temperatura de empleo recomendada en °C		
	Para mezcla	Para riego	
Betunes asfálticos	40-50	150-180	-
	60-70	135-165	140-175
	85-100	135-165	140-175
	120-150	135-165	140-175
	200-300	95-135	125-160

*Fuente: Manual del Asfalto*

## **2.4.- AGREGADOS PARA EL USO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.4.1.- Generalidades**

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.

## **2.5.- TIPOS DE AGREGADOS UTILIZADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.5.1.- Agregado grueso**

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

### **2.5.2.- 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.

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

### **2.5.3.- 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 tamaños 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”.

### **2.5.4.- Agregado fino**

Los agregados finos, presentan tamaños menores de aproximadamente 2,5 mm (0,1 plg). Son obtenidos de arena natural proveniente de las fracciones finas, obtenidas por zarandeo en las operaciones de trituración de rocas o de gravas trituradas. Los áridos finos son aquellos que pasan el tamiz N°4.

### **2.5.5.- Arenas**

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.

### 2.5.6.- Filler

Relleno mineral es un producto mineral finamente dividido del que al menos el 65% pasa por el tamiz N°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 densas, en estos casos es frecuente el empleo principalmente polvo mineral (Porción de los áridos finos que pasa el tamiz N°200), y otros fillers.

*Tabla 3.3. Grados estándar del filler mineral*

Filler mineral			
Tamiz	N°100		N°200
% que pasa	100	90-100	65-100

*Fuente: Elaboración personal*

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°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.

### 2.5.7.- 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 asfálticas 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 del 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 control de las propiedades del asfalto.

## **2.6.- MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.6.1.- Tipos de mezclas asfálticas**

#### **2.6.1.1.- Mezclas asfálticas en caliente**

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado.

Se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo 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% de asfalto en volumen de agregados pétreos.

Existen dos métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla, entre estos el más utilizado es el método Marshall.

#### **2.6.1.2.- Mezclas asfálticas en frío**

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.

#### **2.6.1.3.- 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.

#### **2.6.1.4.- Microaglomerados**

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 a los micro aglomerados en Caliente son por su pequeño espesor (que es inferior a 3 cm.) tratamientos superficiales con una gran variedad de aplicaciones.

#### **2.6.1.5.- 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.

#### **2.6.1.6.- Mezcla 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 13.000 Mpa. A 20°C y una resistencia a la fatiga relativamente elevada. Se utilizan en capas de espesores de entre 8 y 15cm., 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 gravamento 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 ahorrar espesor.

#### **2.6.2.- Características de agregados pétreos**

El termino agregado se refiere a partículas minerales granulares que se usan ampliamente para bases, sub-bases y relleno de carreteras. Los agregados también se usan en combinación con un material semejante para utilizar en el diseño de mezclas asfálticas.

##### **2.6.2.1.- Propiedades de los agregados**

Las propiedades más importantes de los agregados que se usan para la construcción de carreteras son:

- Tamaño y graduación de las partículas.
- Dureza o resistencia al desgaste.
- Durabilidad.
- Densidad relativa.
- Estabilidad química.
- Forma de la partícula y textura de la superficie.

##### **2.6.2.2.- Tamaño de partículas y graduación de los agregados**

Una propiedad clave de los agregados que se usan en las bases y superficies de las carreteras es la distribución de los tamaños de partículas al mezclarlos. La graduación

de los agregados, esto es, la combinación de los tamaños de partículas en la mezcla, afecta la densidad, la resistencia, y la economía de la estructura del pavimento.

En el método **T27 de la AASHTO** se dan los procedimientos detallados para ejecutar un análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

#### **2.6.2.3.- Resistencia al desgaste**

Los materiales que se usan en los pavimentos de carreteras deberán ser duros y resistir el desgaste debido al efecto de pulido del tránsito y a los efectos abrasivos internos de las cargas repetidas. La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados es la prueba de abrasión de los Ángeles.

El método **T96 de la AASHTO** da un procedimiento detallado para esta prueba.

#### **2.6.2.4.- Durabilidad o resistencia al intemperismo**

Comúnmente, la durabilidad de los agregados se mide con una prueba de integridad. Esta prueba mide la resistencia de los agregados a la desintegración en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio. Simula el intemperismo de los agregados que existen en la naturaleza.

#### **2.6.2.5.- Densidad relativa y absorción**

La densidad relativa y la absorción de los agregados son propiedades importantes que se requieren para el diseño de concreto y de mezclas bituminosas. La densidad relativa de un sólido es la razón de su masa a la de un volumen igual de agua destilada a una temperatura específica. Debido a que los agregados pueden contener huecos permeables al agua, se usan dos medidas de la densidad relativa de los agregados: densidad relativa aparente y densidad relativa de la masa.

#### **2.6.2.6.- Forma, textura y limpieza del agregado**

Por lo general, las especificaciones para agregados que se usan en la construcción de carreteras tienen requerimientos relacionados con la forma de la partícula, la textura de la superficie y la limpieza del agregado. Normalmente, las especificaciones para agregados que se usan en las mezclas bituminosas requieren que los agregados sean

resistentes, limpios, durables y libres de cantidades en exceso de piezas planas o alargadas, polvo, bolas de arcilla y otro material indeseable.

### **2.6.3.- Características y propiedades de las mezclas asfálticas**

#### **2.6.3.1.- 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 formula (que se detalla a continuación) el peso específico del agregado grueso y el agregado fino se utiliza el peso 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:

$$G_{\text{agregado}} = \frac{P_A}{V_A} = \frac{100}{\frac{\%AG(a)}{G_{\text{agreg}}(a)} + \frac{\%AF(b)}{G_{\text{agreg}}(b)} + \frac{\%F(c)}{GF(c)} + \dots + \frac{\%A(n)}{G(n)}}$$

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

Dónde:

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

$P_A$  = Peso total expresado en porcentaje.

$\%AG(a)$ ,  $\%AF(b)$ ,  $\%F(c)$ , ...,  $\%A(n)$  = Porcentaje de los agregados a, b, c, n.

$G_{\text{agreg}}$  = Pesos específicos brutos de los agregados a, b, c, n.

#### **2.6.3.2.- Densidad máxima real de la mezcla ( $gr/cm^3$ )**

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:

$$Dr \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{PB(\text{gr})}{VP(\text{cm}^3)}$$

*(Ec. 2.2. Densidad máxima real de la mezcla)*

Dónde:

Dr= Densidad real de la mezcla (briqueta)

PB= Peso de la biqueta sin parafina

VP= Volumen de la biqueta sin parafina

### **2.6.3.3.- Densidad máxima teórica ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )**

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 para su cálculo es la siguiente:

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

(Ec. 2.3. Densidad máxima teórica)

Dónde:

$D_{mt}$  = Densidad máxima teórica.

%C.A. = Porcentaje de cemento asfáltico.

$G_{CA}$  = Peso específico de cemento asfáltico.

$G_{agreg}$  = Peso específico del agregado.

En las pruebas y análisis de diseño de las mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa generalmente, en kilogramos por metro cubico ( $kg/m^3$ ), gramos por centímetro cubico ( $gr/cm^3$ ), o libras por pie cubico ( $lb/ft^3$ ). La densidad es calculada de multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ( $1000 kg/m^3$ ) o ( $62.416 lb/ft^3$ ). 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.

#### 2.6.3.4.- 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 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:

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

*(Ec. 2.4. Vacíos de la mezcla)*

Dónde:

$V_m$  = Vacíos de la mezcla compactada.

$D_{mt}$  = Densidad máxima teórica

$D_{rm}$  = Densidad real promedio

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.

#### **2.6.3.5.- 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 dosificación alcanzado. Parte del volumen de vacíos está ocupado por el cemento asfáltico.

El espacio intergranular está ocupado por el asfalto y aire en una mezcla compactada 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 nos ocupado por el agregado. El espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla compacta se denomina vacío del agregado mineral, V.A.M. En el diagrama de componentes, la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo, es el V.A.M. El volumen de asfalto absorbido por el agregado no es usualmente considerado como parte del V.A.M. 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 V.A.M. 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	N°16	1.18	0.046	23.50
2.36	N°8	2.36	0.093	21.00
4.75	N°4	4.75	0.187	18.00
9.50	3/8"	9.50	0.374	16.00
12.50	0.50"	12.50	0.492	15.00
19.00	0.75"	19.00	0.748	14.00
25.00	1"	25.00	0.984	13.00
37.50	1.5"	37.50	1.476	12.00
51.00	2"	51.00	2.008	11.50
63.00	2.5"	63.00	2.480	11.00

**Fuente:** Capítulo diseño de mezclas asfálticas J. PADILLA

Cuanto mayor sea el V.A.M., más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para el V.A.M. 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.

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$V.A.M. (\%) = Vm(\%) + \frac{CA(\%) * D_{rm}}{G_{ca}}$$

*(Ec. 2.5. Vacíos del agregado mineral)*

Dónde:

V. A. M. (%)= 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.

#### **2.6.3.6.- Relación bitumen 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 (V.A.M.) que contiene asfalto. La fórmula de cálculo es la siguiente:

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

*(Ec. 2.6. Relación bitumen-vacíos)*

Dónde:

$RBV(\%) =$  Relación bitumen-vacíos.

$VAM(\%) =$  Vacíos del agregado mineral.

$Vm(\%) =$  Vacíos de la mezcla compactada.

### **2.6.3.7.- Estabilidad de la mezcla (lb)**

Se entiende por 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 partículas del agregado.

Para cualquier agregado dado, la estabilidad aumenta con la densificación (hacer que el agregado sea compactado, apretado) de las partículas confinadas, la cual se logra mediante granulometrías cerradas y adecuada compactación. El exceso de asfalto en la mezcla tiende 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 carga, el área cargada y la viscosidad de 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.

#### **2.6.3.8.- 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.

#### **2.6.3.9.- 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 algunos 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 el método Marshall, las especificaciones establecen un valor mínimo de estabilidad, más 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.

#### **2.6.4.- Objetivo de la mezcla asfáltica**

Las buenas mezclas asfálticas en frío y en caliente, trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que se contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas asfálticas.

Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclas asfálticas es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas propiedades.

##### **2.6.4.1.- Durabilidad**

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene por más tiempo, sus características originales. Además el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua.

La resistencia de la mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada.

La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con poca durabilidad del pavimento.

**Tabla 2.5.** Causas y efectos de una poca durabilidad

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido de asfalto y desintegración por pérdida del agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregados susceptibles al agua (Hidrofilitos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

*Fuente: Capítulo diseño de mezclas asfálticas J. PADILLA*

#### **2.6.4.2.- Estabilidad**

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas del tránsito. Un pavimento establecido es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado. La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna.

La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto de otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

La fuerza ligante de la cohesión aumenta con incrementar en la frecuencia de carga (Tráfico). La cohesión también incrementa a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con incrementos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas.

Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en los Pavimentos.

**Tabla 2.6.** Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramientos o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo dificultad para la compactación
Agregado redondeado sin, o con pocas superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización

**Fuente:** Capítulo diseño de mezclas asfálticas J. PADILLA

#### **2.6.4.3.- 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 desplazamiento es una cualidad que debe presentar un pavimento especialmente mojado para ofrecer resistencia al patinaje.

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito.

Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga.

A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye.

Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

**Tabla 2.7. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga**

Causas	Efectos
Bajo contenido de Asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga

*Fuente: Capítulo diseño de mezclas asfálticas J. PADILLA*

#### **2.6.4.4.- Impermeabilidad**

La impermeabilidad es la resistencia del pavimento asfáltico a ser penetrado por el agua y el aire en su interior.

Por otro lado la permeabilidad del concreto asfáltico es una propiedad importante en el diseño de pavimentos y barreras impermeables ya que la presencia de agua por periodos largos en su interior, puede afectar de manera significativa su desempeño al presentarse el fenómeno de stripping (separación del cemento asfáltico y el agregado pétreo).

La conductividad hidráulica o permeabilidad del concreto asfáltico depende generalmente de los siguientes aspectos:

Volumen de vacíos de aire interconectados.

Tamaño, orientación y distribución de los agregados.

Contenido de cemento asfáltico.

La viscosidad del agua que varía con la temperatura.

#### **2.6.4.5.- 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.

#### **2.6.5.- Materiales granulares para mezclas asfálticas**

##### **2.6.5.1.- Agregados naturales**

Los agregados naturales son utilizados en la fabricación de mezclas asfálticas, se encuentran en canteras como así también en depósitos de origen fluvial, y también proceden de la disgregación de rocas, el método de obtención de estos agregados son de vital importancia puesto que de este trabajo dependerá básicamente los resultados que se quieren obtener.

##### **2.6.5.2.- Agregados artificiales**

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

## **CAPÍTULO III**

# **LA EMULSIÓN ASFÁLTICA Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA**

# **CAPÍTULO III: LA EMULSIÓN ASFÁLTICA Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA**

## **3.1.- LA EMULSIÓN ASFÁLTICA**

### **3.1.1.- Antecedentes**

Existen diversos tipos de productos emulsificados que usamos en nuestra vida diaria. Entre los más comunes está la mayonesa, las pinturas, los tintes para el cabello, los helados, etc. En cada caso, están involucrados ciertos procesos mecánicos y químicos que permiten la combinación de dos o más materiales, que no se mezclarían bajo condiciones normales. Se ha dedicado un campo científico completo al estudio de la emulsificación. No es necesario entender el funcionamiento interno de un motor a combustión para manejar un automóvil.

Tampoco es necesario entender la compleja química de las emulsiones para obtener resultados altamente técnicos con las emulsiones asfálticas. La clave está en seleccionar la emulsión correcta para el agregado y sistema constructivo adecuado. En toda la presente investigación al decir “emulsión”, nos estaremos refiriendo a la “emulsión asfáltica”.

Las mezclas asfálticas densas elaboradas en frío utilizando emulsión como ligante, denotan, según la bibliografía existente, un progresivo e importante avance en cuanto a su utilización en construcciones viales.

La inclusión entre los nuevos materiales a estudiar, de los concretos asfálticos en frío con emulsión, surge en principio como necesidad de satisfacer ciertas demandas formuladas por la producción de emulsiones en el país, el cual sugiere una demanda de estos tipos de estudio sobre las emulsiones y sus aplicaciones, tomando luego como objetivo básico el contribuir a un mejor conocimiento de este tipo de mezclas que denotan ahora una gran importancia y un progresivo avance en cuanto a su aplicación en construcciones viales, con algunas significativas ventajas respecto a



técnicas convencionales, entre las que merecen destacarse: el ahorro energético, la utilización de menos equipos y otros.

### 3.1.2.- Teoría sobre las emulsiones asfálticas

Podemos definir a las emulsiones desde el punto de vista físico-químico, como una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, no miscible entre sí.

Otra definición, una emulsión es un compuesto de dos líquidos inmiscibles, en el que uno se dispersa en el otro en forma de gotas diminutas, denominándose:

Fase dispersa o discontinua

Fase dispersante o continua

Existen dos tipos de emulsiones según la concentración de cada una de estas fases, una emulsión directa es aquella en que la fase hidrocarbonada está dispersa en la fase acuosa, en la inversa, la fase acuosa está dispersa en la parte hidrocarbonada. Las del primer tipo son las que más se emplean en la industria caminera. Las inversas han recibido el nombre de emulsiones de alta flotación (high float).

Es preferible el empleo de las emulsiones directas por su baja viscosidad a temperatura ambiente. El tamaño promedio del glóbulo de asfalto es de 2 a 6 micras, tan pequeño que hace aumentar la superficie de contacto del asfalto. Esto favorece el mojado, repartición y cohesión con el material pétreo. Para percatarse de la facilidad que representa una emulsión en el cubrimiento de los agregados se puede analizar su dispersión.

Por razones de simetría en la acción capilar, los glóbulos de asfalto de la emulsión son de forma esférica, con un diámetro de 5 micras, su volumen será:

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4 * \pi * \left(\frac{0,000005}{2}\right)^3}{3} = 65,45 * 10^{-18} m^3 = 65,45 * 10^{-12} cm^3$$

De aquí que el número de glóbulos existente en un centímetro de cemento asfáltico sea de:

$$N = \frac{1}{V} = \frac{1}{65,45 * 10^{-12}} = 1,52788 * 10^{10}$$

$$N = 15278800000 \text{ glóbulos}$$

La superficie de un glóbulo (S) es:

$$S = d^2 * \pi = (0,00005)^2 * \pi = 78,54 * 10^{-8} \text{ cm}^2$$

$$A = N * S = 152788 * 10^{10} * 78,54 * 10^{-8}$$

$$A = 12000 \text{ cm}^2 \text{ aproximadamente}$$

Por ello se afirma que una emulsión tiene más facilidad para cubrir los materiales pétreos que los rebajados o cementos asfálticos.

El emulsificante define el tipo de emulsión: las aniónicas con cargas del glóbulo negativo (-) y las catiónicas, positivo (+).

### **3.1.2.1.- Propiedades de las emulsiones**

Sus propiedades más importantes son su utilidad y el aspecto que ofrecen al consumidor, ya sea este el industrial o el consumidor final. Las propiedades que son más evidentes y por lo general más importante son: facilidad de dilución (de ordinario con agua, aunque acaso sea con algún disolvente selectivo), viscosidad, color, estabilidad y, si se forma la emulsión en el lugar donde se usa finalmente, su facilidad de formación. Para un tipo dado de emulsión, estas propiedades dependen de lo siguiente:

Las propiedades de la fase continua.

La relación entre la fase interna y la externa.

El tamaño de partícula de la emulsión.

La relación entre la fase continua y las partículas (incluso las cargas iónicas).

Las propiedades de la fase discontinua.

En una emulsión determinada, las propiedades dependen del líquido que forme la fase externa, o de si la emulsión es hidroacuosa o hidrooleosa. El tipo de emulsión que resulte depende:

Del tipo y de la calidad del emulsivo.

De la razón entre ingredientes.

Del orden en que se añaden los ingredientes al mezclarlo.

La dispersabilidad (solubilidad) de una emulsión es determinada por la fase continua; si la fase continua es hidrosoluble, la emulsión puede ser diluida con agua, si la fase continua es oleosoluble, la emulsión se puede disolver en aceite. La facilidad con que se puede disolver una emulsión se puede aumentar si se reduce la viscosidad de la emulsión.

La viscosidad de una emulsión cuando hay exceso de fase continua es virtualmente la viscosidad de dicha fase. Al aumentar la proporción de la fase interna aumenta la viscosidad de la emulsión hasta un punto en que la emulsión deja de ser líquida. Cuando el volumen de la fase interna sobrepasa el de la externa, se aglomeran las partículas de la emulsión y la viscosidad aparente es parcialmente la viscosidad estructural.

Teóricamente, el volumen máximo, puede ser ocupado por partículas esféricas uniformes en la fase dispersa de una emulsión es 74% del volumen total. Se pueden preparar emulsiones que tengan hasta 99% de la fase interna.

En estos casos hay considerable deformación en comparación con la forma ordinaria de partículas de la fase dispersa.

Se puede regular la viscosidad de una emulsión de la siguiente manera:

Para reducir la viscosidad

Primero se aumenta la proporción de la fase continua.

Segundo se reduce la viscosidad de la fase continua.

Tercero en las suspensiones, se agregan agentes de actividad superficial para aumentar la lubricación.

Para aumentar la viscosidad

Primero se agregan espesadores, como gel de jabón, gel de alumina y goma a la fase continua.

Segundo se aumenta la proporción de la fase interna.

Tercero se reduce el tamaño de partícula de la emulsión o se reduce la aglomeración de las partículas existentes.

Cuarto se incorpora aire en estado de división fina como tercera fase.

La regulación de la viscosidad de las emulsiones tiene aplicación a la preparación de lociones cosméticas. El objeto es preparar una loción que parezca ser espesa, esto es: que tenga alta viscosidad aparente, pero que se conserve líquida al permanecer en reposo durante un largo tiempo.

Una dificultad más importante con que se tropieza en estas formulaciones es que en las variables condiciones de almacenamiento varia la estructura del gel y con frecuencia fragua el producto y se vuelve semisólido de manera que no puede fluir.

La estabilidad de una emulsión depende de los siguientes factores: el tamaño de partícula, la diferencia de densidad de ambas fases, la viscosidad de la fase continua y de la emulsión acabada, las cargas de las partículas, la naturaleza, la eficacia y la cantidad del emulsivo, y las circunstancias de almacenamiento, o sea las temperaturas altas y bajas, la agitación y vibración, la dilución o evaporación durante el almacenamiento o el uso.

Puesto que las partículas de una emulsión están suspendidas libremente en un líquido, obedecen a la ley de Stokes si no están cargadas. Para muchos fines industriales la definición de estabilidad incluye forzosamente a la falta de coalescencia de las partículas de emulsión y la falta de sedimentación. La incorporación de aire en una emulsión puede tener como consecuencia la reducción notable de la estabilidad.

El tamaño y la distribución de tamaños de las partículas de una emulsión son gobernados por la cantidad y la eficacia del emulsivo, el orden de la mezcladura y la clase de agitación que se haga. Si se reduce poco a poco el tamaño de las partículas de la emulsión, varían el color y el aspecto de esta.

Se presenta excepciones en lo tocante al aspecto y el color de las emulsiones cuando se agregan colorantes y pigmentos y cuando ambas fases tienen índice de refracciones

similares, en este último caso se forma una emulsión transparente sea cual fuere el tamaño de la partícula.

Se puede disminuir el tamaño de partícula por los siguientes medios:

Primero aumentando la cantidad de emulsivos.

Segundo mejorando el equilibrio hidrófilo-lipófilo del emulsivo.

Tercero preparando la emulsión mediante la inversión de fases para obtener una “fase interna extendida”.

Cuarto mediante mejor agitación.

La conductividad eléctrica de una emulsión depende de la conductividad de la fase continua. La facilidad de formación es modificada en mayor grado por la eficiencia y la cantidad del emulsivo y por las propiedades inherentes de ambas fases.

### **3.1.2.2.- Análisis de las emulsiones**

El análisis de las emulsiones tiene mucha relación con sus propiedades, por regla general se emplean métodos analíticos, físicos y químicos. Aunque es variable el orden de importancia, según sea la emulsión que se esté analizando, por lo común es aplicable al siguiente orden:

Tipo de emulsión, es de mucha importancia averiguar en primer término si la emulsión es oleoacuosa o hidrooleosa, lo cual se logra de diversas maneras.

El método más sencillo es averiguar la conductividad eléctrica. El equipo para ello se puede hacer fácilmente conectando en serie un resistor de 10.000 ohmios y 0,5 vatios, contactos eléctricos para la muestra que se va a ensayar, una lámpara de neón sin resistor (0,25 vatios, 105 a 120 voltios, tipo general eléctrico NE-57) y un conmutador de pulsador. Se coloca la muestra entre los contactos de prueba y se cierra el circuito, si da luz la lámpara de neón, la emulsión es oleoacuosa, en caso contrario es hidrooleosa.

Otro método para determinar el tipo de la emulsión es averiguar su dispersabilidad en agua o en aceite. Las emulsiones oleoacuosas se dispersan en agua y las hidrooleosas se dispersan en aceite.

Un colorante hidrosoluble se dispersa en una emulsión oleoacuosa y un colorante oleosoluble se dispersa en una emulsión hidrooleosa. El colorante puede usarse en forma líquida o sólida.

El pH de una emulsión es de importancia considerable. Las emulsiones con base de jabones por lo general tienen pH de 8 o más. Es fácil determinar el pH con un equipo ordinario de electrodo de vidrio con papel pH. Estos pueden dar un resultado erróneo si la emulsión contiene algún producto con tendencia a blanquear.

El contenido de agua de una emulsión sigue al pH en importancia para el problema de reproducción. Uno de los mejores métodos para determinar dicho contenido es la valoración de Karl Fischer. Si la emulsión es alcalina, por lo común se puede hacer alguna corrección.

El uso al que se destina la emulsión por regla general de una indicación de los componentes de la fase oleosa, en algunos casos se requiere análisis de identificación, destilación con disolventes y ensayos similares.

En realidad, el resultado de los intentos por deshacer la emulsión suelen indicar el tipo de emulsivo. Se puede considerar que los emulsivos catiónicos son de dos tipos los que son inestables en álcalis y los que son estables. El segundo grupo no es comparable con el tipo aniónico-ácido estable. Sin embargo, aunque la adición de álcali destruye un emulsivo catiónico, con frecuencia se forma in situ suficiente jabón para que se conserve la emulsión. Se puede comprobar la presencia de agentes catiónicos mediante la adición de agentes aniónicos. Los agentes no iónicos se dividen en dos clases: los que son saponificados por álcalis calientes y los que son estables con este tratamiento. Por regla general, el calor facilita la separación de las fases, y es necesario cuando la emulsión contiene ceras.

También se puede efectuar la separación mediante la centrifugación, el calentamiento, la congelación, la dilución, la adición de sales o disolventes, y con respecto a una fase de aceite no volátil, por medio de la incorporación de la fase acuosa.

Estos análisis indican el tipo de emulsión, la clase del emulsivo, la naturaleza y cantidad aproximada de la fase oleosa, por lo general suministran informes bastantes para intentar la duplicación con emulsivos elegidos.

### **3.1.3.- Clasificación de las emulsiones asfálticas**

Las emulsiones se dividen en tres categorías: “aniónicas, catiónicas, y no iónicas”. En la práctica, los dos primeros tipos son usados ordinariamente en la construcción y mantenimiento vial. Las no iónicas, sin embargo, pueden llegar a ser más ampliamente usadas con el avance de la tecnología de las emulsiones. Las clases aniónicas y catiónicas se refieren a las cargas eléctricas que rodean las partículas de asfalto. Este sistema identificado se deriva de una de las leyes básicas de la electricidad, carga del mismo signo se repelen y cargas contrarias se atraen. Cuando dos polos (un ánodo y un cátodo) se sumergen en un líquido a través del cual fluye una corriente eléctrica, el ánodo se carga positivamente y el cátodo negativamente. Si se pasa una corriente a través de una emulsión que contiene partículas de asfalto negativamente cargadas estas migraran hacia el ánodo. La emulsión, entonces, se denomina aniónica. Inversamente, partículas de asfalto positivamente cargadas se moverán hacia el cátodo y la emulsión se conoce como catiónica. Las emulsiones no iónicas, las partículas de asfaltos son neutras, y por consiguiente no migraran hacia los polos.

Las emulsiones se clasifican también basándose en que tan rápidamente el asfalto puede volver a cemento asfáltico. Los términos RS, MS y SS han sido adoptados para simplificar y normalizar esta clasificación. Son solo términos relativos significan: rotura rápida (Rapid Setting), rotura media (Medium Setting) y rotura lenta (Stow Setting). La tendencia a coalescer está estrechamente relacionada con la capacidad de mezcla de una emulsión. Una emulsión RS tiene escasa o ninguna habilidad para mezclar con un agregado, de una emulsión MS se espera que se mezcle con agregados gruesos pero no con finos y una emulsión SS está diseñada para mezclar con agregados finos.

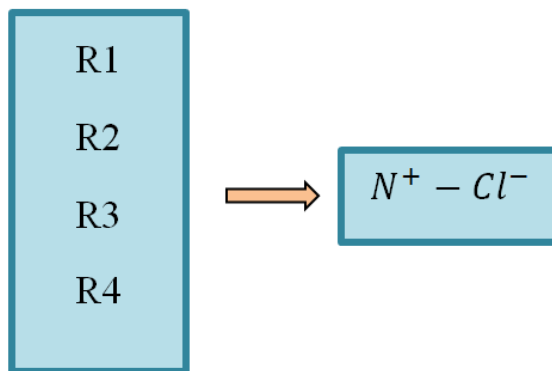
Las emulsiones se subdividen adicionalmente según secuencias de números relacionados con la viscosidad de las emulsiones y dureza de los cementos asfálticos

de base. La letra “C” al frente del tipo emulsión significa catiónicas. La ausencia de la “C” significa aniónica o no iónica.

Se han adicionado a las normas ASTM, tres grados de emulsión aniónicas de alta flotación y rotura media, que se denomina HFMS. Se ha desarrollado un tipo de emulsión de rotura más veloz (QS) para las lechadas asfálticas.

### 3.1.3.1.- Emulsiones asfálticas catiónicas o básicas

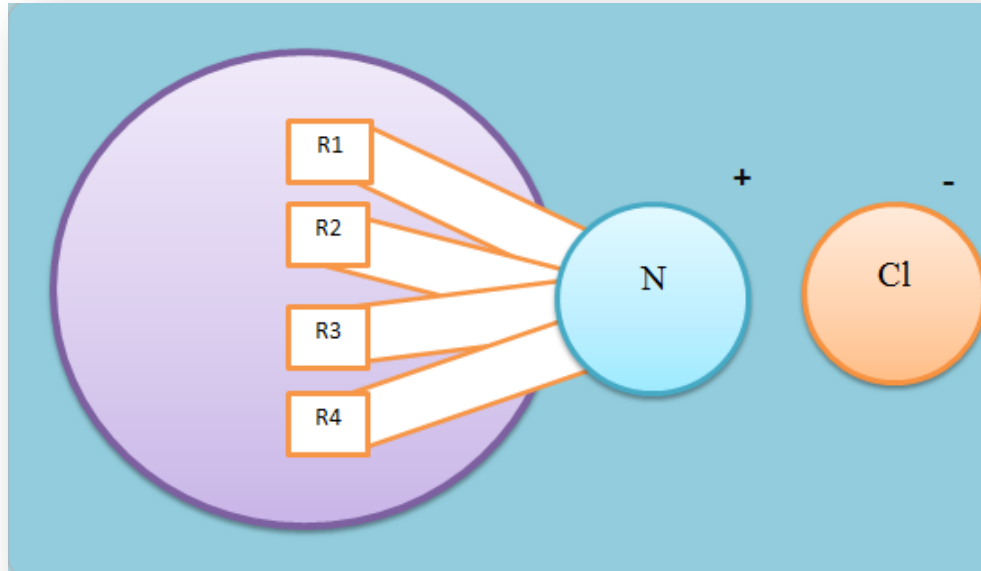
Los agentes emulsificantes empleados de emulsiones catiónicas son normalmente sales de amonio cuaternario del tipo.



Los radicales R1, R2, R3, R4, se sumergen en los glóbulos de asfalto, y el nitrógeno N queda en la fase acuosa donde se disocian los aniones Cl, que es uno de los muchos que se pueden emplear en la práctica. La posición de la molécula de emulsionante disociada, con respecto al glóbulo de asfalto se indica en el gráfico 3.1.



**Gráfico 3.1.** Posición de la molécula de emulsionante disociada con respecto al glóbulo de asfalto



*Fuente: Elaboración personal*

Las moléculas del agente emulsificante cubren completamente el glóbulo de asfalto, quedando así cubierto de radicales positivos y actuando con esa polaridad. Por este motivo tienen especial afinidad por las superficies de áridos iónicamente negativos, como son los áridos silíceos.

#### **A. Tipos de emulsiones asfálticas catiónicas**

Dependiendo de su velocidad de quiebre, se clasifican en:

CRS-1, CRS-2 Catiónica de quiebre rápido

CMS-2, CMS-2h Catiónica de quiebre medio

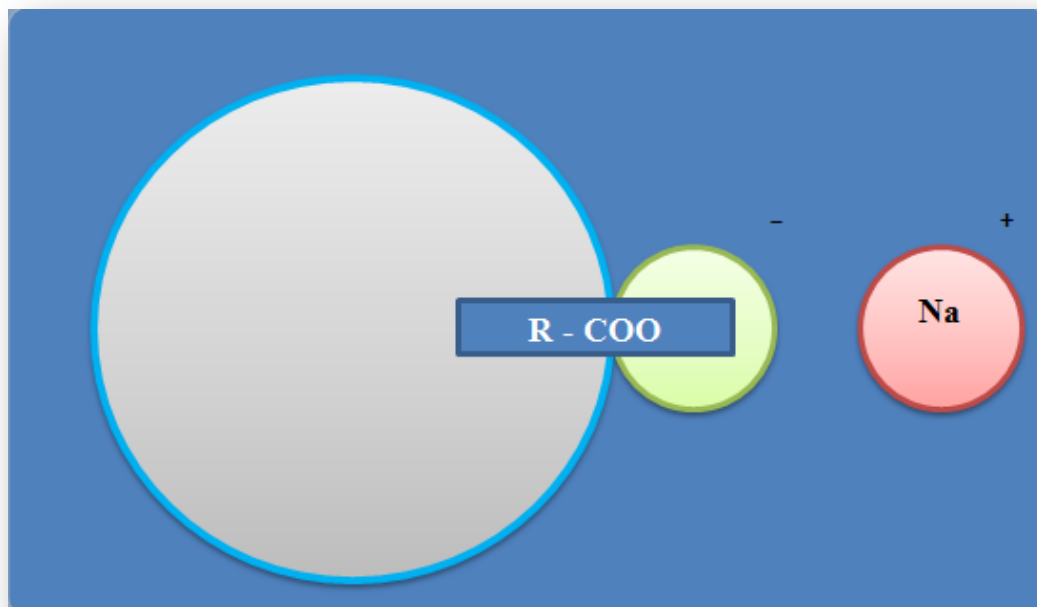
CSS-1, CSS-1h Catiónica de quiebre lento

Las emulsiones asfálticas catiónicas suelen contener una cierta proporción de solvente que permite asegurar la buena compactación de los tratamientos superficiales y el manejo de mezclas y aglomerados después del quiebre de la emulsión en contacto con la piedra.

### 3.1.3.2.- Emulsiones asfálticas aniónicas

Los agentes emulsificantes empleados en la fabricación de emulsiones aniónicas son normalmente olcatos de sodio o potasio del tipo  $R - COO - Na^+$ .

**Grafico 3.2.** Posición de la molécula de emulsionante disociada respecto al glóbulo de betún asfáltico



**Fuente:** Elaboración personal

El radical R queda sumergido en glóbulos de betún asfáltico y el grupo COO unido a él queda en la fase acuosa donde se disocian los cationes  $Na^+$ .

La posición de la molécula del agente emulsificante disociada respecto al glóbulo de betún asfáltico es la indicada en la figura 3.2.

Las moléculas del agente emulsificante cubren completamente al glóbulo de asfalto, quedando así tapizado de radicales negativos y actúan como si estuvieran cargado negativamente. Esta carga negativa impide el contacto directo del asfalto de los distintos glóbulos, por lo que estos tienden a mantenerse separados y por lo tanto, estable la emulsión. A causa de su carga negativa, los glóbulos de betún asfáltico, una emulsión aniónica tiene especial afinidad por las superficies iónicamente positivas, como son las de los áridos tipos calizos.

#### **a) Tipos emulsiones asfálticas aniónicas**

Según la proporción y tipo de agentes emulsificantes empleados, se obtienen emulsiones de mayor o menor rapidez de rotura o quiebre.

Las emulsiones generalmente se dividen en tres tipos según su velocidad de quiebre: emulsiones de quiebre rápido, medio y lento, la nomenclatura empleada es:

RS-1, RS-2	Aniónica de quiebre rápido
MS-2, MS-2h	Aniónica de quiebre medio
SS-1, SS-1h	Aniónica de quiebre lento

Los números **1,2** indican grados de viscosidad, la letra **h** indica residuo asfáltico duro.

#### **3.1.4.- Especificaciones de la emulsión asfáltica**

En esta sección debido a la variedad de uso de las emulsiones asfálticas, se las fabrica con distinta viscosidad de cemento asfáltico base y diferentes roturas, por lo que cada País tiene una norma establecida, las que se desarrollan a continuación.

##### **3.1.4.1.- Especificaciones, según AASHTO y norma Chilena**

La norma AASHTO y la LNV (Norma chilena) han desarrollado normas para los siguientes grados de emulsiones (ver Tabla 3.1.):

*Tabla 3.1. Tabla de emulsiones catiónicas*

Emulsiones asfálticas catiónicas AASHTO M 208, LNV 31-84												
Tipo	Quiebre rápido				Quiebre medio				Quiebre lento			
Nomenclatura	CRS-1		CRS-2		CMS-1		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
Grado	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mín .	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C (seg.)	***	***	***	***	***	***	***	***	20	100	20	100
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C (seg.)	20	100	100	400	50	450	50	450	***	***	***	***
Estabilidad en almacenamiento 1 día (%)	***	1	***	1	***	1	***	1	***	1	***	1
Demulsibilidad, 35 ml, 0.8 dioctyl sulfosuccinato de sodio (%) (a)	40	***	40	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Ensayo carga de partícula (b)	Positivo		Positivo		Positivo		Positivo		Positivo		Positivo	
Ensayo de mezcla con cemento (%)	***	***	***	***	***	***	***	***	***	2.0	***	2.0
Ensayo de tamizado (%)	***	0.1	***	0.1	***	0.1	***	0.1	***	0.1	***	0.1
<b>Destilación:</b>												
Aceite destilado por vol. de emulsión (%)	***	3	***	3	***	12	***	12	***	***	***	***
Residuo (%)	60	***	65	***	65	***	65	***	57	***	57	***
<b>Ensayos en el residuo de destilación:</b>												
Penetración, 25°C, 100 g, 5 seg. (0.1mm)	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, (cm)	40	***	40	***	40	***	40	***	40	***	40	***
Solubilidad en tricloroetileno (%)	97.5	***	97.5	***	97.5	***	97.5	***	97.5	***	97.5	***
Ensayo de la mancha con solvente Heptano-Xilol, 25% Xilol	Negativo para todos los grados											

*Fuente: Manual de emulsiones asfálticas*

- a) El ensayo de demulsibilidad se basa dentro de los 30 días de la fecha de embarque.
- b) Si el ensayo de carga de partícula resulta inconcluyente, el material que tiene un valor de pH máximo de 6.5 será aceptable.

Nota: El uso de ensayo de la mancha es adicional, cuando se especifica, el ingeniero indicara que solvente se usara. Puede ser nafta standard, nafta, xilol o heptano-xilol, que se usaran conforme a los requisitos y también en el caso de solventes xiloles, debe especificarse el porcentaje de xilol a usar.

- a) Los requisitos del ensayo de sedimentación pueden pasarse por alto cuando la emulsión asfáltica se usa antes de los 5 días de fabricado, o el comprador puede pedir que el ensayo de sedimentación corra desde que la muestra es recibida hasta que es usada, si el lapso es menor que 5 días.
- b) La prueba de estabilidad al almacenamiento puede reemplazar al de sedimentación en 5 días.
- c) El ensayo de demulsibilidad se hará dentro de los 30 días de la fecha de embarque.

### **Usos sugeridos**

RS-1, Tratamientos superficiales riego de liga.

RS2, Tratamientos superficiales.

MS-1, Mezcla en planta o en sitio con agregado grueso, el cual es retenido sustancialmente en la malla de 2.5 mm y de la no pasa prácticamente nada por la malla 0.08 mm, y riego de liga.

MS-2 y MS-h, Mezcla en planta o en sitio con agregado grueso, el cual es retenido sustancialmente en la malla de 2.5 mm y de la no pasa prácticamente nada por la malla 0.08 mm, y riego de liga.

*Tabla. 3.2. Tabla de emulsiones aniónicas*

Emulsiones asfálticas aniónicas AASHTO M 140, LNV 30-84														
Tipo	Quiebre rápido				Quiebre medio						Quiebre lento			
Nomenclatura	RS-1		RS-2		MS-1		MS-2		MS-2h		SS-1		SS-1h	
Grado	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C (seg.)	20	100	***	***	20	100	100	***	100	***	20	100	20	100
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C (seg.)	***	***	75	400	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Estabilidad en almacenamiento 1 día (%)	***	1	***	1	***	1	***	1	***	1	***	1	***	1
Demulsibilidad, 35 ml, 0.02 N Ca C12, (%),(a)	60	***	60	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Ensayo carga de partícula (b)	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Ensayo de mezcla con cemento (%)	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	2.0	***	2.0
Ensayo de tamizado (%)	***	0.1	***	0.1	***	0.1	***	0.1	***	0.1	***	0.1	***	0.1
Residuo por Destilación (%)	55	***	63	***	55	***	65	***	65	***	57	***	57	***
Ensayos en el residuo de destilación:														
Penetración, 25°C, 100 g, 5 seg. (0.1mm)	100	200	100	200	100	200	100	200	40	90	100	200	40	90
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, (cm)	40	***	40	***	40	***	40	***	40	***	40	***	40	***
Solubilidad en tricloroetileno (%)	97.5	***	97.5	***	97.5	***	97.5	***	97.5	***	97.5	***	97.5	***
Ensayo de la mancha con solvente Heptano-Xilol, 25% Xilol	Negativo para todos los grados													

*Fuente: Manual de emulsiones asfálticas*

- a) El ensayo de demulsibilidad se hará dentro de los 30 días de la fecha de embarque.

Nota: Las emulsiones de quiebre medio no son productos de línea y se fabrican solo a pedidos.

El uso del ensayo de la mancha es adicional, cuando se especifica, el ingeniero indicara que solvente se usara.

Puede nafta standard, nafta xilol, o heptano-xilol, que se usara conforme a los requisitos y también en los casos solventes xiloles, debe especificarse el porcentaje de xilol a utilizar.

- a) Los requisitos del ensayo de sedimentación pueden pasarse por alto cuando la emulsión asfáltica se usa antes de los 5 días de fabricado, o el comprador puede pedir que el ensayo de sedimentación corra desde que la muestra es recibida hasta que es usada, si el lapso es menor que 5 días.
- b) El ensayo de estabilidad al almacenamiento puede usarse en vez del ensayo de sedimentación en 5 días.
- c) El ensayo de demulsibilidad se hará dentro de los 30 días de la fecha de embarque.
- d) Si el ensayo de carga de partícula resulta inconcluyente, el material que tiene un valor Ph máximo de 6.7 será aceptable.

### **Usos sugeridos**

CRS-1, Tratamientos superficiales riego de liga.

CRS-2, Tratamientos superficiales.

CMS-2 y CMS-2h, Mezcla en planta o en sitio con agregado grueso, el cual es retenido sustancialmente en la malla de 2.5 mm (N°8) y del cual no pasa prácticamente nada por la malla 0.08 mm (N° 200).

CSS-1 y CSS-1h, Mezcla en planta o en sitio con graduación y agregado fino, el cual pasa una cantidad sustancial por la malla de 2.5 mm y del cual pasa una porción por la malla de 0.08 mm, lechada asfáltica.

#### **3.1.4.2.- Especificaciones brasileras**

El cuadro de especificaciones para emulsiones catiónicas (EAC) por ser la más utilizada se muestra en la tabla 3.3.

Donde se dan las siguientes nomenclaturas:

Emulsiones catiónica de rotura rápida: RR-1c y RR-2c.

Emulsiones catiónica de rotura media: RM-1c y RM-2c

Emulsiones catiónica de rotura lenta: RL-1c

Las especificaciones permiten el uso de CAP básico (Residuo) con penetración de 50 (más duro) a 250 (muy malo). Actualmente solo se utiliza el CAP-50/60 (PENmin=50) o el CAP-20 (PEN min=50). Es más difícil emulsificarse un CAP más consistente, por ejemplo el CAP-30/45 o el CAP-55 (PENmin=20), ver Tabla 3.3.



**Tabla 3.3. Tablas de emulsiones catiónicas brasileras**

<b>Emulsiones asfálticas catiónicas</b>						
<b>Características</b>	<b>Métodos de ensayo (IBP/ABN T)</b>	<b>Tipos</b>				
		<b>Ruptura rápida</b>		<b>Ruptura media</b>		<b>Ruptura lenta</b>
		<b>RR-1c</b>	<b>RR-2c</b>	<b>RM-1c</b>	<b>RM-2c</b>	<b>RL-1c</b>
<b>Ensayo sobre la emulsión</b>						
a) Viscosidad Saybolt Furol a 50°C	MB-581	20-90	100-400	20-200	100-400	Máx. 70
b) Sedimentación (%), en peso máx.	NBR-6570	5	5	5	5	5
c) Penetración, 0.84mm, (%) en peso máx.	MB-605	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
d) Resistencia al agua (%), min. De cobertura						
Agregado Seco		80	80	80	80	80
Agregado Húmedo		80	80	60	60	60
e) Mezcla con cemento (%), máx.	NBR-6297	***	***	***	***	2
Con Filler silícico	NBR-6302	***	***	***	***	1.2-2
f) Carga de Partícula	NBR-6567	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva
g) PH, máx.	NBR-6299	***	***	***	***	6.5
h) Destilación						
Solvente destilado (%), en vol.	NBR-6568	0-3	0-3	0-12	0-12	Nula
Residuo min. (%), en peso min.		62	67	62	65	60
i) Demulsibilidad (%), en peso min.	NBR-6569	50	50	***	***	***
(%) en peso máx.		***	***	50	50	***
<b>Ensayo sobre el solvente destilado</b>						
a) Destilación 95% evaporación, °C, Max.	NBR-9619	***	***	360	360	***
<b>Ensayo sobre el Residuo</b>						
a) Penetración a 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR-6576	50-250	50-250	50-250	50-250	50-250
b) Teor de Betún (%), en peso Max.	MB-166	97	97	97	97	97
c) Ductilidad a 25°C, cm, min.	NBR-6293	40	40	40	40	40

**Fuente:** Manual de emulsiones asfálticas

### **3.1.4.3.- Especificaciones, según AASHTO y ASTM**

La norma de AASHTO y la ASTM desarrollaron normas para los siguientes grados de emulsiones y nomenclaturas:

Emulsiones asfálticas aniónicas

Aniónicas de quiebre rápido: RS-1 y RS-2.

Aniónicas de quiebre medio: MS-1, MS-2, MS-2h, HFMS-1, HFMS-2 y HFMS-2h.

Aniónicas de quiebre lento: SS-1 y SS-1h.

Emulsiones asfálticas catiónicas

Catiónicas de quiebre rápido: CRS-1 y CRS-2.

Catiónicas de quiebre medio: CMS-2 y CMS-2h.

Catiónicas de quiebre lento: CSS-1 y CSS-1h

La “h” al final de ciertos grados simplemente significa que se utiliza un asfalto básico más duro. Las “HF” que preceden algunos de los grados MS indican alta flotación, en la forma media por la prueba de flotación (AASHTO T 50 o ASTM D 139).

Las emulsiones de alta flotación tienen una cualidad impartida por la adición de ciertos productos químicos que permiten una película más espesa de asfalto sobre los agregados con mínima probabilidad de drenar. Algunas agencias de usuarios especifican un producto catiónico adicional para mezcla con arena designado como CMS-2s, que contiene más solventes que los grados catiónicos.

La mayoría de los productores no pueden mantener existencias de todos los productos de la larga lista de emulsiones. Las especificaciones de emulsiones (AASHTO M 140 y ASTM D 977) no mencionan solventes en la emulsión. Las especificaciones de las emulsiones catiónicas CRS- y CMS- (AASHTO M 208, ASTM D2397), por otro lado, permiten solventes pero restringen la cantidad. Las normas para los asfaltos emulsificados llevan las designaciones AASHTO M 140 y M 208 y las designaciones

ASTM D 977 y D 2397. Los requisitos que cumplen se muestran en las tablas 3.4. y 3.5.

**Tabla 3.4. Tabla de emulsiones aniónicas (ASTM)**

Emulsiones asfálticas aniónicas, según ASTM D 977																					
Tipo	Rotura rápida				Rotura media										Rotura lenta						
Nomenclatura	RS-1		RS-2		MS-1		MS-2		MS-2h		HFMS-1		HFMS-2		HFMS-2h		SS-1		SS-1h		
Grado	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	
Prueba de Emulsiones:																					
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C (seg.)	20	100	-	-	20	100	100	-	100	-	20	100	100	-	100	-	20	100	20	100	
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C (seg.)	-	-	20	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sedimentación a 5 días (%), (a)	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	
Estabilidad en almacenamiento 1 día (%), (b)	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	
Demulsibilidad, 35 ml, 0.8 dioctyl sulfosuccinato de sodio (%) (c)	60	-	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Capacidad de cubrimiento y Resistencia al agua:																					
Cubrimiento agregado seco	***		***		Buena		Buena		Buena		Buena		Buena		Buena		***		***		
Cubrimiento después del rociado	***		***		Regular		Regular		Regular		Regular		Regular		Regular		***		***		
Cubrimiento agregado húmedo	***		***		Regular		Regular		Regular		Regular		Regular		Regular		***		***		
Cubrimiento después del rociado	***		***		Regular		Regular		Regular		Regular		Regular		Regular		***		***		
Mezcla con cemento (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0	-	2.0	
Tamizado (%)	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	
Residuo por Destilación (%)	55	-	63	-	55	-	65	-	65	-	65	-	55	-	65	-	57	-	57	-	
Ensayos sobre el Residuo de Destilación:																					
Penetración a 25°C(77°F),100g,5s.	100	200	100	200	100	200	100	200	40	90	100	200	100	200	40	90	100	200	40	90	
Ductilidad a 25°C(77°F), 5cm/min,cm.	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	
Solubilidad en tricloroetileno (%)	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	
Flotación, 60°C(140°F),s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1200	-	1200	-	1200	-	-	-	-	-	
Principales usos	(A)		(B)		(C)		(D)		(E)		(F)		(G)		(H)		(I)				

**Fuente:** Manual de emulsiones asfáltica

**Tabla 3.5. Tabla de emulsiones catiónicas (ASTM)**

Emulsiones asfálticas catiónicas, según ASTM D 2397												
Tipo	Rotura rápida				Rotura media				Rotura lenta			
Nomenclatura	CRS-1		CRS-2		CMS-1		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
Grado	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.	Mí n.	Má x.
Prueba de Emulsiones:												
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C (seg.)	***	***	***	***	***	***	***	***	20	100	20	100
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C (seg.)	20	100	100	400	50	450	50	450	***	***	***	***
Sedimentación a 5 días (%), (a)	***	5	***	5	***	5	***	5	***	5	***	5
Estabilidad en almacenamiento 1 día (%), (b)	***	1	***	1	***	1	***	1	***	1	***	1
Ensayo de Clasificación, (c)	Pasa		Pasa		***		***		***		***	
Demulsibilidad, 35 ml, 0.8 dioctyl sulfosuccinato de sodio (%) (d)	40	***	40	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Capacidad de cubrimiento y Resistencia al agua:												
Cubrimiento agregado seco	***		***		Bueno		Bueno		***		***	
Cubrimiento después del rociado	***		***		Regular		Regular		***		***	
Cubrimiento agregado húmedo	***		***		Regular		Regular		***		***	
Cubrimiento después del rociado	***		***		Regular		Regular		***		***	
Ensayo de carga de partículas	Positivo		Positivo		Positivo		Positivo		Positivo		Positivo	
Mezcla con cemento (%)	***	***	***	***	***	***	***	***	***	2.0	***	2.0
Tamizado (%)	***	0.1	***	0.1	***	0.1	***	0.1	***	0.1	***	0.1
Destilación:												
Aceite destilado por volumen de emulsión (%)	***	3	***	3	***	12	***	12	***	***	***	***
Residuo (%)	60	***	65	***	65	***	65	***	57	***	57	***
Ensayos sobre el Residuo de Destilación:												
Penetración a 25°C (77°F), 100g, 5s.	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90
Ductilidad a 25°C(77°F), 5cm/min, cm.	40	***	40	***	40	***	40	***	40	***	40	***
Solubilidad en tricloroetileno (%)	97.5	***	97.5	***	97.5	***	97.5	***	97.5	***	97.5	***
Aplicaciones para selección y uso de Emulsiones	(A)		(B)		(C)		(D)		(E)		(F)	

**Fuente:** Manual de emulsiones asfálticas

Nota: (tabla 3.4)

Puede pasarse por alto si se usa emulsión en menos de 5 días de fabricada, o el comprador puede exigir que se corra la prueba desde el tiempo de recepción hasta el uso, si el lapso es menor que 5 días.

Este ensayo puede ser usado en ves del ensayo de sedimentación en 5 días.

Este ensayo se hará dentro de los 30 días de la fecha de embarque.

Nota: (tabla 3.5)

Puede pasarse por alto si se usa emulsión en menos de 5 días de fabricada, o el comprador puede exigir que se corra la prueba desde el tiempo de recepción hasta el uso, si el lapso es menor que 5 días.

Este ensayo puede ser usado en ves del ensayo de sedimentación en 5 días.

Se puede aceptar materiales que fallan a la clasificación si pasan la prueba de demulsibilidad.

Este ensayo se hará dentro de los 30 días de la fecha de embarque.

De la tabla 3.4; Usos sugeridos

Tratamiento superficial, macadam de penetración, sello de arena, riego de liga.

Tratamiento superficial, macadam de penetración, sello agregado grueso (simple y múltiple).

Mezcla fría en planta, mezcla en vía, sello de arena, tratamiento de grietas, riego de liga.

Mezcla fría en planta, sello agregado grueso (simple y múltiple), mezcla en vía, riego de liga, sello de arena, tratamientos de grietas.

Mezcla fría en planta, mezcla caliente en planta, sello de agregado grueso (simple y múltiple), mezcla en vía, riego de liga, sello de arena, tratamientos de grietas.

Mezcla fría en planta, mezcla en vía, sello de arena, tratamientos de grietas, riego de liga.

Mezcla fría en planta, mezcla caliente en planta, sello de agregado (simple y múltiple), tratamientos de grietas, mezcla en vía, riego de liga.

Mezcla fría en planta, mezcla caliente en planta, sello de agregado (simple y múltiple), tratamientos de grietas, mezcla en vía, riego de liga.

Mezcla fría en planta, mezcla en vía, riego de liga, sello de lechada, riego negro, riego antipolvo.

De la tabla 3.5; Usos sugeridos

Tratamiento superficial, macadam de penetración, sello de arena, riego de liga.

Tratamiento superficial, macadam de penetración, sello agregado grueso (simple y múltiple).

Mezcla fría en planta, mezcla en vía, sello de arena, tratamiento de grietas, sello de agregado (simple y múltiple).

Mezcla fría en planta, mezcla caliente en planta, sello de agregado grueso (simple y múltiple), mezcla en vía, riego de liga, tratamiento de grietas.

Mezcla fría en planta, mezcla en vía, riego de liga, sello de lechada, riego negro, riego antipolvo.

### **3.1.5.- Ingredientes de las emulsiones asfálticas**

Los componentes básicos de las emulsiones son el asfalto o cemento asfáltico, los emulsificantes y el agua, si bien eventualmente puede llevar otros aditivos como fluidificantes y agentes correctores y/o estabilizantes.

Las propiedades y características de las emulsiones, dependen de la naturaleza y tipo de cada uno de sus componentes y de la proporción relativa de los mismos, así como del método y condiciones de fabricación que vayan a presentar las mismas para el determinado uso final que se les vaya a ofrecer.

#### **3.1.5.1.- Asfalto como ingrediente de una emulsión**

El contenido de asfalto en una emulsión tiene relación directa con la viscosidad que se desea en el producto y mediante el empleo de gráficos de viscosidad vs temperatura, se puede determinar la temperatura de riego adecuada para la viscosidad establecida en el proyecto.

En la práctica se emplean emulsiones hasta el 70% de contenido de ligante residual que deben utilizarse para tratamientos superficiales a 70°C. Estas emulsiones presentan la ventaja de que su alta viscosidad les impide fluir a los lados del camino. Las emulsiones al 60% a 65% pueden emplearse a temperaturas ambiente o con ligero calentamiento en época fría. Las tablas 3.4 y 3.5 exhiben los contenidos de asfalto especificados para varios tipos de emulsión.

En vista de que el cemento asfáltico es un material tan complejo, solo se discutirán aquellas propiedades que afecten significativamente las emulsiones. Sin embargo, no existe una correlación exacta entre dichas propiedades y la facilidad con la cual el asfalto puede emulsionarse. No obstante que la dureza del cemento asfáltico de base puede variarse a voluntad, la mayor parte de las emulsiones se hacen con asfaltos situados dentro de un intervalo de penetración entre 100 y 250. A veces, las condiciones climáticas pueden determinar el uso de un asfalto base más blando o más



duro. En cualquier caso, es esencial la compatibilidad del agente emulsificante con el cemento asfáltico para producir una emulsión asfáltica estable.

El asfalto es un coloide compuesto de varias fracciones, siendo las principales los asfaltenos y los maltenos. La constitución coloidal del asfalto depende de la naturaleza química, el porcentaje de estas fracciones y sus relaciones entre ellas.

Los asfaltenos son la fase dispersa del asfalto, mientras que los maltenos son la fase continua. Se concibe que los asfaltenos suministren la dureza mientras se cree que los maltenos confieren al asfalto las propiedades de adhesividad y ductilidad. Los maltenos presentes tienen incidencia en la viscosidad y propiedades de flujo del asfalto. La interacción compleja de las diferentes reacciones hace casi imposible predecir en forma precisa el comportamiento del asfalto para emulsificar. Por este motivo, se ejerce un continuo control de calidad en la producción de la emulsión para detectar y corregir cualquier tenencia de asfalto conducente a afectar adversamente el comportamiento de la emulsión resultante.

**Tabla 3.6. Tipos de asfaltos en función al clima**

Pavimentación de	Tipo de clima		
	Cálido	Moderado	Frío
<b>Aeropuertos</b>			
Pistas	60-70	60-70	85-100
Accesos	60-70	60-70	85-100
Parqueos	60-70	60-70	85-100
<b>Carreteras</b>			
Tráfico pesado	60-70	60-70	85-100
Tráfico mediano y ligero	85-100	85-100	120-150
<b>Calles</b>			
Tráfico pesado	60-70	60-70	85-100
Tráfico mediano y ligero	85-100	85-100	85-100
<b>Estacionamientos</b>			
Industriales	60-70	60-70	60-70
Comerciales	60-70	60-70	85-100
<b>Zonas de Recreo</b>			
Canchas de tenis	85-100	85-100	85-100
Áreas de juego	85-100	85-100	85-100
Bermas			85-100

**Fuente:** Manual de asfaltos

Se usan en la actualidad varios sistemas de análisis de asfalto para superar y evaluar las fracciones. No existe consenso entre los técnicos respecto a cómo cada fracción afecta el comportamiento de campo. No hay acuerdo total en cuanto a la facilidad con la cual un cemento asfáltico puede ser emulsificado.

### **3.1.5.2.- El agua como ingrediente de una emulsión**

El segundo ingrediente en cantidad en las emulsiones es el agua. No puede restarse su importancia a sus contribuciones para dotar el producto final con propiedades deseables. El agua humedece, disuelve, adhiere a otras sustancias y modera las reacciones químicas. Todos son factores importantes que pueden ser favorables a la producción de una emulsión satisfactoria. Por otro lado, el agua puede contener minerales u otras sustancias que afecten la producción de emulsiones asfálticas estables.

Pueden ser inadecuadas las aguas sin tratar a causa de impurezas, tanto en solución como en suspensión coloidal. De especial cuidado es la presencia de iones de calcio y magnesio, que pueden afectar las propiedades de la emulsión.

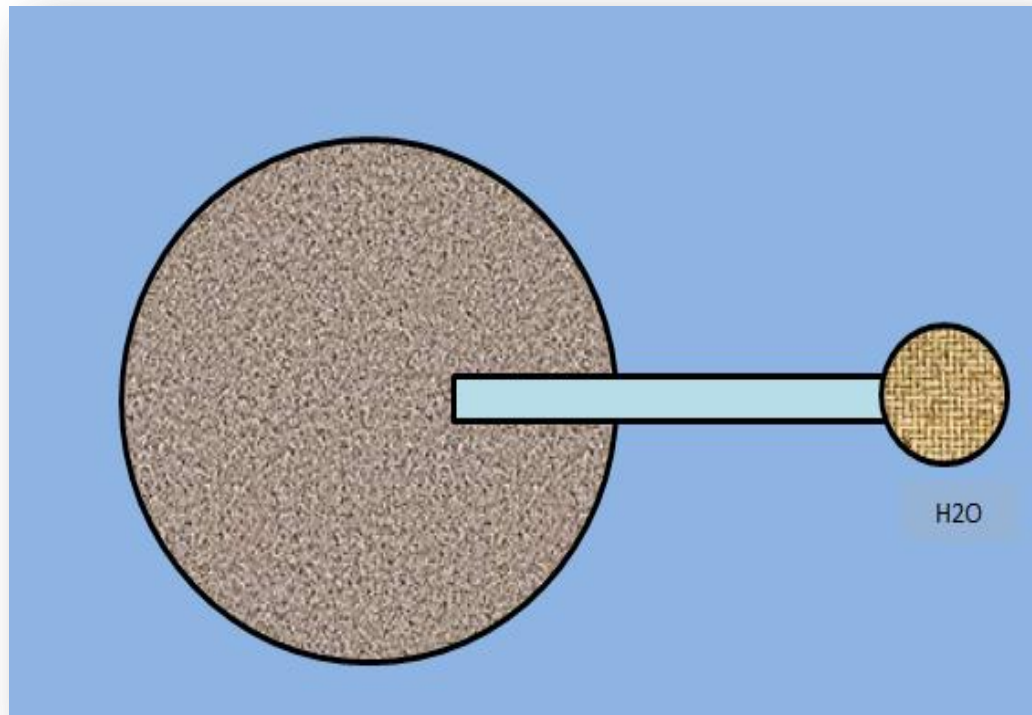
No debe usarse en la producción de emulsiones agua que contenga materias extrañas. Puede originar desbalances en los componentes de la emulsión que puede afectar nocivamente el comportamiento o producir la rotura prematura. En resumen, el agua usada para producir emulsiones deberá ser razonablemente pura y libre de materias extrañas y deberá considerarse como un componente importante.

### **3.1.5.3.- El agente emulsionante como ingrediente de una emulsión**

Como hemos visto la composición de la emulsión asfáltica se basa en un producto no polar, el betún asfáltico, y otro polar el agua. En general los líquidos son buenos disolventes de sustancias que tengan las mismas características polares: no polar - no polar, polar – polar. Debido a que las moléculas del agente emulsificante deben fijarse a la capa interfacial entre el agua y el betún asfáltico, interesa que tenga afinidad por ambas sustancias, por lo que suelen emplearse productos químicos cuyas moléculas estén compuestas por una parte no polar que tendera a disolverse en el asfalto, y otra polar que tendera a disolverse en el agua. De esta manera, las moléculas del agente se sitúan en la capa exterior de los glóbulos de betún asfáltico con la parte no polar y anclada en ellos y la polar en el agua, como se observa en el gráfico 3.3.

Según su naturaleza, los agentes emulsificantes actúan por reducción de la energía interfacial, modificando el gradiente potencial interfacial o hidratando la superficie de las partículas.

**Gráfico 3.3.** Molécula del agente emulsivo situado en la capa exterior del glóbulo de asfalto



**Fuente:** Elaboración personal

Cada fabricante tiene su propio procedimiento para usar estos agentes en la producción de emulsiones. En la mayor parte de los casos, el agente se combina con el agua antes de introducirlo en el molino coloidal. En otros casos, sin embargo, pueden combinarse con el cemento asfáltico justo antes de entrar al molino coloidal.

a) Propiedades de los emulsivos

Con frecuencia se usa incorrectamente el término “emulsivo”. Los emulsivos forman un grupo de la clase general de agentes de actividad superficial. Otros grupos son los agentes humectantes, solubilizadores, detergentes, agentes de suspensión.

Los emulsivos se emplean en la formulación de emulsiones para facilitar la emulsificación y dar estabilidad a la emulsión. Estos efectos se producen por la

reproducción de la tensión interfacial entre las dos fases y por acción coloidal protectora, respectivamente. De ordinario, los emulsivos son sustancias muy complejas y parecen que cuanto más complejas con mayor eficiencia funcionan. Esto se tiene en cuenta en la práctica de formulación y con frecuencia se usan combinaciones de dos o más emulsivos.

Los emulsivos se pueden dividir en iónicos y no iónicos. El emulsivo iónico consta de un grupo lipófilo orgánico y un grupo hidrófilo. Los emulsivos iónicos se subdividen en aniónicos y catiónicos, según sea la naturaleza del grupo activo. Ordinariamente se considera que la porción lipófila de la molécula es la porción de actividad superficial. Como es de suponer, no son mutuamente compatibles los agentes aniónicos y catiónicos de actividad superficial, pues en virtud de las cargas iónicas tienden a neutralizarse entre sí y se nulifica su actividad superficial.

Los emulsivos no iónicos son totalmente covalentes y no tienen ninguna tendencia a la ionización. Por consiguiente, puede asociarse con otros agentes no iónicos de actividad superficial y con agentes aniónicos o catiónicos. Los emulsivos no iónicos son más inmunes contra la acción de electrolitos que los agentes aniónicos de actividad superficial.

De las diversas propiedades de los emulsivos, una de las más importante es el equilibrio hidrófilo-lipófilo. Este es una expresión de atracción simultánea relativa de un emulsivo con respecto al agua y el aceite.

El equilibrio hidrófilo-lipófilo de un emulsivo determina el tipo de emulsión que tiende a ser formada.

La Solubilidad de un emulsivo es de suma importancia en la preparación de concentrados emulsionables. Es preciso que el emulsivo permanezca disuelto en cualesquiera condiciones de almacenamiento. Con frecuencia es posible aumentar la solubilidad de un emulsivo con algún coemulsivo. También son usuales diversos disolventes como conjugadores o codisolventes.

La tensión interfasal es la fuerza que se requiere para romper la superficie entre los líquidos no miscibles; es de interés en la emulsificación en virtud de que cuanto menor es la tensión interfasal entre las dos fases de una emulsión, tanto más fácil es la emulsificación. El coeficiente de extensión (C.E.) se calcula con la tensión superficial (T.S.) y la tensión interfasal (T.I.) para un aceite determinado según la siguiente fórmula:

$$CE = TS \text{ aceite} - (TS \text{ soln.} - TS \frac{\text{aceite}}{\text{soln.}})$$

Cuanto mayor es el coeficiente de extensión (más positivo), tanto mayor es la potencia humectante y difusiva.

#### b) Equipos para la emulsificación

La elección del equipo depende de la aplicación que se haya de dar a la emulsión que se prepara. La finalidad de la maquinaria para emulsificación, ya sea sencilla o compleja, es dividir y dispersar la fase interna en la externa, de suerte que el tamaño de partícula de la emulsión que resulte sea suficientemente pequeño para evitar la unión y la consiguiente desintegración de la emulsión en el tiempo requerido de la estabilidad. La agitación a mano es la más sencilla.

La rotación mecánica de las paletas suele ser lenta, y si la emulsión no es muy viscosa, es reducida la eficiencia de agitación. Para agitar emulsiones viscosas que contienen gran proporción de sólidos, geles, jabonosos, sustancias resinosas, etc., es más eficiente un agitador mecánico de paletas giratorias o de áncora.

El agitador planetario fue inventado para emulsiones de gran viscosidad, como los que se hacen en la industria de comestibles. En un agitador planetario la paleta efectúa dos movimientos circulares; uno de rotación sobre su propio eje y otro de traslación en una órbita circular. De esta manera se puede mezclar bien una gran porción de masa espesa.

Aireación que es la agitación por medio de burbujas de aire o de gas, que pasan por un líquido, no es mucho más eficiente que la agitación a mano, a menos que se usen

volúmenes muy grandes de gas. El uso de aire o de vapor es más práctico en sistemas de poca viscosidad.

Agitación por medio de hélice: Uno de los tipos más usual de maquinaria para emulsificación es el de una o más hélices montadas sobre un eje en un tanque mezclador. Esta clase de agitación es muy eficiente para agitar emulsiones de viscosidad reducida o mediana.

Agitación con turbinas: La inclusión de pantallas fijas en la pared del tanque o adyacentes a las hélices, como un rotor y estator de turbina, aumenta considerablemente la eficiencia de la agitación. El agitador de turbina es el preferible de los dos métodos, pues las pantallas de desviación en un tanque, con frecuencia, ocasionan áreas de poca o ninguna agitación, aunque el efecto general es el de aumentar la eficiencia de agitación.

El molino de coloides se puede considerar como una modificación de la turbina: En virtud de las tremendas fuerzas cortantes que se aplican a la emulsión, el aumento de temperatura durante la emulsificación puede ser de 15 a 80°C, y las más de las veces es necesario el enfriamiento externo. Se puede efectuar la molienda de líquidos y pastas.

En un homogeneizador, para efectuar la emulsificación, se pasan ambas fases por una válvula de resorte, generalmente a fuerte presión. Esto es útil en algunos casos en que la homogeneización a fuerte presión fomenta la conglutinación de las partículas finas de emulsión que forma.

El segundo paso de homogeneización, a menor presión, desintegra los grumos y da un producto de menor viscosidad. Empleando ingredientes similares, los homogeneizadores dan por lo general una emulsión de menor tamaño medio de partícula que los molinos de coloides, aunque no es tan uniforme dicho tamaño de partícula.

Los homogeneizadores sirven para líquidos o pastas y la viscosidad de producción es poco afectada por la viscosidad.

Un invento más creciente es la rama de equipos emulsificadores es el oscilador de alta frecuencia o ultrasónico.

Como es de suponer, se emplean muchas combinaciones de los equipos citados y se están estudiando nuevos diseños. Por ejemplo: para la elaboración de cremas cosméticas una paleta movida a motor en un tanque de dobles paredes es complementada con un pequeño agitador de turbina de gran velocidad. Este aparato es muy eficaz para la emulsificación inicial de poca cantidad de material en el fondo del tanque y facilita la emulsificación incluso al concluir una partida cuando está lleno el tanque.

El equipo de laboratorio para estos y otros tipos de emulsificación es usado comúnmente. Se usan batidoras de huevos movidas por motor, mezcladoras de comestibles a gran velocidad y maquinas agitadoras. La agitación de laboratorio es por lo común mucho más vigorosa y eficiente que la de equipos a escala de planta. Otra diferencia que a menudo tiene aún mayor importancia es la correlación entre los resultados de laboratorio y de los de planta, es la regulación de la temperatura de emulsificación y después de ella, por ejemplo: en pruebas de laboratorio es rápida la variación de temperatura. El enfriamiento de una emulsión, incluso dejándola reposar al aire en un vaso, suele ser mucho más rápido que el enfriamiento de un gran tanque de emulsión.

### **3.1.6.- Quiebre de las emulsiones asfálticas**

El asfalto tendrá que separarse en su fase acuosa, si la emulsión ha de cumplir su función última como cementante e impermeabilizante. Para tratamientos superficiales y sellos, se formulan las emulsiones para romper una vez entren en contacto con una sustancia extraña tal como un agregado o la superficie de un pavimento. Los glóbulos de asfalto entran en coalescencia y producen una película continua de asfalto sobre el agregado o pavimento. Para mezclas densas, se requiere más tiempo para permitir el mezclado y fraguado. En consecuencia, las emulsiones usadas para mezclas se formulan para rotura retardada. La coalescencia del asfalto se conoce como rotura o fraguado. La velocidad a la cual los glóbulos de asfalto se separan de las fases acuosas se identifica como tiempo de rotura y fraguado. (Por ejemplo, una emulsión



de rotura rápida romperá entre uno a cinco minutos después de ser aplicada, mientras que una emulsión de rotura media o lenta puede tomar un tiempo mayor).

La velocidad de rotura es controlada primeramente por el tipo específico y concentración del agente emulsificante usado, así como por las condiciones atmosféricas.

El hecho de que diferentes tipos de agregados tengan diferentes tasas de absorción (succión de un líquido) significa que la rotura esta también vinculada a las características relativas de absorción de agregados usados. Aquellos con altas tasas de absorción tienden a acelerar la rotura de la emulsión por motivo de la remoción más rápida del agua emulsionante.

En mezclas emulsión-agregado, la gradación y área superficial del agregado son también factores significativos en la velocidad de rotura. Al cambiar el área superficial, las características de rotura del medio también cambian debido a la alteración de la absorción (acumulación en la superficie) del agente emulsificante por el agregado o ajustar la formulación de la emulsión para cumplir los requisitos del agregado.

#### **3.1.6.1.- Factores que afectan la velocidad de quiebre**

En general, los siguientes son algunos de los factores que afectan la velocidad de rotura de una emulsión:

La velocidad de absorción de agua por el agregado. Un agregado poroso de textura rugosa, activa el tiempo de rotura absorbiendo agua de la emulsión.

Contenido de humedad del agregado previo a la mezcla.

Condiciones atmosféricas, temperatura, humedad y velocidad del viento, tienen todas influencias en la velocidad de rotura.

Fuerzas mecánicas originadas por el cilindrado y el tráfico. La presión del cilindro hasta un cierto límite, obliga a la expulsión del agua de los materiales.

Distribución de tamaños y composición mineral del agregado. Mezclas de agregados finos tienden a romper más rápido por motivo de que poseen mayor superficie que un peso similar de agregado grueso. La composición

mineralógica también afecta la velocidad a la cual rompe la emulsión asfáltica. Puede presentarse algún tipo de reacción química entre el emulsificante y la superficie del agregado. Igualmente, agregados sucios o con exceso de finos pueden acelerar la rotura de retardar el curado.

El tipo y la cantidad de agente emulsificante usado.

La intensidad de carga del agregado respecto a la intensidad de carga del emulsificante, en combinación con el área superficial, son determinantes principales de la velocidad de rotura.

Coagulación química. La emulsión se vuelve inestable por motivo de una reducción en el contenido de agua.

Los factores indicados deben considerarse al determinar el tiempo de trabajo después de rociar la emulsión o mezclarla con los agregados en la obra.

En general los factores que influyen en la ruptura de una emulsión aniónica son: La evaporación de la fase acuosa, la difusión del agua de la emulsión y en menor grado, factores físico-químicos y la absorción superficial de una parte del emulsificante en el material pétreo.

### **3.1.7.- Viscosidad de las emulsiones asfálticas**

La viscosidad de las emulsiones depende principalmente de:

La viscosidad de la fase acuosa

El contenido de betún asfáltico

La finura de la dispersión

La viscosidad de la fase acuosa no es susceptible de grandes variaciones, de forma que las principales variables a considerar son el contenido de betún asfáltico y la finura de la dispersión.

Esta última depende de la dosificación y tipos de agentes emulsionantes empleados y del tipo de equipo emulsificador empleado, por lo que puede considerarse constante en una fabricación organizada.

El contenido de betún asfáltico puede variarse dentro de ciertos límites, hasta un máximo teórico de 74,02%. Este máximo, corresponde a la hipótesis de esferas del mismo diámetro agrupadas con la máxima capacidad. El contenido de betún asfáltico tiene gran influencia en la viscosidad de la emulsión, que crece muy rápidamente al acercarse dicho contenido al máximo teórico. Por ejemplo, al aumentar el contenido de betún asfáltico de una emulsión del 60% puede hacer aumentar la viscosidad de 20 a 100 segundos Saybolt Furol.

### **3.1.8.- Aplicaciones de las emulsiones asfálticas**

Las emulsiones asfálticas de quiebre rápido son, sin duda, el ligante más adecuado para la ejecución de tratamientos superficiales, por su facilidad de empleo y su excelente adherencia a todo tipo de áridos, si se emplea la emulsión más adecuada.

Las emulsiones asfálticas de quiebre medio y lento se emplean en la preparación de mezclas en frío, ya sea en planta o en sitio. Las emulsiones de quiebre lento se emplean también para efectuar riegos de liga diluidas 1:1 en agua, y en la preparación de lechadas asfálticas y riegos negros. Las emulsiones de rápida tienen su principal campo de aplicación en los diferentes tipos de tratamientos superficiales con gravillas, en riego de adherencia y en tratamiento de macadam por penetración.

Las emulsiones de rotura media son especialmente emulsiones de envuelta que se utilizan fundamentalmente en la fabricación de mezclas en frío generalmente abiertas, tanto almacenables para ser empleadas en operaciones de bacheo, como en carpetas en trabajos de conservación y construcción.

Las emulsiones de rotura lenta, que últimamente han experimentado un gran desarrollo de destinan fundamentalmente a la fabricación de mezclas asfálticas con finos como son las mezclas densas, grava emulsión, estabilizaciones de suelos y lechadas asfálticas, así como ciertos tipos de riego como los de imprimación y antipolvo.

### **3.1.9.- Ventajas y desventajas de las emulsiones asfálticas**

Las principales razones que explican el éxito y gran desarrollo de las emulsiones asfálticas en trabajos de conservación y construcción de carreteras frente al resto de los ligantes, betunes y cut-backs, entre otros, son las siguientes:

#### **3.1.9.1.- Ventajas**

- Permiten el empleo de agregados ácidos y húmedos
- Se amplía la temporada de trabajo
- Se evita el consumo de activantes
- Buena adhesividad frente a todo tipo de agregados
- Se transportan, almacenan y emplean a temperatura ambiente
- Se evita el consumo de combustible
- No se contamina el medio ambiente
- Hace más fácil el manejo y la distribución del ligante
- Se evitan problemas de sobrecalentamiento
- Se eliminan riesgos de incendio y explosión
- Nulo o mínimo contenido de fluidificantes
- Generan un importante ahorro energético
- Ninguna contaminación atmosférica
- Versatilidad y adaptabilidad de su formulación
- A la naturaleza y granulometría de los agregados
- A la época de empleo
- Al tipo y solicitaciones de tránsito
- Mayores posibilidades de empleo con equipos más sencillos
- Amplio periodo de almacenamiento
- Economía en su aplicación
- Bajo costo de la fase dispersante (agua)
- Reducción del volumen del transporte de los agregados por el uso de los materiales locales
- Permiten dosificaciones más exactas

### 3.1.9.2.- Desventajas

La disponibilidad de agua limpia y libre de impurezas es una limitante a tomar en cuenta debido a que en muchos lugares es crítica esta obtención.

Tratándose de nuestro país, la producción de emulsiones requiere la importación de toda la gama de emulsificantes del exterior, cualquier desabastecimiento implicaría la interrupción del proceso de fabricación.

Y por ser una tecnología nueva en nuestro medio, requiere de un tiempo prudencial para su adaptación.

En el caso de tratamientos superficiales deben tomarse en cuenta las siguientes condiciones:

No deben efectuarse riegos con tiempo amenazante de lluvia ni temperaturas ambientes inferiores a 10°C.

No deben emplearse emulsiones poco viscosas (RS-1 o CRS-1) en zonas con declives o peraltes pronunciados.

La temperatura de aplicación debe establecerse de acuerdo con la relación temperatura-viscosidad (ver Tabla 3.7.)

En general deben respetarse las dosificaciones establecidas por el proyecto, de manera de mantener la dosis exacta de ligante según sea el tipo de mezcla a preparar.

*Tabla 3.7. Temperaturas recomendadas para riego de asfalto*

<b>Tipos y grado de asfalto</b>	<b>Temperatura de riego °C</b>
CRS-1	50-85
CRS-2	50-85
RS-1	20-60
RS-2	50-85
RC 250	75
RC 800	95
CA 120/150	140-180

*Fuente: Manual de asfaltos*

### **3.1.10.- Variables que afectan a la emulsión asfáltica**

Existen muchos factores que afectan la producción, almacenamiento, uso y comportamiento de la emulsión. Sería difícil identificar uno solo de ellos como el más significativo. Pero entre las variables que tienen un efecto relevante están:

Propiedades químicas del cemento asfáltico de base.

Dureza y calidad del cemento asfáltico de base.

Tamaño de las partículas de asfalto en la emulsión.

Tipo y concentración del agente emulsificante.

Condiciones de manufacturas tales como la temperatura, precisión y cortante.

Carga iónica de las partículas de la emulsión.

Orden de adición de los ingredientes.

Tipo de equipo usado en la manufactura de la emulsión.

Propiedades del agente emulsificante.

Adición de modificadores químicos.

Los factores enumerados se pueden variar para acondicionarlos a los agregados disponibles o a las condiciones constructivas. Es siempre aconsejable consultar al suministrador de la emulsión respecto a una combinación particular asfalto-agregado, en vista de que hay pocas reglas absolutas que trabajen similarmente bien bajo todas las condiciones. En consecuencia, la manufactura de emulsiones asfálticas aparece como una combinación de ciencia y habilidad.

### **3.1.11.- Transporte y almacenamiento**

Las emulsiones asfálticas generalmente se transportan a granel en camiones estanques, dejando el envasado en tambores para obras de menor envergadura.

Previo a la carga, el estanque debe ser revisado de manera que esté completamente limpio, para evitar cualquier grado de contaminación. No deben mezclarse con productos como asfaltos cortados, pues estos cambian sensiblemente las propiedades del residuo. Del mismo modo no deben mezclarse emulsiones de distintos grados de polaridad, como tampoco de diferentes proveedores.

El almacenamiento debe efectuarse en tanques limpios, los cuales no necesariamente deben ser calefaccionados.

### **3.1.12.- Ensayos en las emulsiones asfálticas**

En la determinación de los rasgos de una emulsión, puede ayudar grandemente una apropiada interpretación de las pruebas de laboratorio. En forma correspondiente al avance a través de los años de la tecnología de las emulsiones, han evolucionado las técnicas de ensayo. Algunas de estas pruebas se han diseñado para medir características de comportamiento. Otras tratan principalmente con los procesos de manufactura, las pruebas de laboratorio se realizan normalmente para uno de cuatro propósitos:

Medir propiedades relacionadas con la manipulación, almacenamiento y uso en la obra.

Controlar la calidad y uniformidad del producto durante la manufactura y uso.

Suministrar productos de referencia en las especificaciones.

Predecir y controlar el comportamiento de campo.

En vista de que es impracticable discutir la multitud de requerimientos y métodos de ensayo, este capítulo se reduce a los métodos en las normas “AASHTO” y “ASTM”.

#### **3.1.12.1.- Alcance de las normas de ensayo**

Los métodos dados bajo el encabezamiento titulado composición, consistencia, estabilidad y examen de residuos cubren la investigación de las emulsiones asfálticas compuestas principalmente de bases asfálticas semisólidas o líquidas, agua y agente emulsificante.

Esta norma no significa apuntar a todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien utilice esta norma de consultar y establecer la seguridad apropiada y reglas de salud y determinar la aplicabilidad de limitaciones reguladoras primordiales para su uso, los métodos abarcan los siguientes ensayos:

#### **3.1.12.2.- Ensayos de composición**

Contenido de agua

Residuo y aceite destilado por destilación

Identificación de aceite destilado mediante micro destilación

Residuo por evaporación

Carga de partícula

### **3.1.12.3.- Ensayos de consistencia**

Viscosidad (Saybolt Furol)

### **3.1.12.4.- Ensayos de estabilidad**

Demulsibilidad

Sedimentación

Mezclas con cemento

Tamizado

Recubrimiento

Miscibilidad con agua

Congelamiento

Capacidad de recubrimiento y resistencia al agua

Estabilidad de almacenaje

### **3.1.12.5.- Examen del residuo asfáltico**

Penetración

Solubilidad en tricloroetileno

Ductilidad

Flotación

Peso específico

### **3.1.13.- Polímeros**

Valdivia (2008), Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.



Algunos modificadores poliméricos que han dado buenos resultados, se enlistan a continuación:

Homopolímeros: que tienen una sola unidad estructural (monómero).

Copolímeros: Tienen varias unidades estructurales distintas (EVA, SBS).

Elastómeros: Al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tiene deformaciones pseudo plásticas con poca elasticidad.

Hernández (2004), Ya se mencionó que el polímero es una molécula larga creada por una reacción química de muchas pequeñas moléculas, que una con otra forman largas cadenas. El primer polímero conocido por el hombre, y al cual se le dio un uso fue el látex natural, conocido como hule, (del náhuatl hollín que significa movimiento), producto del sangrado del árbol perteneciente al género de las euforbiáceas conocido como ulcuahuitl o árbol del hule (Castilloa Elástica Cervka).

A pesar de que los polímeros pueden formularse de tal manera que resulten con cualquier propiedad física, aquellos que se utilizan en la modificación de asfaltos se pueden agrupar en dos categorías principales:

**Plastómeros y elastómeros:** Los elastómeros se pueden alargar, y por su elasticidad, recobran su forma. Dichos polímeros no añaden mucha resistencia al asfalto, si éste no se encuentra estirado; una vez estirado, adquiere una gran resistencia con la propiedad de recuperar totalmente su forma inicial cuando se liberan los esfuerzos aplicados. Algunos de los elastómeros utilizados para modificar asfaltos son: bloque de copolímeros estireno-butadieno-estireno o estireno butadieno (SBS - SB), bloque de copolímeros estireno-isopreno-estireno (SIS), látex ahulado de estireno- butadieno (SBR), látex de policloropreno, y látex de hule natural. (El látex es una emulsión de gotas microscópicas de polímero suspendidas en agua).

Los plastómeros más comunes son: el etil-vinilo-acetato (EVA), polietileno/polipropileno, y polio le finas. El lígame asfáltico y las propiedades de la mezcla pueden ser diseñadas eligiendo el polímero correcto para determinada

aplicación, y asegurándose que es compatible con el asfalto base. En general, se eligen elastómeros para proporcionar una mayor resistencia y flexibilidad al pavimento, mientras que los resultados con plastómeros generan una mezcla de alta estabilidad y rigidez. Los resultados obtenidos de un proceso de modificación de asfalto dependen altamente de la concentración, peso molecular, composición química y orientación molecular del polímero, así como, de la fuente del crudo, del proceso de refinación y del grado del asfalto base que se utiliza.

La mayor diferencia cuando es modificado un asfalto con polímeros es su reología, o sus características de flujo, particularmente su susceptibilidad térmica. Por ejemplo, un AC-10 modificado con 3% de polímero SBS se convierte en un AC-20. Cuando un asfalto es modificado, la viscosidad a 60 °C cambia dramáticamente, pero las penetraciones tanto a 25°C como a 4°C cambian tan solo pocos grados.

La modificación con polímeros causa cambios significativos en la relación esfuerzo - deformación, en la respuesta a la deformación plástica y en los parámetros de finjo tipo no-newtoniano. La capacidad de algunos polímeros para su recuperación elástica (la respuesta a la deformación) se mide monitoreando el flujo bajo la acción de una carga, y su recuperación elástica cuando la carga desaparece y añade durabilidad al asfalto. Se han desarrollado nuevas pruebas para medir estas propiedades; los cuales son más adecuados en algunos casos que los métodos convencionales (viscosidad absoluta o cinemática, punto de reblandecimiento, penetración, etc.), ya que caracterizan las propiedades físicas de los asfaltos modificados con polímeros a altas y bajas temperaturas.

Los tipos de polímeros son entre otros:

**Copolímeros en block y otros termoplásticos:** Su característica es el contener bloques finales de estireno y bloques medios de butadieno para proporcionar "elasticidad". En este grupo están:

SB (Estireno - Butadieno)

SBS (Estireno - Butadieno - Estireno)

SIS (Estireno - Isopreno - Estireno)

SEBS (Estireno - Etileno - Butadieno - Estireno)

LDPE (Polietileno baja densidad)

ABS (Acrílonitrilo - Butadieno - Estireno)

EVA (Etileno - Vinil - Acetato)

**Hules naturales y sintéticos:**

NR (Hule natural)

PBD (Polibuladieno)

PI (Poliisoprenos)

PCB (látex)

**Otros:**

Hule de llanta

Fibras (celulosa, poliéster, polipropileno, etc.) .

Agentes antistripping (poliiminas).

### **3.2.- CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA**

En el presente subtítulo se desarrollan las pruebas de laboratorio necesarias para llevar a cabo el diseño de la mezcla propuesta en el estudio.

Se eligió la chancadora Garzón, ubicada en San Mateo con dirección a la carretera Panamericana se desvía a la derecha a 2 Km encontrándose dicha cantera que es de agregado pétreo (triturado).

La emulsión asfáltica seleccionada fue extraída de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, y solicitada de una empresa privada de la ciudad de Villa Montes ubicada en el barrio 27 de Diciembre, sobre la Av. Periférica, ya que la empresa trabaja con la emulsión asfáltica cumpliendo con sus especificaciones técnicas requeridas.

El subtítulo está compuesto principalmente en dos partes:

La primera que constituye la descripción detallada del procedimiento para la caracterización de los materiales pétreos triturados, (grava, gravilla y arena).

La segunda parte constituye al análisis de la emulsión asfáltica (Betumix CMS-2H), de rotura media.

Los ensayos se realizaron en los laboratorios de “Asfaltos y Hormigón” de la *Universidad Autónoma Juan Misael Saracho* (U.A.J.M.S.), por tal motivo se describen dichos ensayos con la norma ASTM y AASHTO, siendo las más utilizadas.

#### **3.2.1.- Selección de materiales**

##### **3.2.1.1.- Selección de los agregados**

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

El agregado pétreo (triturado), el lugar de donde fue extraído está situado en San Mateo.

*Imagen 3.1. Imagen satelital chancadora Garzón (San Mateo)*



*Fuente: Elaboración personal*

***Imagen 3.2. Cantera agregado pétreo triturado (Garzón)***



***Fuente: Elaboración personal***

***Imagen 3.3. Recogiendo el material pétreo (Grava)***



***Fuente: Elaboración personal***

*Imagen 3.4. Recogiendo el material fino (Arena)*

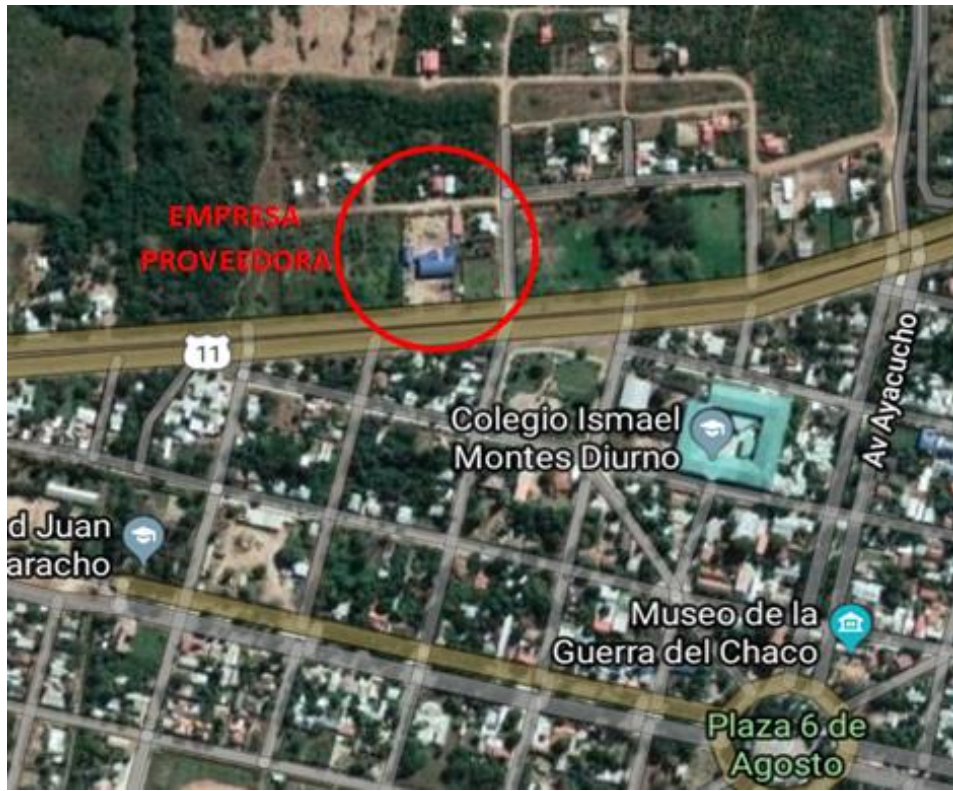


*Fuente: Elaboración personal*

### **3.2.1.2.- Selección de la emulsión asfáltica**

La emulsión asfáltica seleccionada fue extraída de la ciudad de Santa Cruz de la sierra, y solicitada de una empresa privada de la ciudad de Villa Montes ubicada en el barrio 27 de diciembre, sobre la Av. Periférica, ya que la empresa trabaja con la emulsión asfáltica cumpliendo con sus especificaciones técnicas requeridas, la empresa trabajó en muchas obras donde resalta el uso de emulsión asfáltica como en tratamientos de carpetas asfálticas los cuales fueron los más realizados, donde estuvo presente el uso de la emulsión asfáltica (Betumix CMS-2H).

*Imagen 3.5. Imagen satelital empresa privada proveedora de la emulsión asfáltica*



*Fuente: Elaboración personal*



### **3.2.1.3.- Selección de los materiales plásticos**

Estos materiales plásticos, son materiales reciclados, los cuales fueron extraídos algunos de los basureros, de estos recogidos de la basura los que estaban en mejores condiciones, y otros fueron extraídos empresas o entidades que estén con el constante uso de estos materiales desechables, en el caso de las bolsas de leche se los recogió de la empresa “PIL TARIJA” y las botellas de plástico únicamente se las recogió de basureros y de las calles.

### **Recolección de las bolsas de leche**

Las bolsas de leche fueron extraídas de la planta industrializadora de leche “PIL TARIJA”, donde desechan de 100 a 1000 bolsas de leche por día, estas bolsas desechadas no vuelven a ser usadas, debido a que presentaron fallas al envasar el producto, algunas fallas son de la maquinaria al no sellar con precisión las bolsas y otras por fallas de la bolsa al no poder resistir el envasado del producto.

*Imagen 3.6. Planta industrializadora de leche “PIL TARIJA”*



*Fuente: Elaboración personal*

*Imagen 3.7. Tambores de basuras o bolsas de leches desechadas*



*Fuente: Elaboración personal*

*Imagen 3.8. Bolsas de leches recogidas*



*Fuente: Elaboración personal*

## Recolección de las botellas de plásticos

Las botellas de plásticos únicamente fueron recogidas de los basureros y de las calles, las botellas de plásticos son desechos los cuales los tenemos presente en el día a día, ya sea en la mesa del hogar para el almuerzo o la cena, como también en los basureros y en las calles, por lo cual este material es de fácil acceso, y por lo tanto no fue dificultosa su recolección.

*Imagen 3.9. Basurero exclusivamente para botellas de plástico y latas de aluminio*



*Fuente: Elaboración personal*

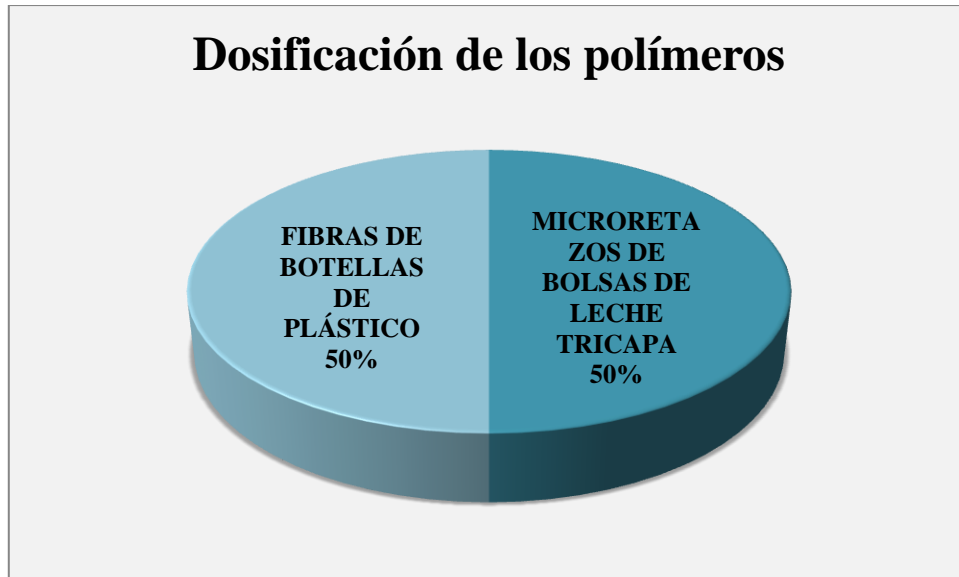
### 3.2.2.- Unidad de estudio

#### 3.2.2.1.- Población

Comportamiento de las mezclas asfálticas con emulsión en frío, con las distintas dosificaciones de material plástico a adicionar como ser las fibras de botellas de

plástico y las bolsas de leche tricapa recicladas, realizadas a un porcentaje óptimo de emulsión asfáltica.

**Gráfico 3.4.** Gráfico de dosificación de los polímeros utilizados para la mezcla



*Fuente: Elaboración personal*

### **3.3.- ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS**

Para realizar la caracterización de los agregados triturados que se va a utilizar en la elaboración del diseño de las mezclas asfálticas, se van a realizar ensayos impuestos por las normas AASHTO y ASTM.

A continuación se procede a mencionar los siguientes ensayos realizados:

- Cuarteo de muestras
- Peso unitario
- Granulometría
- Peso específico
- Desgaste de los Ángeles
- Equivalente de arena

### **3.3.1.- Cuarteo de muestras (ASTM C 702)**

Los diferentes tipos y tamaños de áridos requieren que la muestra sea representativa para los diferentes ensayos a los que será sometida. El material obtenido en la chancadora o cantera deberá ser siempre mayor que la cantidad de la muestra requerida para el ensayo.

El material debe ser reducido en cantidad de acuerdo al ensayo que se le va a practicar. Este método establece dos procedimientos uno manual y el otro mecánico, para la reducción de muestras de suelo, áridos y agregados pétreos en general. Los mejores resultados se obtienen usando un cuarteador metálico de tamaño adecuado, este último fue el usado para la presente práctica.

A continuación se describe el procedimiento con el cuarteador metálico o mecánico:

Coloque la muestra en uno de los recipientes del cuarteador.

Vacié la muestra en el cuarteador.

Separe el material correspondiente a uno de los recipientes.

Repita el procedimiento con el material del recipiente restante hasta obtener el tamaño de muestra requerido.

**Imagen 3.10.** Distribuyendo la muestra seleccionada en el cuarteador mecánico



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.11.** Muestra después de ser cuarteada



**Fuente:** Elaboración personal

### 3.3.2.- Peso unitario (ASTM E 30 AASHTO T19M-00)

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad aparente de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas. Este método es aplicable para los agregados pétreos de tamaño máximo nominal igual o inferior que 100 mm.

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

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

*Imagen 3.12. Pesando los moldes vacíos para realizar la práctica*



*Fuente: Elaboración personal*

**Imagen 3.13.** Realizando la calibración de los moldes



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.14.** Enrazando los moldes con el agregado de manera suelta y varillada



**Fuente:** Elaboración personal



**Tabla 3.8.** Tabla de datos y resultados del peso unitario suelto (Grava)

<b>Peso unitario suelto</b>					
<b>Muestra N°</b>	<b>Peso recipiente (gr)</b>	<b>Volumen recipiente (cm3)</b>	<b>Peso recip. + muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso unitario suelto (gr/cm3)</b>
1	5310.00	9920.00	20120.00	14810.00	1.493
2	5310.00	9920.00	20155.00	14845.00	1.496
3	5310.00	9920.00	20170.00	14860.00	1.498
				<b>Promedio</b>	<b>1.496</b>

*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 3.9** Tabla de datos y resultados del peso unitario varillado (Grava)

<b>Peso unitario compactado</b>					
<b>Muestra N°</b>	<b>Peso recipiente (gr)</b>	<b>Volumen recipiente (cm3)</b>	<b>Peso recip. + muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso unitario suelto (gr/cm3)</b>
1	5310.00	9920.00	21110.00	15800.00	1.593
2	5310.00	9920.00	21080.00	15770.00	1.590
3	5310.00	9920.00	21130.00	15820.00	1.595
				<b>Promedio</b>	<b>1.592</b>

*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 3.10.** Tabla de datos y resultados del peso unitario suelto (Gravilla)

<b>Peso unitario suelto</b>					
<b>Muestra N°</b>	<b>Peso recipiente (gr)</b>	<b>Volumen recipiente (cm3)</b>	<b>Peso recip. + muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso unitario suelto (gr/cm3)</b>
1	5310.00	9920.00	20020.00	14710.00	1.483
2	5310.00	9920.00	20100.00	14790.00	1.491
3	5310.00	9920.00	20080.00	14770.00	1.489
				<b>Promedio</b>	<b>1.488</b>

*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 3.11.** Tabla de datos y resultados del peso unitario varillado (Gravilla)

<b>Peso unitario compactado</b>					
<b>Muestra N°</b>	<b>Peso recipiente (gr)</b>	<b>Volumen recipiente (cm3)</b>	<b>Peso recip. + muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso unitario suelto (gr/cm3)</b>
1	5310.00	9920.00	20950.00	15640.00	1.577
2	5310.00	9920.00	20980.00	15670.00	1.580
3	5310.00	9920.00	20830.00	15520.00	1.565
<b>Promedio</b>					<b>1.574</b>

*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 3.12.** Tabla de datos y resultados del peso unitario suelto (Arena)

<b>Peso unitario suelto</b>					
<b>Muestra N°</b>	<b>Peso recipiente (gr)</b>	<b>Volumen recipiente (cm3)</b>	<b>Peso recip. + muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso unitario suelto (gr/cm3)</b>
1	2610.10	2990.00	7436.50	4826.40	1.614
2	2610.10	2990.00	7398.10	4788.00	1.601
3	2610.10	2990.00	7390.40	4780.30	1.599
<b>Promedio</b>					<b>1.605</b>

*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 3.13.** Tabla de datos y resultados del peso unitario varillado (Arena)

<b>Peso unitario compactado</b>					
<b>Muestra N°</b>	<b>Peso recipiente (gr)</b>	<b>Volumen recipiente (cm3)</b>	<b>Peso recip. + muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso unitario suelto (gr/cm3)</b>
1	2610.10	2990.00	7897.50	5287.40	1.768
2	2610.10	2990.00	7912.20	5302.10	1.773
3	2610.10	2990.00	7850.60	5240.50	1.753
<b>Promedio</b>					<b>1.765</b>

*Fuente: Elaboración personal*

### **3.3.3.- Granulometría (ASTM E 40 AASHTO T27-99)**

Este ensayo tiene por objeto tamizar y determinar la granulometría de los agregados hasta el tamiz N°200, mediante su división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente. Se realizó 3 ensayos para cada tipo de agregado en este caso para la arena, gravilla y la grava.

**Imagen 3.15.** Juego de tamices ordenado en orden decreciente para granulometría



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.16.** Peso del material para la granulometría en este caso arena



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.17.** *Removiendo manualmente cada tamiz antes de pesarlo con el material*



**Fuente:** *Elaboración personal*

**Imagen 3.18.** *Obtención de los pesos retenidos en cada tamiz (Arena)*



**Fuente:** *Elaboración personal*

**Imagen 3.19.** Obtención de los pesos retenidos en cada tamiz (Gravilla y Grava)



**Fuente:** Elaboración personal

Resultados de la práctica:

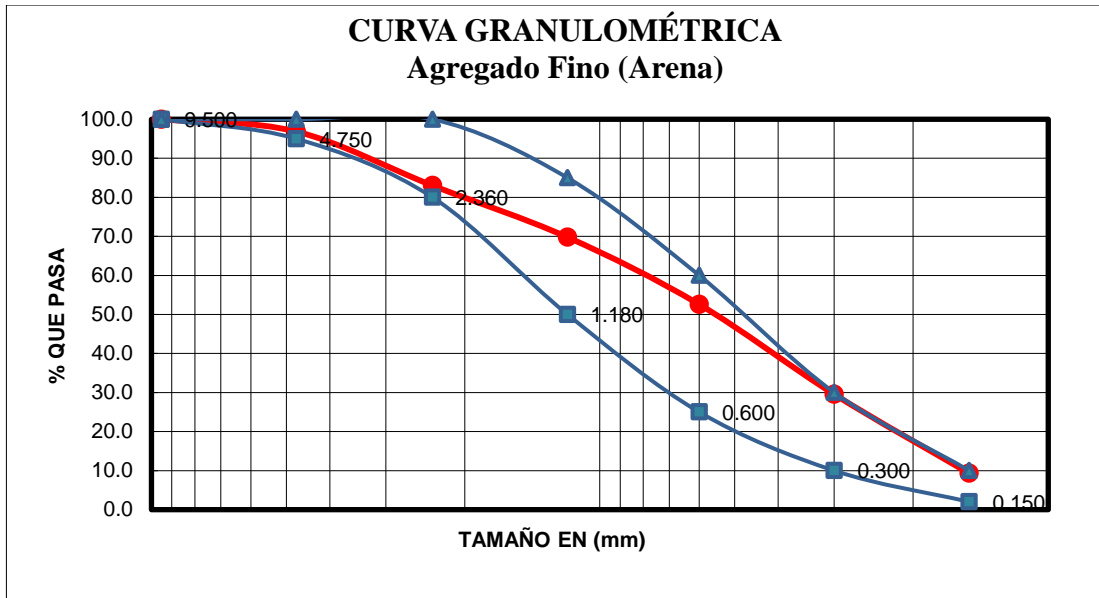
En los resultados de las tablas que se muestran más adelante, solo estará uno de los 3 ensayos realizados para cada agregado, en este caso agregado fino (arena), agregado grueso (gravilla y grava).

**Tabla 3.14.** Tabla de resultados de granulometría del agregado fino (Arena)

Tamices	Peso Total (gr.)		2000		
	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Retenido	% que pasa del total
3/8	9.500	0.00	0.00	0.00	<b>100.0</b>
Nº4	4.750	63.00	63.00	3.15	<b>96.9</b>
Nº8	2.360	276.60	339.60	16.98	<b>83.0</b>
Nº16	1.180	264.80	604.40	30.22	<b>69.8</b>
Nº30	0.600	344.20	948.60	47.43	<b>52.6</b>
Nº50	0.300	460.40	1409.00	70.45	<b>29.6</b>
Nº100	0.150	404.90	1813.90	90.70	<b>9.3</b>
Nº200	0.075	94.20	1908.10	95.41	<b>4.6</b>
Base		91.40	1999.50	99.98	<b>0.0</b>
	Suma=	1999.5			
	Pérdidas=	0.5			
	MF =	<b>2.59</b>			

**Fuente:** Elaboración personal

**Gráfico 3.5. Curva granulométrica del agregado fino (Arena)**



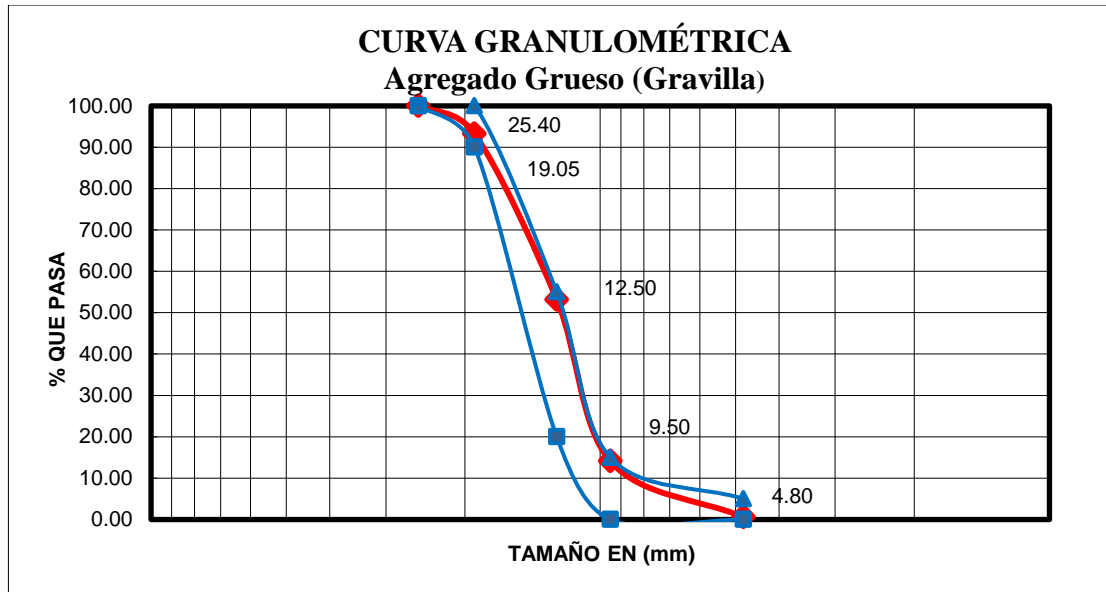
*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 3.15. Tabla de resultados de granulometría del agregado grueso (Gravilla)**

Peso Total (gr.) =			10000		% Que pasa del total
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Retenido Acumulado		
			(gr)	(%)	
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
3/4"	19.05	675.70	675.70	6.76	<b>93.24</b>
1/2"	12.50	4007.50	4683.20	46.83	<b>53.17</b>
3/8	9.50	3905.30	8588.50	85.89	<b>14.12</b>
N°4	4.80	1353.10	9941.60	99.42	<b>0.58</b>
Base	0.00	55.40	9997.00	99.97	<b>0.00</b>
	Suma =	9997.00			
	Pérdidas =	3.00			
	MF =	<b>6.92</b>			
			<b>Tamaño máx. = 3/4"</b>		

*Fuente: Elaboración personal*

**Gráfico 3.6.** Curva granulométrica del agregado grueso (Gravilla)



*Fuente: Elaboración personal*

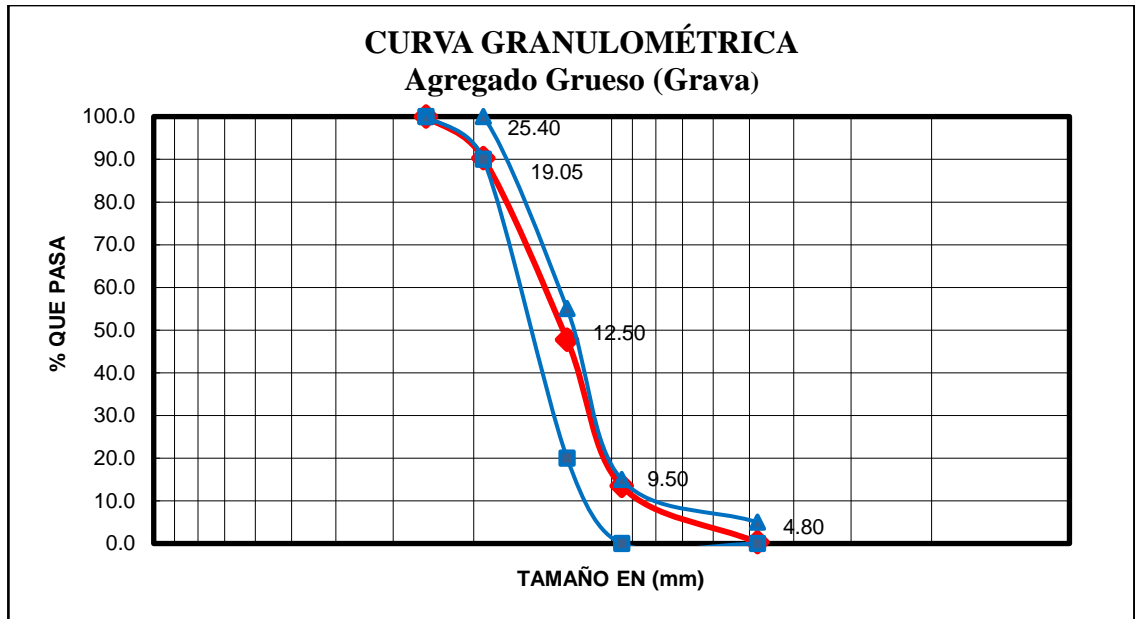
**Tabla 3.16.** Tabla de resultados de granulometría del agregado grueso (Grava)

Peso Total (gr.) =			10000		% Que pasa del total
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Retenido Acumulado		
			(gr)	(%)	
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	<b>100.0</b>
3/4"	19.05	978.10	978.10	9.78	<b>90.2</b>
1/2"	12.50	4251.80	5229.90	52.30	<b>47.7</b>
3/8"	9.50	3422.70	8652.60	86.53	<b>13.5</b>
Nº4	4.80	1318.20	9970.80	99.71	<b>0.3</b>
Base	0	26.40	9997.20	99.97	<b>0.0</b>
Suma =		9997.20			
Pérdidas =		2.80			
MF =		<b>7.48</b>			
			<b>Tamaño máx. = 3/4"</b>		

*Fuente: Elaboración personal*



*Gráfico 3.7. Curva granulométrica del agregado grueso (Grava)*



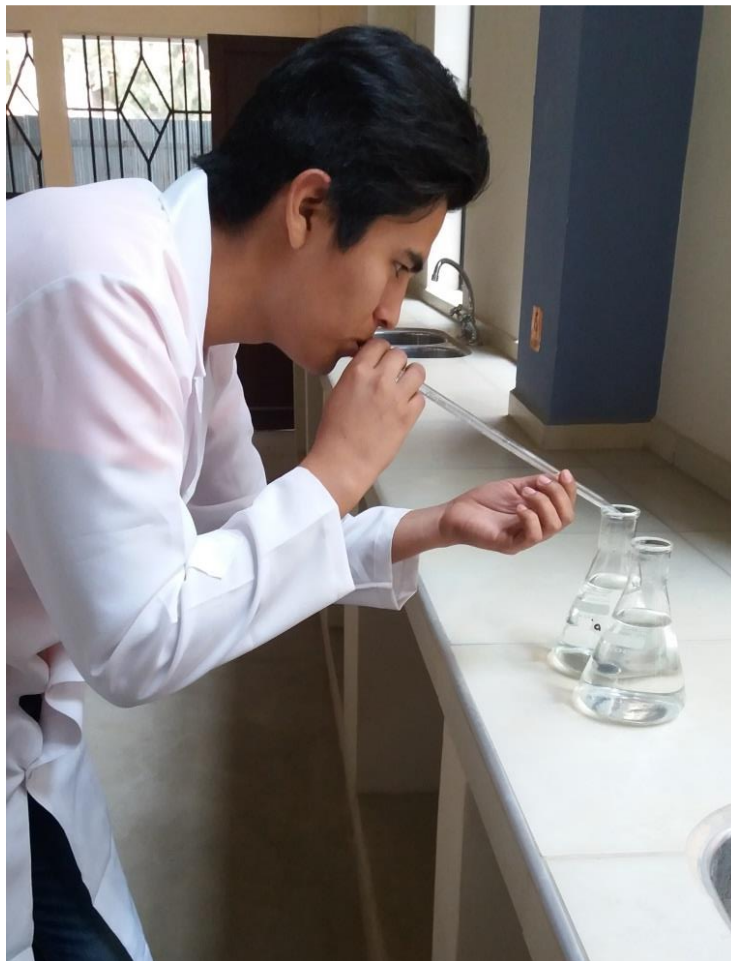
*Fuente: Elaboración personal*

### 3.3.4.- Peso específico

#### 3.3.4.1.- Peso específico del agregado fino (ASTM E 128 AASHTO T84-00)

El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

*Imagen 3.20. Calibración de los matraces a un volumen de 500 ml.*



*Fuente: Elaboración personal*

***Imagen 3.21. Secado superficial con secadora***



***Fuente: Elaboración personal***

***Imagen 3.22. Verificación de la condición de la muestra saturada con superficie seca***



***Fuente: Elaboración personal***

*Imagen 3.23. Muestra en el matraz más el agua hasta la medida calibrada*



*Fuente: Elaboración personal*

*Imagen 3.24. Muestra seca sacada del horno después de 24 horas*



*Fuente: Elaboración personal*

Resultados de la práctica (arena):

**Tabla 3.17.** Tabla de resultados del peso específico del agregado fino (Arena)

Muestra n°	Peso muestra (gr)	Peso matríz (gr)	Muestra + matríz + agua (gr)	Peso agua agregado al matríz "w" (ml) � (gr)	Peso muestra secada "a" (gr)	Vol. del matríz "v" (ml)	p. e. granel (gr/cm3)	p. e. s.s.s. (gr/cm3)	p. e. aparente (gr/cm3)	% de abs
1	500	171.7	968.6	296.90	495.50	500.00	2.44	2.46	2.49	0.90
2	500	195.5	997.1	301.60	494.90	500.00	2.49	2.52	2.56	1.02
3	500	177.2	976.0	298.80	495.30	500.00	2.46	2.49	2.52	0.94
<b>Promedio:</b>							<b>2.47</b>	<b>2.49</b>	<b>2.53</b>	<b>0.95</b>

*Fuente: Elaboración personal*

### 3.3.4.2.- Peso específico del agregado grueso (ASTM E 127 AASHTO T85-91)

El peso específico del agregado es necesario para determinar el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas compactadas. Por definición, el peso específico de un agregado es la relación del peso por unidad de volumen de un material respecto del mismo volumen de agua a aproximadamente 23 C (73,4 F).

Se realizó el ensayo con 3 muestras, cada una de 5 Kg, se siguieron los pasos como se muestra a continuación:

**Imagen 3.25.** Dejando muestra en horno de aproximadamente 5 kg durante 24 horas



*Fuente: Elaboración personal*

**Imagen 3.26.** Dejando la muestra en agua durante 24 horas



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.27.** Secando la muestra externamente para su peso superficialmente seco



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.28.** Colocando la muestra al canastillo para realizar el peso totalmente saturado



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.29.** Pesando la muestra totalmente saturada



**Fuente:** Elaboración personal

Resultados de las prácticas (gravilla y grava):

**Tabla 3.18.** *Tabla de resultados del peso específico del agregado grueso (Gravilla)*

Muestra n°	Peso muestra secada "a" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "b" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "c" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	4929.70	5000.00	3091.60	2.58	2.62	2.68	1.43
2	4925.10	5000.00	3098.90	2.59	2.63	2.70	1.52
3	4919.50	5000.00	3093.10	2.58	2.62	2.69	1.64
<b>Promedio:</b>				<b>2.58</b>	<b>2.62</b>	<b>2.69</b>	<b>1.53</b>

*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 3.19.** *Tabla de resultados del peso específico del agregado grueso (Grava)*

Muestra n°	Peso muestra secada "a" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "b" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "c" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	4922.10	5000.00	3051.60	2.53	2.57	2.63	1.58
2	4918.10	5000.00	3038.90	2.51	2.55	2.62	1.67
3	4913.40	5000.00	3043.10	2.51	2.56	2.63	1.76
<b>Promedio:</b>				<b>2.51</b>	<b>2.56</b>	<b>2.63</b>	<b>1.67</b>

*Fuente: Elaboración personal*

### 3.3.5.- Desgaste de los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99)

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

Debido a las condiciones de esfuerzo deformación, la carga de la rueda de los vehículos de distintas características es transmitida del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del



pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

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

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los ángeles, ASTM E-131 (para agregados menores de 1 1/2”), mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37,5 mm (1 1/2”), por medio de la máquina de los ángeles.

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

**Tabla 3.20.** Tabla de pesos del agregado grueso y N° de esferas para el desgaste de los Ángeles

Método		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
<b>PESO TOTAL</b>		<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>
Numero de esferas		12	11	8	6
N° de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		15	15	15	15

**Fuente:** Norma ASTM E-131

**Imagen 3.30.** Preparación y colocación de la muestra en la máquina de los ángeles con el número de esferas correspondiente de acuerdo a la gradación del material



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.31.** Retiro del material de la máquina de los Ángeles después de las 500 revoluciones



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.32.** Lavado y tamizado del material por el tamiz N°12



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.33.** Pesado del material después del lavado y secado en horno (24 horas)



**Fuente:** Elaboración personal

Datos de la práctica:

Se realizó 3 ensayos de esta práctica, con cada uno de los agregados (gravilla y grava), los cuales pertenecían a los métodos A (grava) y método B (gravilla), en las siguientes tablas solo se mostrará uno de los 3 ensayos para ambos métodos, donde los demás se los mostrará en forma más detallada en los anexos.

**Tabla 3.21.** Tabla de datos del desgaste de los Ángeles (Grava)

Tamiz pasa	Método A	
	Tamiz retenido	Peso retenido
1 1/2"	1"	1250
1"	3/4"	1250
3/4"	1/2"	1250
1/2"	3/8"	1250
	Total	<b>5000</b>

**Fuente:** Elaboración personal

Cálculos de la práctica:

$$\text{Retenido Tamiz N}^\circ 12 = 3863,4$$

$$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{INICIAL} - P_{FINAL}}{P_{FINAL}} * 100 = \frac{5000 - 3863,4}{3863,4} * 100 = 29,42\%$$

**Tabla 3.22.** Tabla de resultados del desgaste de los Ángeles (Grava)

Material	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
A	5000	3863.4	29.42	35% MAX

**Fuente:** Elaboración personal

**Tabla 3.23.** Tabla de datos del desgaste de los Ángeles (Gravilla)

Método B		
Tamiz pasa	Tamiz retenido	Peso retenido
3/4"	1/2"	2500
1/2"	3/8"	2500
	Total	5000

**Fuente:** Elaboración personal

Cálculos de la práctica:

$$\text{Retenido Tamiz N}^\circ 12 = 3863,4$$

$$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{INICIAL} - P_{FINAL}}{P_{FINAL}} * 100 = \frac{5000 - 3874,6}{3874,6} * 100 = 29,05\%$$

**Tabla 3.24.** Tabla de resultados del desgaste de los Ángeles (Gravilla)

Material	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
B	5000	3874.6	29.05	35% MAX

**Fuente:** Elaboración personal

### **3.3.6.- Equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176-00)**

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm). El término “equivalente de arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un periodo de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto de la altura de arcilla, expresada en porcentaje. Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

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.

**Imagen 3.34.** Colocación de la muestra con solución dentro de la probeta



**Fuente:** Elaboración personal

**Imagen 3.35.** Obtención de las lecturas H1 y H2 en la muestra después del ensayo



**Fuente:** Elaboración personal

Cálculo de la práctica:

$$E. A. = \frac{H_1}{H_2} * 100 = \frac{7,60}{9,90} * 100 = 76,77\%$$

Dónde:

E.A.= Equivalente de arena

H1= Altura de la arena

H2= Altura de la arcilla

Resultados de la práctica:

**Tabla 3.25.** *Tabla de datos y resultados de equivalente de arena*

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	7.60	9.90	76.77
2	7.20	10.30	69.90
3	8.10	11.10	72.97
		<b>Promedio</b>	<b>73.21</b>

Equivalente de Arena (%)	Norma
<b>73.21</b>	> 50%

**Fuente:** *Elaboración personal*



### 3.4.- ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

#### 3.4.1.- Viscosidad Saybolt Furol (ASTM D 244 AASHTO T-72)

Nos ayuda a conocer la temperatura en la cual la emulsión es de fácil manejo. En esta prueba se mide el tiempo que tardan en pasar 60 ml de emulsión asfáltica por un orificio de diámetro especificado.

La facilidad con que un fluido fluye a través de un orificio “Furol” es una indicación de su viscosidad, este es el principio sobre el cual está basado el viscosímetro de “Saybolt”, después de que se establece el flujo, la muestra de fluido se coloca en el aparato, a una temperatura específica, se mide el tiempo requerido para recolectar 60 ml del fluido, el tiempo resultante se reporta como la viscosidad del fluido en segundos.

*Imagen 3.36. Preparando el viscosímetro “Saybolt Furol” para la prueba*



*Fuente: Elaboración personal*

**Imagen 3.37.** *Introduciendo la emulsión al orificio “Furol” con tapones en la parte del fondo*



**Fuente:** *Elaboración personal*

**Imagen 3.38.** *Equipo calibrado a una temperatura de 25°C, y dejando correr el tiempo para realizar la prueba*



**Fuente:** *Elaboración personal*

Resultados de la práctica:

**Tabla 3.26.** *Tabla de datos y resultados del ensayo de “Viscosidad Saybolt Furol” de la emulsión “Betumix CMS-2H”*

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	segundos	94	89	<b>92</b>	50	450

*Fuente: Elaboración personal*

#### **3.4.2.- Método del residuo por destilación (ASTM D 6997 AASHTO T 59-97)**

El procedimiento consiste en efectuar la destilación de una muestra de emulsión asfáltica de 200g en peso, el peso de la emulsión se le deberá realizarse con más el equipo destilador, tapa, abrazadera, termómetros, empaquetaduras, entre otros, luego se encienden los quemadores o mecheros en este caso son dos, uno que va sujeto al cuerpo del equipo destilador y el otro en la parte de la base del mismo, con el termómetro se controla muy cuidadosamente la temperatura hasta la temperatura máxima de 260°C y controlando también que la emulsión no forme espuma sobre el bulbo, sin sobrepasar los 260°C de temperatura se debe también controlar el tiempo de destilación que es de aproximadamente de 60 minutos para separar la Emulsión en agua, disolventes y residuo asfáltico.

**Imagen 3.39.** *Pesando el equipo de destilación más los 200 gramos de emulsión*



**Fuente:** *Elaboración personal*

**Imagen 3.40.** *Equipo de destilación armado y en funcionamiento*



**Fuente:** *Elaboración personal*

Resultados de la práctica:

**Tabla 3.27.** *Tabla de datos y resultados del ensayo de destilación de la emulsión asfáltica “Betumix CMS-2H”*

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Residuo de Destilación	(%)	67	69	<b>68</b>	65	-

*Fuente: Elaboración personal*

### **ENSAYOS AL RESIDUO DE DESTILACIÓN:**

#### **3.4.3.- Punto de inflamación (ASTM D 1310-01 AASHTO T79-96)**

Este método cubre la determinación del punto de inflamación, por el ensayo del vaso abierto de Cleveland, de productos de petróleo y otros líquidos, excepto los aceites de combustible y esos materiales que tienen un punto de inflamación de vaso abierto debajo de 79°C (175°F).

- **Punto de destello**

Es la temperatura más baja corregida a una presión barométrica de 101.3 kPa, a la aplicación del fuego (llama), causa el vapor de un espécimen para encender bajo las condiciones especificadas del ensayo.

- **Punto de inflamación**

Es la temperatura más baja a la que un espécimen se mantendrá quemándose durante 5 segundos.

***Imagen 3.41. Muestra en la copa de Cleveland***



***Fuente: Elaboración personal***

***Imagen 3.42. Controlando la temperatura de la emulsión***



***Fuente: Elaboración personal***

Resultados de la práctica:

**Tabla 3.28.** Tabla de datos y resultados del ensayo de punto de inflamación del residuo de la emulsión asfáltica “Betumix CMS-2H”

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación	°C	242	236	<b>239</b>	-	-

*Fuente: Elaboración personal*

#### 3.4.4.- Peso específico (ASTM D71-94 AASHTO T229-97)

La gravedad específica de materiales bituminosos semisólidos, cementos del asfalto, y los alquitranes suaves se expresaran como la relación de la masa de un volumen dado del material a 25°C (77°F) o a 15,6°C (60°F) al que es igual de un volumen de agua a la misma temperatura.

**Imagen 3.43.** Residuo de la emulsión asfáltica más agua destilada para colocarlos en un baño María a 25°C



*Fuente: Elaboración personal*

Resultados de la práctica:

**Tabla 3.29.** Tabla de datos y resultados del ensayo de peso específico del residuo de la emulsión asfáltica

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	36.85	33.80	35.08			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	89.81	86.52	87.55			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	39.82	37.35	38.13			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	89.81	86.51	87.55			
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	<b>0.997</b>	<b>0.994</b>	<b>0.997</b>	<b>0.996</b>	-	-

*Fuente: Elaboración personal*

### 3.4.5.- Penetración (ASTM D5 AASHTO T49-97)

Este método de ensayo cubre la denominación de la penetración de materiales bituminosos semisólidos y sólidos. Los materiales que tienen penetraciones debajo de 350 pueden ser probados por el aparato normal y para materiales que tienen penetraciones entre 350 y 500, se debe usar un aparato especial.

**Imagen 3.44.** Preparando el equipo para realizar el ensayo



*Fuente: Elaboración personal*



*Imagen 3.45. Acomodando la aguja para posteriormente realizar el ensayo*



*Fuente: Elaboración personal*

Resultados de la práctica:

*Tabla 3.30. Tabla de datos y resultados del ensayo de penetración del residuo de la emulsión asfáltica*

Ensayo	Indicación	Unidad	Pruebas			Promedio final	Especificaciones	
			Mínimo	Máximo				
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm)	Lectura N°1	(mm)	87	83	84	86		
	Lectura N°2		84	91	86			
	Lectura N°3		81	89	88		40	90
	Promedio		84	88	86			

*Fuente: Elaboración personal*

### 3.5.- FICHA TÉCNICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA BETUMIX CMS-2H

*Tabla 3.31. Ficha técnica de la emulsión asfáltica "Betumix CMS-2H"*

<b>Características de la emulsión asfáltica "Betumix CMS-2H"</b>				
<b>Ensayo</b>	<b>Método</b>	<b>Unidad</b>	<b>Especificación</b>	<b>Resultados</b>
Viscosidad Saybolt-Furol a 25°C	AASHTO T 72	Seg.	50-450	<b>92</b>
Residuo por destilación a 260°C	AASHTO T 78	% Volumen	65 min.	<b>68</b>
<b>Ensayo sobre el Residuo de Destilación</b>				
Penetración	AASHTO T 49-97	mm	40-90	<b>86</b>
Densidad relativa a 25°C	AASHTO T 229-97	gr/cm3	-	<b>0,996</b>
Punto de inflamación	AASHTO T 79-96	°C	-	<b>239</b>

*Fuente: Stratura asfaltos S.A.*

**CAPÍTULO IV**

**APLICACIÓN PRÁCTICA: DISEÑO,  
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y  
COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

## **CAPÍTULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA; DISEÑO, ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

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

Para analizar la comparación de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, se realizó dosificaciones con el agregado triturado extraído de la chancadora “Garzón”, y con la emulsión asfáltica “Betumix CMS-2H”, para esto se realizaron briquetas para comprobar el óptimo que nos da la bibliografía de emulsiones asfálticas “*Manual de emulsiones asfálticas*” que es de **10,5%** para emulsiones asfálticas de rotura media.

Para comprobar el óptimo brindado por la bibliografía se realizaron los ensayos Marshall, obteniendo un total de 21 briquetas solo para comprobar el óptimo, por el método de tanteo se realizó los ensayos en los siguientes porcentajes 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 11% y 12%, un número de 3 briquetas por cada porcentaje de emulsión mencionados anteriormente.

Luego para realizar los ensayos Marshall más los polímeros, se realizaron un total de 27 briquetas, en los siguientes porcentajes de polímeros 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% y 10%, con un porcentaje de 50% de micro retazos de bolsas de leche y 50% de fibras de botellas de plástico, estos porcentajes de polímeros mencionados anteriormente se los estimo en base a criterios de investigaciones internacionales.

### **4.2.- DOSIFICACIÓN**

#### **4.2.1.- Determinación de proporciones de agregados**

Se requiere de ciertos requisitos en la gradación de los agregados, donde se realizó las dosificaciones de los porcentajes de cada agregado de manera que se pueda cumplir con las especificaciones, la banda granulométrica que se utilizó es de acuerdo con la ASTM D3515 que se detallan en el “*Manual de asfalto del instituto del asfalto*”, a partir de esas especificaciones se juega con los porcentajes de grava, gravilla y arena hasta entrar en medio de las curvas mínimas y máximas normadas, donde se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 30% de grava de  $\frac{3}{4}$ ”.

20% de gravilla de 3/8" y 50% de agregado fino para la granulometría de la mezcla y el resultado fue el siguiente:

*Tabla 4.1. Contenido de agregados en granulometría formada*

Tamices	tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	TOTAL
		Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	Peso Ret. a 5000 gr	al 0.30	al 0.20	al 0.50	Peso Ret. 1.00
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.0	489.05	337.85	0.00	146.72	67.57	0.00	214.29
1/2"	12.5	2125.90	2003.75	0.00	637.77	400.75	0.00	1038.52
3/8"	9.50	1711.35	1952.65	0.00	513.41	390.53	0.00	903.94
Nº4	4.75	659.10	676.55	157.50	197.73	135.31	78.75	411.79
Nº8	2.36	13.20	27.70	691.50	3.96	5.54	345.75	355.25
Nº16	1.18	0.00	0.00	662.00	0.00	0.00	331.00	331.00
Nº30	0.60	0.00	0.00	860.50	0.00	0.00	430.25	430.25
Nº50	0.30	0.00	0.00	1151.00	0.00	0.00	575.50	575.50
Nº100	0.15	0.00	0.00	1012.25	0.00	0.00	506.13	506.13
Nº200	0.075	0.00	0.00	235.50	0.00	0.00	117.75	117.75
BASE	-	0.00	0.00	228.50	0.00	0.00	114.25	114.25
<b>SUMA</b>		4998.6	4998.5	4998.8	1499.58	999.70	2499.38	<b>4998.7</b>
<b>PÉRDIDAS</b>		1.4	1.5	1.3				

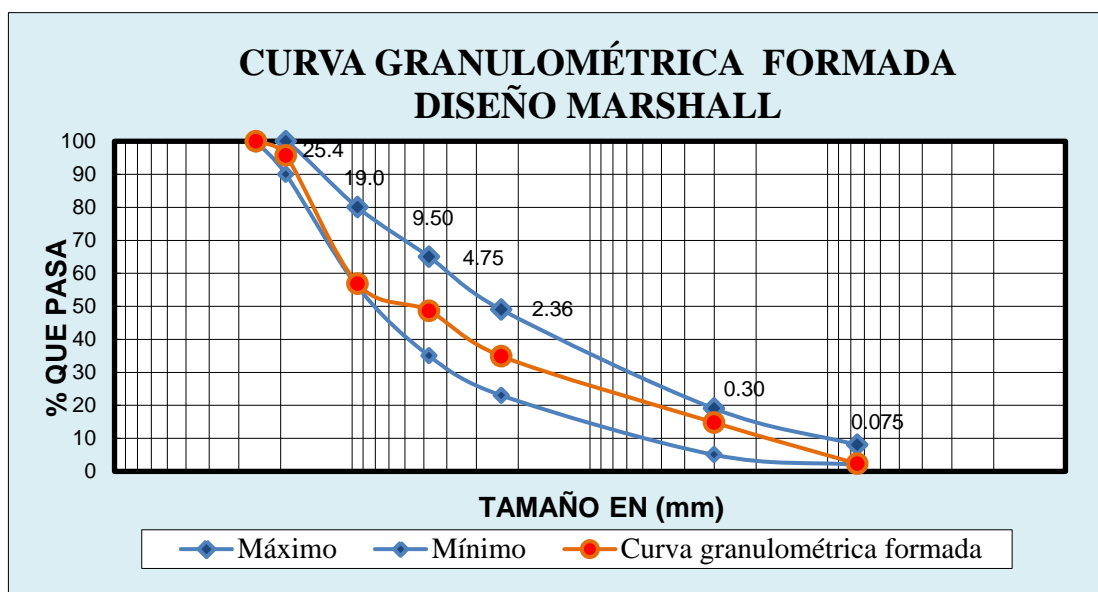
*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 4.2. Granulometría formada**

Tamices	tamaño (mm)	TOTAL				Especif. Instituto del Asfalto	
		Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
		0.00					
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>	100	100
3/4"	19.0	214.29	214.29	4.29	<b>95.71</b>	90	100
1/2"	12.5	1038.52	1252.81	25.06	<b>74.94</b>	-	-
3/8"	9.50	903.94	2156.74	43.15	<b>56.85</b>	56	80
Nº4	4.75	411.79	2568.53	51.38	<b>48.62</b>	35	65
Nº8	2.36	355.25	2923.78	58.49	<b>41.51</b>	23	49
Nº16	1.18	331.00	3254.78	65.11	<b>34.89</b>	-	-
Nº30	0.60	430.25	3685.03	73.72	<b>26.28</b>	-	-
Nº50	0.30	575.50	4260.53	85.23	<b>14.77</b>	5	19
Nº100	0.15	506.13	4766.66	95.36	<b>4.64</b>	-	-
Nº200	0.075	117.75	4884.41	97.71	<b>2.29</b>	2	8
BASE	-	114.25	4998.66	100.00	<b>0.00</b>	-	-
		4998.7					

*Fuente: Elaboración personal*

**Grafico 4.1.- Curva granulométrica formada**



*Fuente: Elaboración personal*

Por lo que se observa en tabla 4.2. y el gráfico 4.1. de la granulometría formada de la combinación realizada, vemos que la combinación establecida de 30% de grava de 3/4", 20% de gravilla de 3/8" y 50% de agregado fino cumplen con las especificaciones establecidas de acuerdo con la ASTM D3515, por lo que se da por aceptado los factores de combinación.

#### 4.2.2.- Determinación de la proporción de emulsión

Ya establecida la combinación granulométrica de los agregados, se procedió a la determinación del contenido óptimo de emulsión, el valor estimativo fue adoptado del "Manual Básico de Emulsiones Asfálticas". A continuación se muestra la determinación de la estimación del contenido óptimo de emulsión para la mezcla asfáltica en frío.

*Gráfico 4.2. Contenido óptimo de emulsión asfáltica*

**6. Consumo teórico de materiais**

A Tabela 28 apresenta o consumo teórico de materiais do serviço de tapa-buraco.

**Tabela 28 – Consumo Teórico de Materiais**

TIPO DE PMF	ABERTO	SEMI-DENSO	DENSO
TIPO DE REVESTIMENTO	BASE	ROLAMENTO	ROLAMENTO
Brita 2 (1"), (litros/m <sup>3</sup> )	200	-	-
Brita 1 (3/4" ou 5/8"), (litros/m <sup>3</sup> )	400	300	200
Pedrisco 3/8" ou 1/4", (litros/m <sup>3</sup> )	400	600	400
Areia de Rio (litros/m <sup>3</sup> )	-	100	-
Pó de Pedra (litros/m <sup>3</sup> )	-	-	400
Emulsão RM-1C, (l/m <sup>3</sup> )	75	105	-
Emulsão RL-1C, (l/m <sup>3</sup> )	-	-	140

**Nota:**  
Baseado em m<sup>3</sup> de massa solta de PMF solta, antes da compactação e cura (como produzida e comprada).  
Considerando, em média, o peso específico da emulsão asfáltica = 1,0 kg/l.

*Fuente: Manual básico de emulsiones asfálticas*

### Valor asumido de la tabla 105 lt/m<sup>3</sup>

Se optó por realizar pruebas a briquetas que estén alrededor de 10,5% de emulsión asfáltica, es decir en los siguientes porcentajes 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 11% y 12%, para comprobar el óptimo de la emulsión como también para conocer el comportamiento de sus propiedades mecánicas, especialmente peso volumétrico, estabilidad y fluencia, haciendo variar 10 lt/m<sup>3</sup> de emulsión por cada grupo de briquetas y haciendo un número de 3 briquetas por cada proporción de emulsión. Se prosiguió a los cálculos teóricos de conversión del valor asumido de 105 lt/m<sup>3</sup> adoptado de “Manual Básico de Emulsiones Asfálticas” para el peso de una briketa de 1200 grs, en la tabla siguiente se muestran los resultados.

*Tabla 4.3. Resultados de contenidos de emulsión*

			Cantidad de emulsión en la mezcla						
Para 1 m <sup>3</sup>	Vol.	Lt	60	70	80	90	100	110	120
Para una briketa de 1200 grs.	Vol.	ml	72	84	96	108	120	132	144
	Peso	gr	72	84	96	108	120	132	144

*Fuente: Elaboración personal*

#### 4.2.3.- Determinación de las cantidades de agregados y de la emulsión

En la tabla siguiente se muestran los resultados que representan las respectivas cantidades de agregados y emulsión necesarias para realizar la producción de la mezcla asfáltica de cada uno de los contenidos de emulsión que contribuirán para la realización de la mezcla asfáltica en frío. El peso de la muestra de emulsión y agregado utilizado para cada uno de los puntos en la mezcla asfáltica, fue calculado de acuerdo al porcentaje en masa de cada uno de estos componentes que se encuentra presente en cada una de las briquetas, teniendo como masa para cada briketa 1200 g.



Tabla de resultados:

**Tabla 4.4.** *Contenido de agregados y emulsión para la mezcla asfáltica convencional*

		Cantidad de emulsión en la mezcla						
Para 1 m <sup>3</sup>	Lt	60	70	80	90	100	110	120
Para 1 briqueta de 1200 grs.	ml	72	84	96	108	120	132	144
Porcentaje de emulsión (%)		6.00%	7.00%	8.00%	9.00%	10.00%	11.00%	12.00%
Porcentaje de agregado (%)		94.00%	93.00%	92.00%	91.00%	90.00%	89.00%	88.00%
Peso de la emulsión (gr)		72.00	84.00	96.00	108.00	120.00	132.00	144.00
Peso de la grava (gr)		338.40	334.80	331.20	327.60	324.00	320.40	316.80
Peso de la gravilla (gr)		225.60	223.20	220.80	218.40	216.00	213.60	211.20
Peso de la arena (gr)		564.00	558.00	552.00	546.00	540.00	534.00	528.00
Peso total de la briqueta (gr)		1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

**Fuente:** *Elaboración personal*

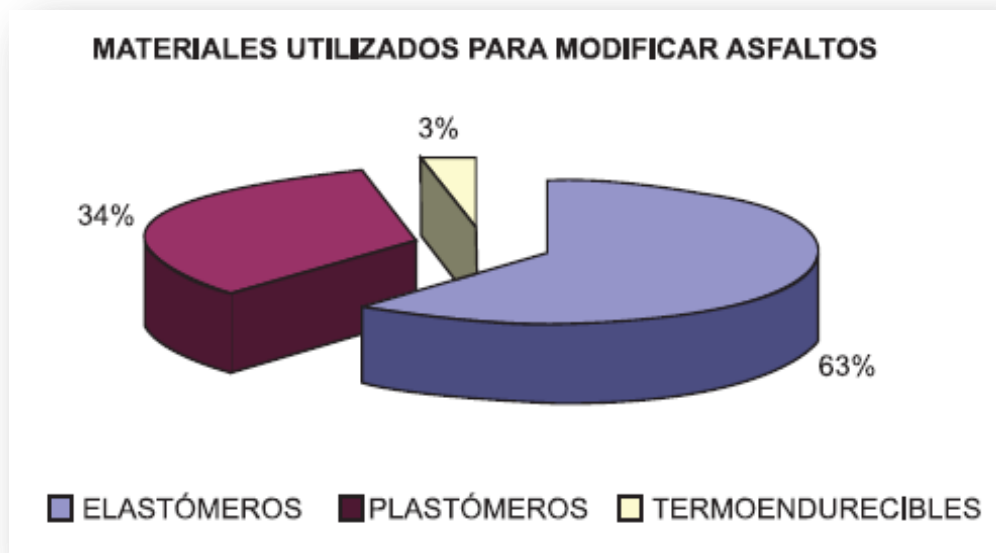
#### 4.2.4.- Determinación de las cantidades de agregados, emulsión y polímeros para mezcla en investigación

En el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando son sometidas a niveles elevados de tránsito y de gradientes de temperatura.

La idea de combinar polímeros en el presente proyecto, es el de comprobar si las mezclas asfálticas en frío, van a mejorar sus propiedades mecánicas, con la inclusión de polímeros en su composición.

Pero la idea es incluir a la mezcla polímeros de distintas características es decir: polímeros *plastómeros*, polímeros *elastómeros*, polímeros *termoendurecibles*, ya que en la mayoría de las investigaciones realizadas en el ámbito nacional e internacional solo fueron estudiadas de manera separada de acuerdo a una sola característica de polímeros.

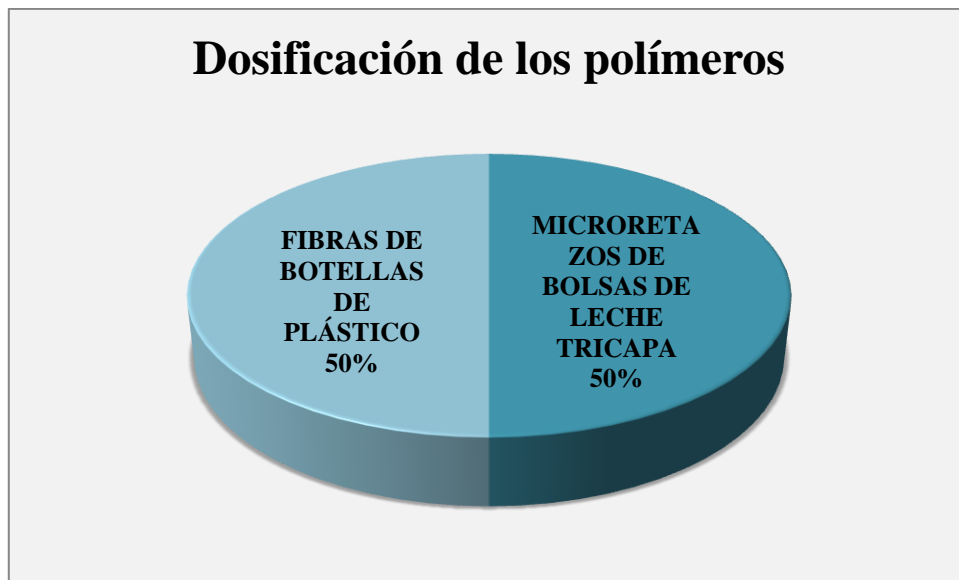
**Gráfico 4.3.** Polímeros utilizados en investigaciones de acuerdo a sus características (Internacional-Colombia)



**Fuente:** Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia (Artículo)

Los porcentajes definidos de los polímeros que se van a adicionar a la mezcla, fueron definidas de acuerdo a distintas investigaciones que se realizaron a los mismos, las bolsas de leche (*elastómero-termoendurecible*) no fueron muy estudiadas por lo que nuestro patrón principal van a ser las botellas de plástico (*plastómero-termoendurecible*), en las investigaciones analizadas el rango de porcentaje donde varía el óptimo de este polímero utilizado fueron del 1% al 4%. Por lo que en el presente proyecto vamos a hacer variar el porcentaje desde el 2% hasta el 10%, en los siguientes puntos: 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% y 10%, en una proporción de 50% de micro retazos de bolsas de leche y 50% de fibras de botellas de plástico las cuales irán incluidas en la emulsión asfáltica.

**Gráfico 4.4.** Gráfico de dosificación de los polímeros utilizados para la mezcla



**Fuente:** Elaboración Personal

Tabla de resultados:

**Tabla 4.5.** *Tabla de datos y resultados para la dosificación de briquetas con polímeros*

Peso total de la briketa (gr.)	Porcentaje de emulsión (%)	Porcentajes de los polímeros (%)								
		2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1200.00	<b>8.80</b>									
Arena (gr.)		547.20	547.20	547.20	547.20	547.20	547.20	547.20	547.20	547.20
Grava (gr.)		328.32	328.32	328.32	328.32	328.32	328.32	328.32	328.32	328.32
Gravilla (gr.)		218.88	218.88	218.88	218.88	218.88	218.88	218.88	218.88	218.88
Emulsión (gr.)		105.60	105.60	105.60	105.60	105.60	105.60	105.60	105.60	105.60
Microretazos de bolsas de leche (gr.)		<b>1.06</b>	<b>1.58</b>	<b>2.11</b>	<b>2.64</b>	<b>3.17</b>	<b>3.70</b>	<b>4.22</b>	<b>4.75</b>	<b>5.28</b>
Fibras de botellas de plástico (gr.)		<b>1.06</b>	<b>1.58</b>	<b>2.11</b>	<b>2.64</b>	<b>3.17</b>	<b>3.70</b>	<b>4.22</b>	<b>4.75</b>	<b>5.28</b>
Peso total briquetas (gr.)		1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

**Fuente:** *Elaboración personal*

**Tabla 4.6.** *Tabla de datos y resultados para la dosificación de polímeros en relación a 50% para bolsas de leche y botellas de plástico para una briketa de 1200 g.*

Porcentaje de los polímeros (%)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Microretazos de bolsas de leche (50%) (gr.)	1.06	1.58	2.11	2.64	3.17	3.70	4.22	4.75	5.28
Fibras de botellas de plástico (50%) (gr.)	1.06	1.58	2.11	2.64	3.17	3.70	4.22	4.75	5.28
Total polímeros (100%) (gr.)	2.11	3.17	4.22	5.28	6.34	7.39	8.45	9.50	10.56

**Fuente:** *Elaboración personal*

Se realizaron 3 briquetas por cada porcentaje de polímeros, es decir en total 27 briquetas para todas las proporciones de polímeros.

Ya establecida las proporciones de cada agregado y las diferentes dosificaciones de emulsión y de polímeros que se utilizarán en la “mezcla asfáltica en frío”, se inicia el mezclado en laboratorio para la realización de las briquetas.

#### 4.3.- PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE MEZCLA

Equipo y materiales utilizados:

- Balanza con precisión de ( $\pm 0,1$  gr.)
- Cuchara para extraer los agregados
- Platos
- Taras
- Hornos
- Frascos
- Moldes para la preparación de las briquetas
- Papel filtro
- Brocha
- Bandeja metálica para la mezcla
- Cuchara para la mezcla
- Termómetro
- Espátula
- Equipo de compactación (martillo Marshall)
- Extractor de probetas
- Guantes
- Barbijo
- Trapos

Procedimiento:

La preparación de las muestras se realizó en el “*laboratorio de asfaltos*” de la **Universidad Autónoma Juan Misael Saracho**, donde se realizaron 7 puntos de contenidos de emulsión que variaron en un valor de 12 ml para cada punto, para ello se ha tomado de base el contenido óptimo de emulsión obtenido del “*Manual Básico de Emulsiones Asfálticas*”, los 12 ml para una briketa de 1200 g equivale a los 10 lt/m<sup>3</sup> mencionados en la determinación de proporción de emulsión.

Primeramente se realizó el pesaje de las cantidades de grava de 3/4”, gravilla de 3/8” y arena mediante una balanza como se muestra en la siguiente imagen, los agregados

estaban en plato para luego introducirlas al horno y ser calentadas a una temperatura de 60°C.

**Imagen 4.1.** *Pesando la cantidad de agregados*

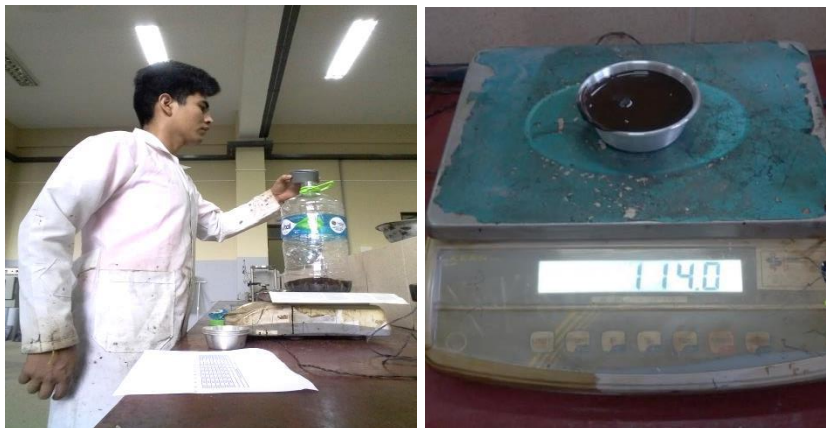


**Fuente:** *Elaboración personal*

Para realizar el trabajo de cada porcentaje de emulsión para la mezcla, según el “Manual de Emulsiones Asfálticas” se debe introducir a la mezcla asfáltica en frío 3% de agua para una emulsión catiónica de rotura media, por lo cual para cada briqueta de acuerdo al porcentaje de emulsión asfáltica se añadió 3% de agua.

Luego se pesó la cantidad de emulsión en una tara como se muestra en la siguiente imagen, para después introducirla al horno y ser calentada a una temperatura de 50°C.

**Imagen 4.2.** *Añadiendo 3% de agua a la emulsión asfáltica y posteriormente pesando la emulsión con agua incluida para la mezcla*



**Fuente:** *Elaboración personal*

Mientras van calentando los agregados y la emulsión, se empezó a preparar los moldes, poniendo la base en el equipo de compactación, luego el molde y el collarín, después con una brocha se empezó a cubrir con aceite el papel filtro, para luego ser introducido en el molde, cuando los agregados ya estén calentados a 60°C y la emulsión a 50°C, entonces se procedió a vaciar los agregados en una bandeja y después la emulsión para realizar la mezcla, una vez que la mezcla este homogénea se procedió a controlar la temperatura de la mezcla, y seguir mezclando, la temperatura de mezclado no debe superar los 60°C, por lo cual se fue muy cuidadoso en este aspecto como se muestra en la imagen.

*Imagen 4.3. Mezclando la mezcla asfáltica y controlando la temperatura*



*Fuente: Elaboración personal*

Posteriormente se empezó a vaciar la mezcla dentro del molde en tres capas dando golpes en cada capa con una espátula para que la mezcla asfáltica esté bien distribuida, luego se procedió a controlar la temperatura de compactación.



**Imagen 4.4.** *Introduciendo al molde la mezcla en 3 capas y controlando la temperatura de compactación*



**Fuente:** *Elaboración personal*

Luego de controlar la temperatura, se introdujo otro papel filtro cubierto con aceite al molde cuando la mezcla estaba completamente vaciada al molde, luego se empezó a asegurar el molde con el equipo de compactación, se colocó el martillo al equipo de compactación, y se procedió al proceso de compactación de 75 golpes por cara, una vez terminado de compactar se retira el molde del equipo de compactación y se le deja enfriar por un tiempo corto, lo suficiente para que los moldes bajen su temperatura, para luego colocarlos en un extractor de probetas, para extraer la briqueta realizada.

**Imagen 4.5.** Compactación y extracción de las briquetas



**Fuente:** Elaboración personal

Posteriormente a la extracción de la briqueta se procede a enumerarla con tiza, el mismo procedimiento se realizó para todas las briquetas, incluso para las briquetas con polímeros. Después que se elaboran las briquetas se procedió a la determinación de las propiedades mecánicas, especialmente peso volumétrico, estabilidad y fluencia, para realizar el análisis del comportamiento de la mezcla compactada.

Para la elaboración de las briquetas con polímeros, los polímeros como los microretazos de bolsas de leche y las fibras de botellas de plástico fueron introducidos a la emulsión asfáltica en distintos porcentajes en peso con referencia al peso del porcentaje de emulsión asfáltica mencionado en la tabla 4.6. Cumpliendo las siguientes características:

Las fibras de botellas de plástico usadas tuvieron que pasar el tamiz N°200, y para ello fueron trituradas en la empresa Capital Industrial ubicada en la carretera a Bermejo Km 8 zona el portillo, la cual consta de las maquinarias

necesarias para la trituración diminuta de cualquier tipo de polímeros, posterior a ello se las tamizó con el objetivo de usar las fibras de botellas de plástico que pasen el tamiz N°200, como se muestra en la imagen.

**Imagen 4.6.** *Fibras extraídas después de la trituración y tamizadas por el tamiz N°200*



**Fuente:** *Elaboración personal*

Mientras que los microretazos de bolsas de leche, fueron recortados de forma manual hasta que las mismas midan un tamaño menor a 0,5 mm, es decir estamos hablando de unidades de micras o micrómetros, ya que no existía algún otro método se las realizó de esta manera dificultosa, en la imagen se muestra los microretazos de bolsas de leche.

**Imagen 4.7.** *Microretazos de bolsas de leche*



**Fuente:** *Elaboración personal*

**Imagen 4.8.** Polímeros pesados para introducir a la emulsión asfáltica



**Fuente:** Elaboración personal

La manera en que se introdujo los polímeros a la emulsión asfáltica fue la siguiente:

Teniendo ya pesados los polímeros y la emulsión asfáltica, con la ayuda de otro recipiente metálico se procedió al mezclado en tres capas, primero se introdujo un tercio de la emulsión al recipiente, inmediatamente se vació los microretazos de bolsas de leche y con la ayuda de una varilla se removió constantemente, luego se introdujo otro tercio de emulsión e inmediatamente se vació las fibras de botellas de plástico mientras que con la varilla se siguió removiendo, para luego introducir el último tercio de emulsión asfáltica y seguir removiendo, como se muestra en la imagen siguiente.

Luego llevamos el recipiente con la emulsión asfáltica más los polímeros sin dejar de remover a la cocina para ser calentado tomando en cuenta que la temperatura no pase los 70°C siendo cautelosos con este aspecto aunque el “Manual de Emulsiones Asfálticas” nos indica que podemos calentar la emulsión hasta los 75°C como máximo, realizamos este procedimiento por el tiempo que sea necesario para que la emulsión quede fusionada con los polímeros, para inmediatamente vaciar a los agregados.

**Imagen 4.9.** Preparación de polímeros más la emulsión



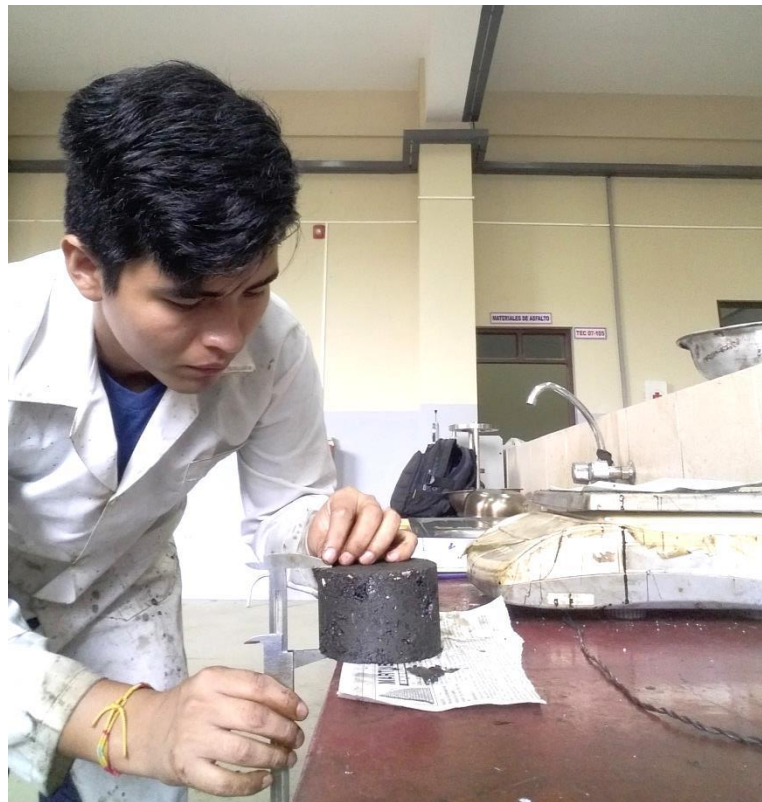
**Fuente:** Elaboración personal

Posteriormente se realizó el mismo procedimiento que con la mezcla asfáltica convencional, lo único que varió para la preparación de este tipo de mezcla fue la preparación de la emulsión asfáltica más los polímeros para fusionarlos o adherirlos, como se mencionó anteriormente.

#### **Determinación del peso volumétrico:**

Primeramente se realizó el marcado de las briquetas en cuatro puntos, el marcado se hizo mediante una regla y tiza, luego con vernier se procedió a medir y registrar las cuatro alturas, al igual que se midió y se registró los dos diámetros en las dos direcciones, luego se determinó el peso de las briquetas a través de una balanza.

*Imagen 4.10. Midiendo las alturas y diámetros de las briquetas*



*Fuente: Elaboración personal*

También se realizaron los pesos de las briquetas, como ser peso parcialmente saturado y el peso totalmente saturado. Dejando a las briquetas sumergidas durante un periodo de 10 minutos a una temperatura de 25°C. Para luego con un paño secarlas superficialmente y pesarlas de inmediato.

***Imagen 4.11. Briquetas sumergidas en agua a 25°C***



***Fuente: Elaboración personal***

***Imagen 4.12. Secando superficialmente las briquetas***

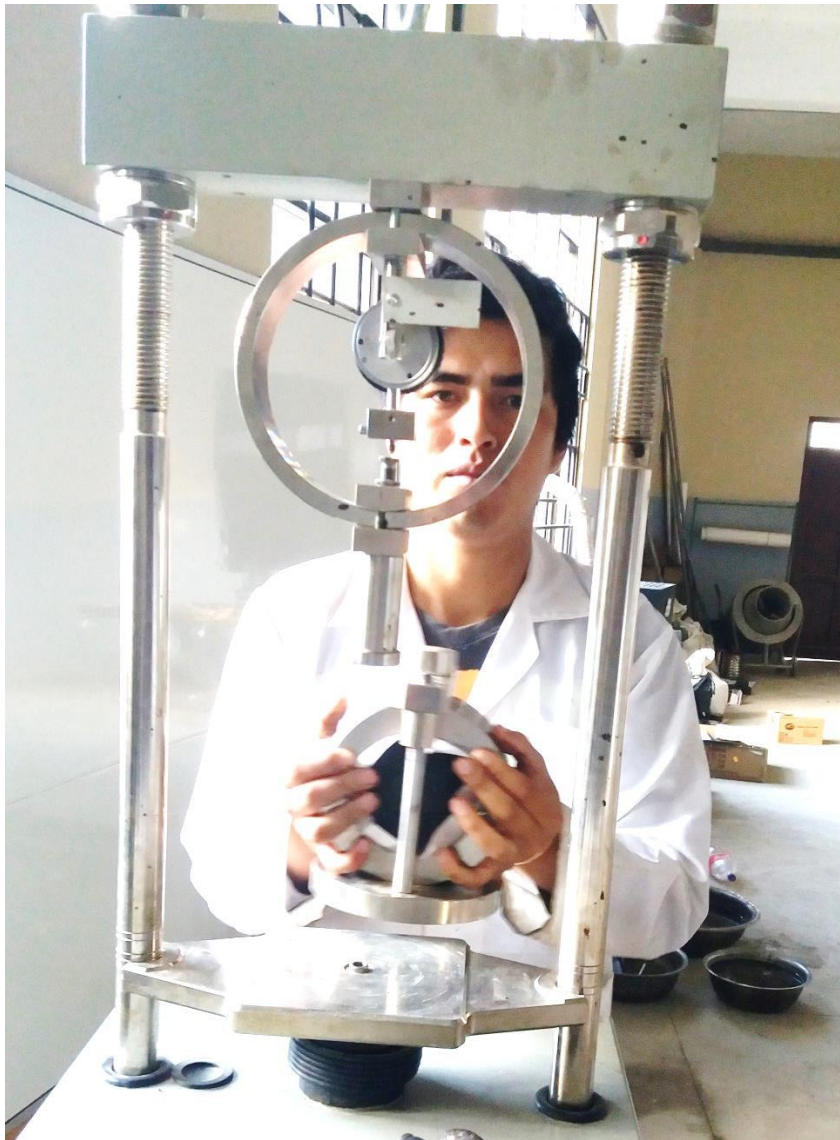


***Fuente: Elaboración personal***

**Determinación de la estabilidad y fluencia:**

Primeramente se realizó la medición de las alturas en cuatro puntos de la briqueta con un vernier para determinar su altura media, luego se dejó por 60 minutos las briquetas sumergidas en agua a una temperatura de 21,5°C, luego se limpió las superficies interiores de las mordazas, posteriormente se coloca la briqueta en las mordazas y se aplica la carga hasta que se produce la rotura de la briqueta, se lee y anota las lecturas de estabilidad y fluencia.

*Imagen 4.13. Colocación de la mordaza con la briqueta al aparato de Marshall*



*Fuente: Elaboración personal*

*Imagen 4.14. Leyendo la “Estabilidad y Fluencia” en el momento de la ruptura*



*Fuente: Elaboración personal*

#### **4.4.- EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS**

##### **4.4.1.- Evaluación del peso volumétrico**

Se hizo siete grupos de briquetas por cada contenido de emulsión, haciendo 3 briquetas por punto de emulsión, esto con la mezcla asfáltica convencional. Para la identificación de las briquetas de peso volumétrico se las enumero como: 1, 2, 3 para (6%), 4, 5, 6 para (7%), 7, 8, 9 para (8%), 10, 11, 12 para (9%), 13, 14, 15 para (10%), 16, 17, 18 para (11%) y 19, 20, 21 para (12%). Se desarrolla el cálculo paso a paso para un mejor entendimiento de la evaluación del peso volumétrico para un contenido de emulsión de (10,5%).



De la misma manera para la identificación de las briquetas con polímeros se las enumero de la siguiente manera: 1, 2 y 3 (2%); 4, 5 y 6 (3%); 7, 8 y 9 (4%); 10, 11 y 12 (5%); 13,14 y 15 (6%); 16, 17 y 18 (7%); 19, 20 y 21 (8%); 22, 23 y 24 (9%); 25, 26 y 27 (10%) todas las briquetas mencionadas anteriormente según su porcentaje de polímeros añadidos a la emulsión asfáltica, se las trabajo con un porcentaje de emulsión de 8,80%, que vendría a ser el óptimo analizado y calculado con las briquetas convencionales y no así los 10,5% proporcionado por el “*Manual Básico de Emulsiones Asfálticas*” y confirmado en la práctica que no coincide con el contenido óptimo de emulsión asfáltica proporcionado por este manual, pero nos sirvió de gran ayuda para estimar el óptimo de 8,80%.

- **Altura de las briquetas**

Se midieron las alturas de cada biqueta en cuatro puntos, después de haber procedido al marcado de las briquetas con una tiza, sus alturas correspondientes son las siguientes:

*Tabla 4.7. Datos y resultados de las alturas promedio de las briquetas con polímeros*

<b>Polímeros</b>	<b>N°</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h promedio</b>
<b>2.00%</b>	1	6.75	6.74	6.83	6.81	<b>6.78</b>
	2	6.72	6.74	6.79	6.82	<b>6.77</b>
	3	6.55	6.58	6.63	6.61	<b>6.59</b>
<b>3.00%</b>	4	6.71	6.67	6.73	6.75	<b>6.72</b>
	5	6.74	6.66	6.62	6.80	<b>6.71</b>
	6	6.61	6.55	6.63	6.62	<b>6.60</b>
<b>4.00%</b>	7	6.78	6.66	6.53	6.68	<b>6.66</b>
	8	6.69	6.72	6.80	6.67	<b>6.72</b>
	9	6.67	6.71	6.75	6.81	<b>6.74</b>
<b>5.00%</b>	10	6.62	6.66	6.64	6.69	<b>6.65</b>
	11	6.68	6.65	6.75	6.71	<b>6.70</b>
	12	6.69	6.63	6.72	6.64	<b>6.67</b>
<b>6.00%</b>	13	6.65	6.68	6.69	6.71	<b>6.68</b>
	14	6.58	6.65	6.71	6.64	<b>6.65</b>
	15	6.49	6.58	6.56	6.71	<b>6.59</b>
<b>7.00%</b>	16	6.48	6.56	6.61	6.69	<b>6.59</b>
	17	6.51	6.47	6.67	6.65	<b>6.58</b>
	18	6.48	6.52	6.55	6.60	<b>6.54</b>
<b>8.00%</b>	19	6.51	6.48	6.55	6.56	<b>6.53</b>
	20	6.54	6.51	6.48	6.57	<b>6.53</b>
	21	6.52	6.55	6.57	6.61	<b>6.56</b>
<b>9.00%</b>	22	6.55	6.58	6.58	6.60	<b>6.58</b>
	23	6.51	6.53	6.60	6.59	<b>6.56</b>
	24	6.54	6.57	6.60	6.58	<b>6.57</b>
<b>10.00%</b>	25	6.56	6.55	6.61	6.64	<b>6.59</b>
	26	6.52	6.57	6.53	6.59	<b>6.55</b>
	27	6.57	6.59	6.59	6.62	<b>6.59</b>

*Fuente: Elaboración personal*

*Tabla 4.8. Datos y resultados de las alturas promedio de las briquetas convencionales*

(% Emulsión)	Briqueta N°	Briquetas convencionales				
		h1	h2	h3	h4	h promedio
6%	1	6.75	6.78	6.80	6.71	6.76
	2	6.81	6.75	6.76	6.78	6.78
	3	6.73	6.79	6.81	6.83	6.79
7%	4	6.72	6.76	6.81	6.80	6.77
	5	6.81	6.81	6.71	6.79	6.78
	6	6.76	6.77	6.81	6.82	6.79
8%	7	6.83	6.92	6.93	6.71	6.85
	8	6.74	6.75	6.72	6.71	6.73
	9	6.65	6.75	6.81	6.75	6.74
9%	10	6.71	6.72	6.76	6.75	6.74
	11	6.71	6.72	6.69	6.71	6.71
	12	6.72	6.73	6.71	6.75	6.73
10%	13	6.79	6.76	6.75	6.82	6.78
	14	6.81	6.85	6.75	6.76	6.79
	15	6.75	6.82	6.84	6.79	6.80
11%	16	6.71	6.80	6.75	6.86	6.78
	17	6.55	6.63	6.67	6.68	6.63
	18	6.71	6.69	6.75	6.67	6.71
12%	19	6.74	6.75	6.77	6.78	6.76
	20	6.73	6.71	6.76	6.75	6.74
	21	6.70	6.72	6.75	6.78	6.74

*Fuente: Elaboración personal*

- **Diámetro de las briquetas**

Se midieron los diámetros de cada briketa en dos direcciones, después de haber procedido al marcado de las briquetas con una tiza, sus diámetros correspondientes son los siguientes:

*Tabla 4.9. Datos y resultados de los diámetros promedio de las briquetas con polímeros*

<b>Polímeros</b>	<b>N°</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D promedio</b>
<b>2.00%</b>	1	10.14	10.13	<b>10.14</b>
	2	10.12	10.14	<b>10.13</b>
	3	10.13	10.16	<b>10.15</b>
<b>3.00%</b>	4	10.12	10.14	<b>10.13</b>
	5	10.12	10.14	<b>10.13</b>
	6	10.13	10.15	<b>10.14</b>
<b>4.00%</b>	7	10.14	10.15	<b>10.15</b>
	8	10.13	10.15	<b>10.14</b>
	9	10.14	10.15	<b>10.15</b>
<b>5.00%</b>	10	10.14	10.16	<b>10.15</b>
	11	10.16	10.13	<b>10.15</b>
	12	10.13	10.15	<b>10.14</b>
<b>6.00%</b>	13	10.13	10.15	<b>10.14</b>
	14	10.16	10.12	<b>10.14</b>
	15	10.15	10.13	<b>10.14</b>
<b>7.00%</b>	16	10.14	10.14	<b>10.14</b>
	17	10.15	10.14	<b>10.15</b>
	18	10.14	10.14	<b>10.14</b>
<b>8.00%</b>	19	10.12	10.16	<b>10.14</b>
	20	10.14	10.15	<b>10.15</b>
	21	10.14	10.15	<b>10.15</b>
<b>9.00%</b>	22	10.14	10.15	<b>10.15</b>
	23	10.15	10.13	<b>10.14</b>
	24	10.15	10.13	<b>10.14</b>
<b>10.00%</b>	25	10.14	10.15	<b>10.15</b>
	26	10.12	10.16	<b>10.14</b>
	27	10.13	10.15	<b>10.14</b>

*Fuente: Elaboración personal*

*Tabla 4.10. Datos y resultados de los diámetros promedio de las briquetas convencionales*

(% Emulsión)	Briqueta N°	Briquetas convencionales		
		D1	D2	D promedio
6%	1	10.15	10.15	10.15
	2	10.14	10.15	10.15
	3	10.15	10.14	10.15
7%	4	10.15	10.14	10.15
	5	10.15	10.15	10.15
	6	10.14	10.15	10.15
8%	7	10.14	10.16	10.15
	8	10.17	10.13	10.15
	9	10.15	10.14	10.15
9%	10	10.15	10.13	10.14
	11	10.15	10.12	10.14
	12	10.15	10.12	10.14
10%	13	10.14	10.12	10.13
	14	10.16	10.15	10.16
	15	10.14	10.14	10.14
11%	16	10.15	10.14	10.15
	17	10.14	10.13	10.14
	18	10.14	10.16	10.15
12%	19	10.15	10.14	10.15
	20	10.15	10.14	10.15
	21	10.14	10.14	10.14

*Fuente: Elaboración personal*

- **Volúmenes de las briquetas**

Teniendo los resultados de los diámetros promedio y de las alturas promedio, se utiliza la ecuación para determinar el volumen de la briketa.

$$V = \left( \frac{\pi * D^2}{4} \right) * H$$

Dónde:

V= Volumen de la briketa (cm3)

D= Diámetro promedio de la briketa (cm)

H= Altura promedio de la briketa (cm)

*Tabla 4.11. Datos y resultados de los volúmenes calculados de las briquetas con polímeros*

Polímeros	N°	D promedio (cm)	h promedio (cm)	Volumen (cm3)
2.00%	1	10.14	6.78	547.18
	2	10.13	6.77	545.43
	3	10.15	6.59	532.90
3.00%	4	10.13	6.72	541.20
	5	10.13	6.71	540.39
	6	10.14	6.60	533.18
4.00%	7	10.15	6.66	538.56
	8	10.14	6.72	542.67
	9	10.15	6.74	544.42
5.00%	10	10.15	6.65	538.28
	11	10.15	6.70	541.39
	12	10.14	6.67	538.63
6.00%	13	10.14	6.68	539.64
	14	10.14	6.65	536.61
	15	10.14	6.59	531.77
7.00%	16	10.14	6.59	531.77
	17	10.15	6.58	531.48
	18	10.14	6.54	527.93
8.00%	19	10.14	6.53	526.92
	20	10.15	6.53	527.44
	21	10.15	6.56	530.47
9.00%	22	10.15	6.58	531.69
	23	10.14	6.56	529.55
	24	10.14	6.57	530.76
10.00%	25	10.15	6.59	532.70
	26	10.14	6.55	529.14
	27	10.14	6.59	532.37

*Fuente: Elaboración personal*

*Tabla 4.12. Datos y resultados de los volúmenes calculados de las briquetas convencionales*

(% Emulsión)	Briqueta N°	Briquetas convencionales		
		D promedio (cm)	h promedio (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
6%	1	10.15	6.76	546.98
	2	10.15	6.78	547.65
	3	10.15	6.79	548.86
7%	4	10.15	6.77	547.45
	5	10.15	6.78	548.60
	6	10.15	6.79	548.86
8%	7	10.15	6.85	554.06
	8	10.15	6.73	544.55
	9	10.15	6.74	544.82
9%	10	10.14	6.74	543.88
	11	10.14	6.71	541.13
	12	10.14	6.73	542.74
10%	13	10.13	6.78	546.44
	14	10.16	6.79	550.15
	15	10.14	6.80	549.13
11%	16	10.15	6.78	548.06
	17	10.14	6.63	535.08
	18	10.15	6.71	542.53
12%	19	10.15	6.76	546.44
	20	10.15	6.74	544.62
	21	10.14	6.74	544.08

*Fuente: Elaboración personal*

- **Peso de las briquetas**

Una vez que se identificó o enumeró cada briketa, se procedió a pesar cada una de ellas, en la tabla siguiente se muestran los datos de los pesos obtenidos de cada briketa.

*Tabla 4.13. Datos de peso seco de cada briketa con polímeros*

<b>Polímeros</b>	<b>N°</b>	<b>P seco</b>
<b>2.00%</b>	1	<b>1159.80</b>
	2	<b>1150.90</b>
	3	<b>1136.80</b>
<b>3.00%</b>	4	<b>1154.90</b>
	5	<b>1132.80</b>
	6	<b>1148.40</b>
<b>4.00%</b>	7	<b>1162.40</b>
	8	<b>1153.70</b>
	9	<b>1151.50</b>
<b>5.00%</b>	10	<b>1148.10</b>
	11	<b>1155.30</b>
	12	<b>1157.20</b>
<b>6.00%</b>	13	<b>1157.80</b>
	14	<b>1153.90</b>
	15	<b>1153.70</b>
<b>7.00%</b>	16	<b>1159.30</b>
	17	<b>1150.60</b>
	18	<b>1148.70</b>
<b>8.00%</b>	19	<b>1155.80</b>
	20	<b>1158.30</b>
	21	<b>1146.90</b>
<b>9.00%</b>	22	<b>1155.30</b>
	23	<b>1159.40</b>
	24	<b>1167.20</b>
<b>10.00%</b>	25	<b>1159.40</b>
	26	<b>1166.30</b>
	27	<b>1167.70</b>

*Fuente: Elaboración personal*



*Tabla 4.14. Datos de peso seco de cada briqueta convencional*

(%) Emulsión	Briqueta N°	Briquetas convencionales
		Peso seco (gr)
6%	1	1151.20
	2	1145.60
	3	1151.90
7%	4	1163.90
	5	1149.30
	6	1153.10
8%	7	1169.50
	8	1149.10
	9	1152.80
9%	10	1144.90
	11	1150.40
	12	1153.10
10%	13	1168.60
	14	1167.90
	15	1163.90
11%	16	1171.20
	17	1140.80
	18	1149.80
12%	19	1158.60
	20	1161.10
	21	1163.10

*Fuente: Elaboración personal*

- **Peso volumétrico**

Para la determinación de esta propiedad mecánica es necesaria una ecuación, y se debe tener los resultados de pesos y volúmenes de cada briqueta, como se muestra en la siguiente tabla.

*Tabla 4.15. Datos de pesos y volúmenes de cada briqueta con porcentajes de polímeros*

Polímeros	Nº	P seco	Volumen (cm3)
2.00%	1	1159.80	547.18
	2	1150.90	545.43
	3	1136.80	532.90
3.00%	4	1154.90	541.20
	5	1132.80	540.39
	6	1148.40	533.18
4.00%	7	1162.40	538.56
	8	1153.70	542.67
	9	1151.50	544.42
5.00%	10	1148.10	538.28
	11	1155.30	541.39
	12	1157.20	538.63
6.00%	13	1157.80	539.64
	14	1153.90	536.61
	15	1153.70	531.77
7.00%	16	1159.30	531.77
	17	1150.60	531.48
	18	1148.70	527.93
8.00%	19	1155.80	526.92
	20	1158.30	527.44
	21	1146.90	530.47
9.00%	22	1155.30	531.69
	23	1159.40	529.55
	24	1167.20	530.76
10.00%	25	1159.40	532.70
	26	1166.30	529.14
	27	1167.70	532.37

*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 4.16.** Datos de pesos y volúmenes de cada briqueta convencional

(%) Emulsión	Briqueta N°	Briquetas convencionales	
		Peso seco	Volumen
6%	1	1151.20	546.98
	2	1145.60	547.65
	3	1151.90	548.86
7%	4	1163.90	547.45
	5	1149.30	548.60
	6	1153.10	548.86
8%	7	1169.50	554.06
	8	1149.10	544.55
	9	1152.80	544.82
9%	10	1144.90	543.88
	11	1150.40	541.13
	12	1153.10	542.74
10%	13	1168.60	546.44
	14	1167.90	550.15
	15	1163.90	549.13
11%	16	1171.20	548.06
	17	1140.80	535.08
	18	1149.80	542.53
12%	19	1158.60	546.44
	20	1161.10	544.62
	21	1163.10	544.08

*Fuente: Elaboración personal*

Cálculos:

$$\text{Peso volumétrico} = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}}$$

*Tabla 4.17. Resultados de peso volumétrico de cada briqueta con polímeros*

Polímeros	N°	P seco (gr.)	Volumen (cm3)	Peso Volumétrico (gr/cm3)
2.00%	1	1159.80	547.18	2.12
	2	1150.90	545.43	2.11
	3	1136.80	532.90	2.13
3.00%	4	1154.90	541.20	2.13
	5	1132.80	540.39	2.10
	6	1148.40	533.18	2.15
4.00%	7	1162.40	538.56	2.16
	8	1153.70	542.67	2.13
	9	1151.50	544.42	2.12
5.00%	10	1148.10	538.28	2.13
	11	1155.30	541.39	2.13
	12	1157.20	538.63	2.15
6.00%	13	1157.80	539.64	2.15
	14	1153.90	536.61	2.15
	15	1153.70	531.77	2.17
7.00%	16	1159.30	531.77	2.18
	17	1150.60	531.48	2.16
	18	1148.70	527.93	2.18
8.00%	19	1155.80	526.92	2.19
	20	1158.30	527.44	2.20
	21	1146.90	530.47	2.16
9.00%	21	1155.30	531.69	2.17
	21	1159.40	529.55	2.19
	21	1167.20	530.76	2.20
10.00%	21	1159.40	532.70	2.18
	21	1166.30	529.14	2.20
	21	1167.70	532.37	2.19

*Fuente: Elaboración personal*

*Tabla 4.18. Resultados de peso volumétrico de cada briqueta convencional*

(%) Emulsión	Briqueta N°	Briquetas convencionales		
		Pseco (gr.)	Volumen (cm3)	Peso Volumétrico (gr/cm3)
6%	1	1151.20	546.98	2.10
	2	1145.60	547.65	2.09
	3	1151.90	548.86	2.10
7%	4	1163.90	547.45	2.13
	5	1149.30	548.60	2.09
	6	1153.10	548.86	2.10
8%	7	1169.50	554.06	2.11
	8	1149.10	544.55	2.11
	9	1152.80	544.82	2.12
9%	10	1144.90	543.88	2.11
	11	1150.40	541.13	2.13
	12	1153.10	542.74	2.12
10%	13	1168.60	546.44	2.14
	14	1167.90	550.15	2.12
	15	1163.90	549.13	2.12
11%	16	1171.20	548.06	2.14
	17	1140.80	535.08	2.13
	18	1149.80	542.53	2.12
12%	19	1158.60	546.44	2.12
	20	1161.10	544.62	2.13
	21	1163.10	544.08	2.14

*Fuente: Elaboración personal*

Una vez teniendo los resultados de pesos volumétricos de todas las briquetas para cada contenido de emulsión y para cada contenido de polímeros, se procede a calcular el promedio de esos resultados.

Cálculos:

$$Peso\ vol_{\cdot PROMEDIO} = \frac{Peso\ vol_{.1} + Peso\ vol_{.2} + Peso\ vol_{.3} + \dots + Peso\ vol_{.n}}{n}$$

El mismo procedimiento se realiza para todos los contenidos de emulsión, cada grupo de briquetas enumeradas tiene su respectiva cantidad de emulsión, a continuación se muestran los resultados de peso volumétrico de los distintos contenidos de emulsión convencional, como también se muestran los resultados de los pesos volumétricos de las mezclas con polímeros al óptimo de emulsión encontrado.

- **Resultados de peso volumétrico**

En la tabla siguiente se añadió el % de emulsión, que es el contenido de emulsión expresado en porcentaje, ya se hizo mención de esto en la tabla 4.4. de estos contenidos de agregados y de emulsión.

También en la tabla 4.5. se hizo mención de los contenidos de agregados, emulsión y polímeros para las briquetas con polímeros.

*Tabla 4.19. Resultados de peso volumétrico promedio de cada briqueta con porcentajes de polímeros*

<b>Polímeros</b>	<b>N°</b>	<b>P seco (gr.)</b>	<b>Volumen (cm3)</b>	<b>Peso Volumétrico (gr/cm3)</b>	<b>Peso Volumétrico Promedio (gr/cm3)</b>
<b>2.00%</b>	1	1159.80	547.18	2.12	<b>2.121</b>
	2	1150.90	545.43	2.11	
	3	1136.80	532.90	2.13	
<b>3.00%</b>	4	1154.90	541.20	2.13	<b>2.128</b>
	5	1132.80	540.39	2.10	
	6	1148.40	533.18	2.15	
<b>4.00%</b>	7	1162.40	538.56	2.16	<b>2.133</b>
	8	1153.70	542.67	2.13	
	9	1151.50	544.42	2.12	
<b>5.00%</b>	10	1148.10	538.28	2.13	<b>2.138</b>
	11	1155.30	541.39	2.13	
	12	1157.20	538.63	2.15	
<b>6.00%</b>	13	1157.80	539.64	2.15	<b>2.155</b>
	14	1153.90	536.61	2.15	
	15	1153.70	531.77	2.17	
<b>7.00%</b>	16	1159.30	531.77	2.18	<b>2.174</b>
	17	1150.60	531.48	2.16	
	18	1148.70	527.93	2.18	
<b>8.00%</b>	19	1155.80	526.92	2.19	<b>2.184</b>
	20	1158.30	527.44	2.20	
	21	1146.90	530.47	2.16	
<b>9.00%</b>	22	1155.30	531.69	2.17	<b>2.187</b>
	23	1159.40	529.55	2.19	
	24	1167.20	530.76	2.20	
<b>10.00%</b>	25	1159.40	532.70	2.18	<b>2.191</b>
	26	1166.30	529.14	2.20	
	27	1167.70	532.37	2.19	

*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 4.20. Resultados de peso volumétrico promedio de cada briqueta convencional**

(% Emulsión	Briqueta N°	Briquetas convencionales			
		Pseco (gr.)	Volumen (cm3)	Peso Volumétrico (gr/cm3)	Peso Volumétrico Promedio (gr/cm3)
6%	1	1151.20	546.98	2.10	2.098
	2	1145.60	547.65	2.09	
	3	1151.90	548.86	2.10	
7%	4	1163.90	547.45	2.13	2.107
	5	1149.30	548.60	2.09	
	6	1153.10	548.86	2.10	
8%	7	1169.50	554.06	2.11	2.112
	8	1149.10	544.55	2.11	
	9	1152.80	544.82	2.12	
9%	10	1144.90	543.88	2.11	2.119
	11	1150.40	541.13	2.13	
	12	1153.10	542.74	2.12	
10%	13	1168.60	546.44	2.14	2.127
	14	1167.90	550.15	2.12	
	15	1163.90	549.13	2.12	
11%	16	1171.20	548.06	2.14	2.129
	17	1140.80	535.08	2.13	
	18	1149.80	542.53	2.12	
12%	19	1158.60	546.44	2.12	2.130
	20	1161.10	544.62	2.13	
	21	1163.10	544.08	2.14	

*Fuente: Elaboración personal*



#### **4.4.2.- Evaluación de la estabilidad**

Al igual que el peso volumétrico se hizo siete grupos de briquetas por cada contenido de emulsión, haciendo 3 briquetas por punto de emulsión, esto con la mezcla asfáltica convencional. Para la identificación de las briquetas de la estabilidad se las enumero como: 1, 2, 3 para (6%), 4, 5, 6 para (7%), 7, 8, 9 para (8%), 10, 11, 12 para (9%), 13, 14, 15 para (10%), 16, 17, 18 para (11%) y 19, 20, 21 para (12%). Se desarrolla el cálculo paso a paso para un mejor entendimiento de la evaluación de la propiedad mecánica de la estabilidad para un contenido de emulsión de (10,5%). De la misma manera para la identificación de las briquetas con polímeros se las enumero de la siguiente manera: 1, 2 y 3 (2%); 4, 5 y 6 (3%); 7, 8 y 9 (4%); 10, 11 y 12 (5%); 13, 14 y 15 (6%); 16, 17 y 18 (7%); 19, 20 y 21 (8%); 22, 23 y 24 (9%); 25, 26 y 27 (10%) todas las briquetas mencionadas anteriormente según su porcentaje de polímeros añadidos a la emulsión asfáltica, haciendo un total de 48 briquetas para toda la investigación. Se hizo el promedio respectivo de las briquetas por punto de emulsión para las mezclas convencionales y para las briquetas con polímeros ya con el óptimo de 8,5% de emulsión, para tener el resultado de estabilidad de dicho punto de punto de emulsión. En las tablas siguientes se muestran los resultados de estabilidad obtenidos mediante el equipo Marshall, para las briquetas convencionales y las briquetas con polímeros.

La lectura dial que nos ofrece el aparato de Marshall del laboratorio de asfaltos de la *Universidad Autónoma Juan Misael Saracho* nos da las lecturas de los resultados de la estabilidad en unidades de milímetros (mm), por lo cual se las transformo a unidades de libras fuerza (lb).

Para hacer correr las lecturas de “*Estabilidad y Fluencia*” en el aparato de Marshall, antes se dejó reposar las briquetas por 60 minutos en un baño María a una temperatura de 21,5°C.

**Tabla 4.21.** Resultados de la lectura dial de la estabilidad de mezcla con emulsión convencional

(%) Emulsión	Briqueta N°	Estabilidad (mm)	Estabilidad promedio (mm)
6%	1	918	877.67
	2	812	
	3	903	
7%	4	1039	980.00
	5	976	
	6	925	
8%	7	1009	1018.00
	8	1047	
	9	998	
9%	10	1083	1009.33
	11	970	
	12	975	
10%	13	967	980.67
	14	855	
	15	1120	
11%	16	825	831.67
	17	810	
	18	860	
12%	19	713	721.00
	20	721	
	21	729	

**Fuente:** Elaboración personal

Mediante el factor de corrección de altura y de volúmenes de briquetas, se corrigió la estabilidad Marshall, que generalmente este factor de corrección es menor a 1.

**Tabla 4.22.** *Tabla de resultados de la estabilidad para la mezcla convencional*

N° de probeta	Estabilidad Marshall					
	% Emulsión Asfáltica	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio
	%	(mm)	(libras)	-	(libras)	(libras)
1	6.00	918	2,453.77	0.91	2,232.93	2,126.05
2		812	2,168.33	0.91	1,973.18	
3		903	2,413.38	0.90	2,172.04	
4	7.00	1039	2,779.60	0.91	2,529.43	2,384.86
5		976	2,609.95	0.91	2,375.06	
6		925	2,472.62	0.91	2,250.08	
7	8.00	1009	2,698.81	0.89	2,401.94	2,478.22
8		1047	2,801.14	0.92	2,577.05	
9		998	2,669.19	0.92	2,455.66	
10	9.00	1083	2,898.08	0.92	2,666.23	2,483.73
11		970	2,593.79	0.92	2,386.29	
12		975	2,607.26	0.92	2,398.68	
13	10.00	967	2,585.72	0.91	2,353.00	2,386.49
14		855	2,284.12	0.91	2,078.55	
15		1120	2,997.71	0.91	2,727.92	
16	11.00	825	2,203.34	0.91	2,005.04	2,050.66
17		810	2,162.95	0.94	2,033.17	
18		860	2,297.59	0.92	2,113.78	
19	12.00	713	1,901.75	0.91	1,730.59	1,763.09
20		721	1,923.29	0.92	1,769.42	
21		729	1,944.83	0.92	1,789.24	
					MÍNIMO	1800
					MÁXIMO	-

**Fuente:** *Elaboración personal*

**Tabla 4.21.** Resultados de la lectura dial de la estabilidad de mezcla con emulsión con polímeros

Polímeros	N°	Estabilidad (mm)	Estabilidad promedio (mm)
2.00%	1	1019	1035.67
	2	985	
	3	1103	
3.00%	4	1041	1080.67
	5	1128	
	6	1073	
4.00%	7	1181	1123.00
	8	1163	
	9	1025	
5.00%	10	1239	1143.33
	11	1072	
	12	1119	
6.00%	13	1169	1185.00
	14	1136	
	15	1250	
7.00%	16	1180	1189.67
	17	1169	
	18	1220	
8.00%	19	1202	1171.00
	20	1162	
	21	1149	
9.00%	22	1152	1070.33
	23	1070	
	24	989	
10.00%	25	1015	976.00
	26	996	
	27	917	

**Fuente:** Elaboración personal

**Tabla 4.22.** Tabla de resultados de la estabilidad para la mezcla asfáltica con polímeros

N° de probeta	% Polímero Incluido	Estabilidad Marshall				
		lectura del dial	carga	factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio
		(mm)	(libras)	-	(libras)	(libras)
1	2.00	1019	2,725.74	0.91	2,480.43	2,560.63
2		985	2,634.19	0.91	2,397.11	
3		1103	2,951.94	0.95	2,804.34	
4	3.00	1041	2,784.98	0.92	2,562.18	2,679.60
5		1128	3,019.26	0.92	2,777.72	
6		1073	2,871.15	0.94	2,698.88	
7	4.00	1181	3,161.98	0.93	2,940.64	2,775.87
8		1163	3,113.51	0.92	2,864.42	
9		1025	2,741.90	0.92	2,522.55	
10	5.00	1239	3,318.16	0.93	3,085.89	2,846.31
11		1072	2,868.46	0.93	2,667.67	
12		1119	2,995.02	0.93	2,785.37	
13	6.00	1169	3,129.66	0.93	2,910.59	2,961.81
14		1136	3,040.80	0.93	2,827.94	
15		1250	3,347.78	0.94	3,146.91	
16	7.00	1180	3,159.28	0.94	2,969.73	3,005.08
17		1169	3,129.66	0.94	2,941.88	
18		1220	3,266.99	0.95	3,103.64	
19	8.00	1202	3,218.52	0.95	3,057.60	2,968.04
20		1162	3,110.81	0.95	2,955.27	
21		1149	3,075.81	0.94	2,891.26	
22	9.00	1152	3083.88	0.94	2,898.85	2,692.13
23		1070	2863.07	0.94	2,691.29	
24		989	2644.96	0.94	2,486.26	
25	10.00	1015	2714.97	0.94	2,552.07	2,453.35
26		996	2663.81	0.94	2,503.98	
27		917	2451.08	0.94	2,304.01	
MÍNIMO					1800	
MÁXIMO					-	

*Fuente: Elaboración personal*

#### **4.4.3.- Evaluación de la fluencia**

Al igual que la estabilidad se hizo siete grupos de briquetas por cada contenido de emulsión, haciendo 3 briquetas por punto de emulsión, esto con la mezcla asfáltica convencional. Para la identificación de las briquetas de fluencia se las enumero como: 1, 2, 3 para (6%), 4, 5, 6 para (7%), 7, 8, 9 para (8%), 10, 11, 12 para (9%), 13, 14, 15 para (10%), 16, 17, 18 para (11%) y 19, 20, 21 para (12%). Se desarrolla el cálculo paso a paso para un mejor entendimiento de la evaluación de la fluencia para un contenido de emulsión de (10,5%). De la misma manera para la identificación de las briquetas con polímeros se las enumero de la siguiente manera: 1, 2 y 3 (2%); 4, 5 y 6 (3%); 7, 8 y 9 (4%); 10, 11 y 12 (5%); 13, 14 y 15 (6%); 16, 17 y 18 (7%); 19, 20 y 21 (8%); 22, 23 y 24 (9%); 25, 26 y 27 (10%) todas las briquetas mencionadas anteriormente según su porcentaje de polímeros añadidos a la emulsión asfáltica. En las tablas siguientes se muestran los resultados de fluencia obtenidos mediante el equipo de Marshall, tanto para las briquetas con emulsión convencional como para las briquetas con emulsión más polímeros.

**Tabla 4.23.** Lectura dial y resultados de la fluencia de mezcla con emulsión convencional

N° de probeta	% Emulsión Asfáltica	Fluencia		
		lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio
	%	-	-	(0,01 pulg)
1	6.00	290	0.114	11.29
2		280	0.110	
3		290	0.114	
4	7.00	300	0.118	11.55
5		290	0.114	
6		290	0.114	
7	8.00	300	0.118	11.94
8		310	0.122	
9		300	0.118	
10	9.00	320	0.126	12.07
11		300	0.118	
12		300	0.118	
13	10.00	310	0.122	12.47
14		310	0.122	
15		330	0.130	
16	11.00	320	0.126	12.73
17		320	0.126	
18		330	0.130	
19	12.00	330	0.130	12.99
20		340	0.134	
21		320	0.126	
		MÍNIMO		8
		MÁXIMO		16

**Fuente:** Elaboración personal

**Tabla 4.24. Lectura dial y resultados de la fluencia de mezcla con emulsión más polímeros**

N° de probeta	% Polímero Incluido	Fluencia		
		lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio
	%	-	-	(0,01 pulg)
1	2.00	290	0.11	11.42
2		280	0.11	
3		300	0.12	
4	3.00	290	0.11	11.55
5		300	0.12	
6		290	0.11	
7	4.00	300	0.12	11.68
8		300	0.12	
9		290	0.11	
10	5.00	310	0.12	11.81
11		290	0.11	
12		300	0.12	
13	6.00	300	0.12	11.94
14		300	0.12	
15		310	0.12	
16	7.00	310	0.12	12.07
17		300	0.12	
18		310	0.12	
19	8.00	320	0.13	12.20
20		300	0.12	
21		310	0.12	
22	9.00	320	0.13	12.47
23		310	0.12	
24		320	0.13	
25	10.00	330	0.13	12.73
26		320	0.13	
27		320	0.13	
		MÍNIMO		8
		MÁXIMO		16

**Fuente:** Elaboración personal



## 4.5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

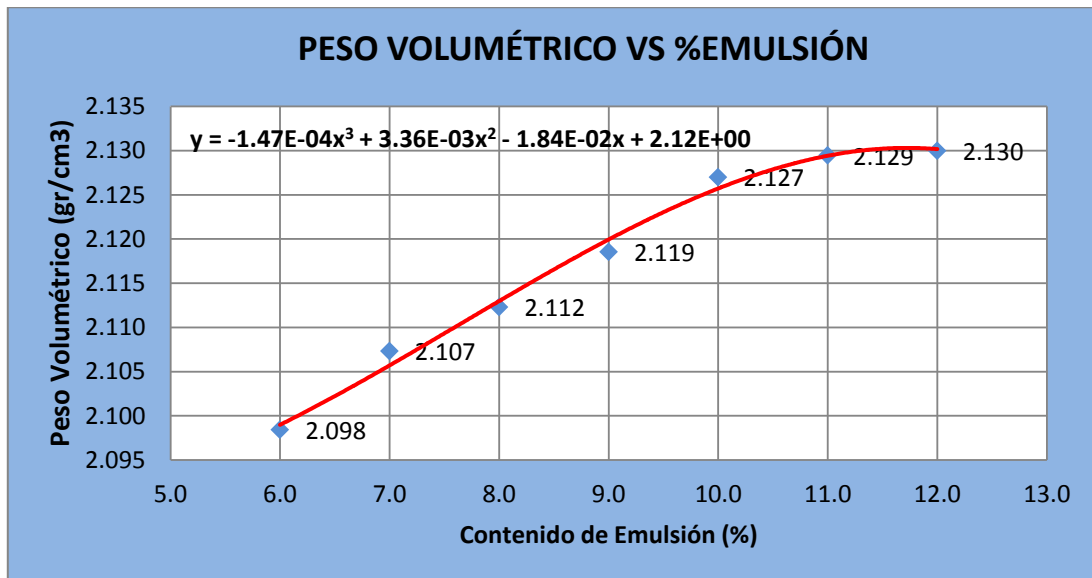
### 4.5.1.- Análisis de resultados de las propiedades mecánicas

Los resultados del comportamiento de las propiedades mecánicas se presentan en las siguientes gráficas, una vez determinado los valores de (peso volumétrico, estabilidad y fluencia) correspondientes para cada contenido de emulsión, y para contenido de polímeros, para posteriormente poder realizar un análisis de los resultados de la “mezcla asfáltica en frío con emulsión convencional” y las “mezclas asfálticas en frío con emulsión con polímeros”.

#### 4.5.1.1.- Análisis de resultados del peso volumétrico

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los % de emulsión para la mezcla asfáltica convencional y los % de polímeros para la mezcla asfáltica con polímeros con los resultados de pesos volumétricos.

*Gráfico 4.5. Análisis curva peso volumétrico vs % emulsión asfáltica*

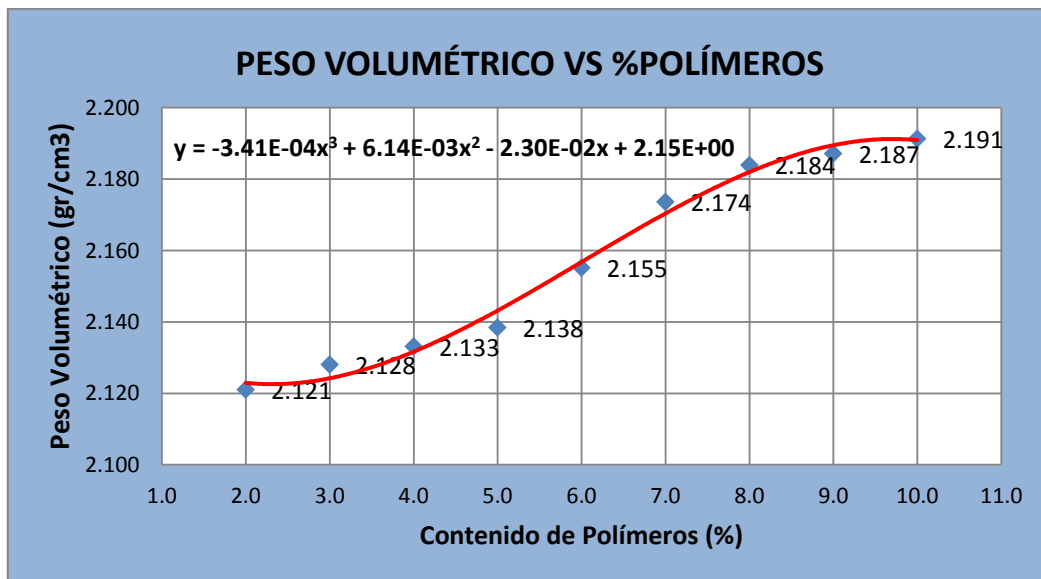


*Fuente: Elaboración personal*

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión asfáltica expresado en porcentaje con el peso volumétrico expresado en (gr/cm<sup>3</sup>), para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa una única sección, donde el peso volumétrico sube a medida que % de emulsión aumenta, se puede notar

que se mantiene el peso volumétrico entre un porcentaje de emulsión de 11% a 12%, donde al aumentar el % de emulsión el peso volumétrico empieza a aumentar de manera suave. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de emulsión entre 6% y 12%, donde tiene una variación del peso volumétrico de 2,098 a 2,130, con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación es:  $y = -1.47E-04x^3 + 3.36E-03x^2 - 1.84E-02x + 2.12E+00$ .

*Gráfico 4.6. Análisis curva peso volumétrico vs % polímeros*



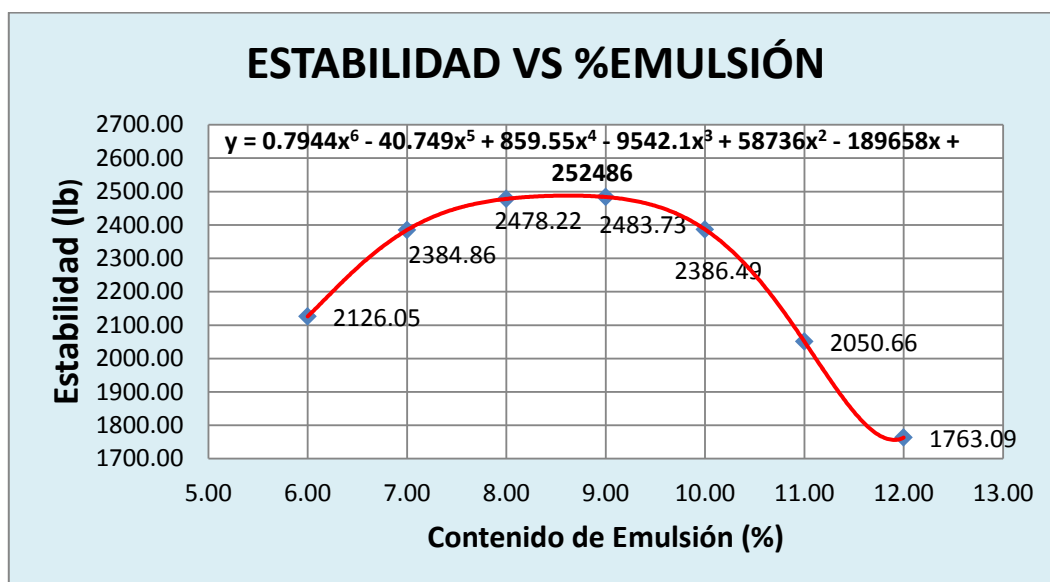
*Fuente: Elaboración personal*

En la gráfica se muestra la relación del contenido de polímeros expresado en porcentaje con el peso volumétrico expresado en (gr/cm<sup>3</sup>), para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que el peso volumétrico es directamente proporcional al % de polímeros, entonces a mayor % de polímeros, mayor peso volumétrico. Se ha hecho la investigación para el contenido óptimo de emulsión asfáltica de (8,8%), donde hay una variación de polímeros desde 2% a 10%, y una variación del peso volumétrico desde 2,121 a 2,191 (gr/cm<sup>3</sup>), con una línea de tendencia polinómica cuya ecuación se ajusta más a la curva y es la siguiente:  $y = -3.41E-04x^3 + 6.14E-03x^2 - 2.30E-02x + 2.15E+00$ .

#### 4.5.1.2.- Análisis de resultados de la estabilidad

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los % de emulsión asfáltica y los % de polímeros con los resultados de la estabilidad de cada contenido de emulsión para la mezcla asfáltica convencional y de cada contenido de polímeros para la mezcla asfáltica con polímeros.

*Gráfico 4.7. Análisis curva estabilidad vs % emulsión asfáltica*

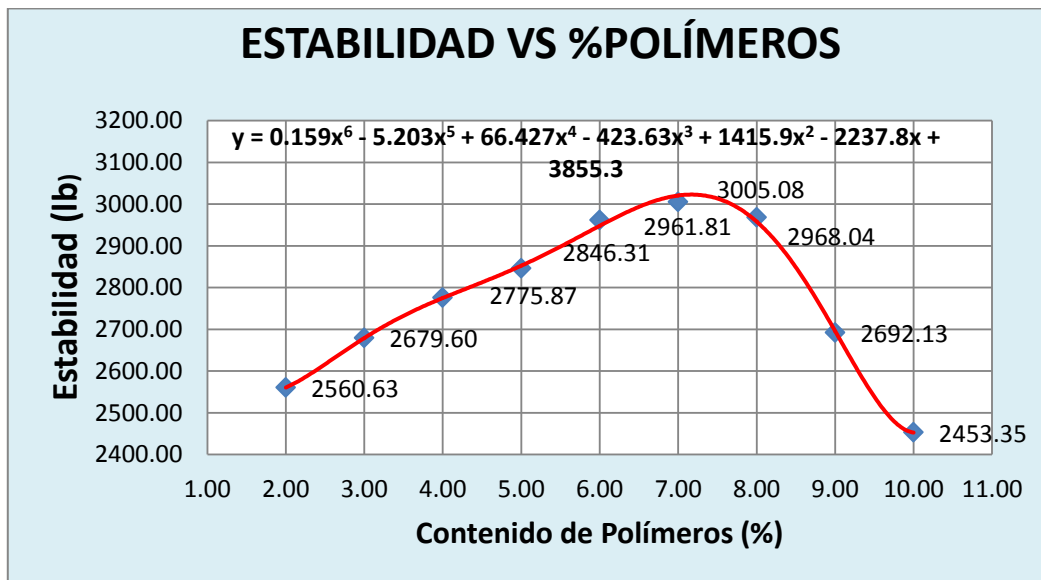


*Fuente: Elaboración personal*

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión asfáltica expresado en porcentaje con la estabilidad expresada en libras, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa en la gráfica que la estabilidad sube a medida que el porcentaje de emulsión aumenta, hasta cierto punto donde la estabilidad baja si sigue aumentando el contenido de emulsión, comprobando así que el contenido óptimo de emulsión al menos para esta propiedad mecánica esta alrededor del 8% al 9% de emulsión, lo cual no nos coincide con lo que nos fue brindado por el “Manual básico de emulsiones asfálticas”, que era un óptimo de 10,5%, sin embargo el valor sirvió para estimar el óptimo calculado. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de emulsión entre 6% y 12%, cuyas estabilidades nos marcan desde 2126,05 lb hasta 1763,09 lb, siendo el mayor valor el

de **2486,76 lb**, que se obtiene al contenido de emulsión de **8,80%** que vendría a ser el óptimo investigado para esta propiedad mecánica de acuerdo a la ecuación de la gráfica, con una línea de tendencia polinómica que fue la que más se adaptó a la curva y cuya ecuación es la siguiente:  $y = 0.7944x^6 - 40.749x^5 + 859.55x^4 - 9542.1x^3 + 58736x^2 - 189658x + 252486$ .

**Gráfico 4.8.** *Análisis curva estabilidad vs % polímeros*



*Fuente: Elaboración personal*

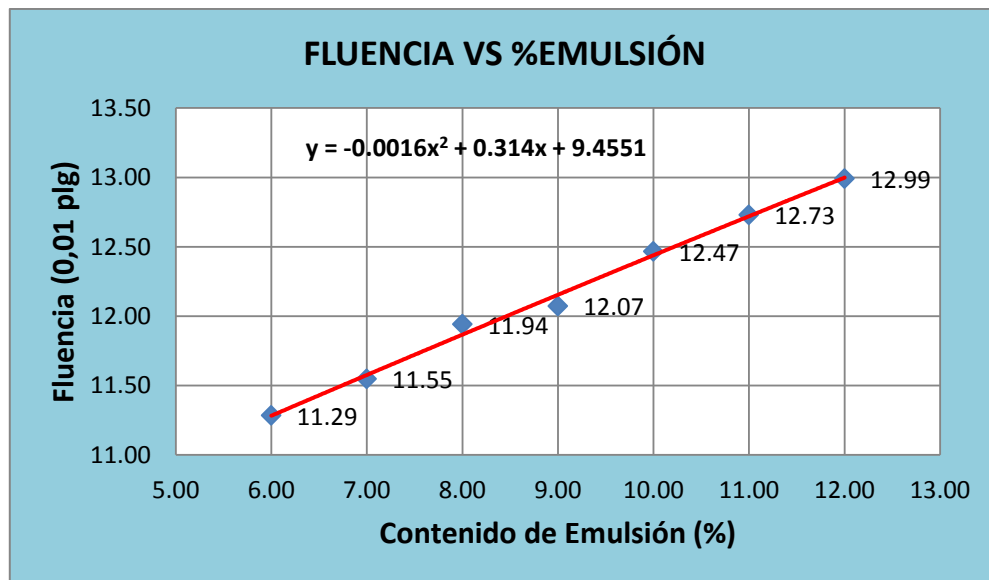
En la gráfica se muestra la relación del contenido de polímeros expresado en porcentaje con la Estabilidad expresada en libras, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica de estabilidad, se nota que va aumentando la estabilidad a medida que se aumenta el contenido de polímeros, hasta un punto donde empieza a bajar, es decir que hay un óptimo de contenido de polímeros para una estabilidad óptima que se ha logrado obtener en la presente investigación. Se ha hecho la investigación para el óptimo de porcentaje de emulsión asfáltica de **8,80%** el cual se lo determino con el cálculo, por lo cual no coincide con el valor de 10,5% brindado por el “Manual Básico de Emulsiones Asfálticas” explicado en el punto 4.2.2. sin embargo este valor nos ayudó

a determinar el óptimo encontrado, para valores de contenido de polímeros entre 2% a 10% y cuyas estabilidades nos marcan desde 2560,63 lb hasta 2453,35 lb, siendo el valor óptimo de estabilidad de **3016,78 lb** para un valor óptimo de contenido de polímeros de **7,15%**, de acuerdo a la ecuación investigada con una línea de tendencia polinómica de sexto grado, que fue la que más se acomodó a la curva investigada y cuya ecuación es la siguiente:  $y = 0.159x^6 - 5.203x^5 + 66.427x^4 - 423.63x^3 + 1415.9x^2 - 2237.8x + 3855.3$ , dejando así bien en claro que el contenido óptimo de los polímeros utilizados en esta investigación, para una mezcla asfáltica con emulsión en frío es de **7,15%**.

#### 4.5.1.3.- Análisis de resultados de la fluencia

Se optó por realizar las curvas de los gráficos siguientes entre los % de emulsión asfáltica para la mezcla asfáltica convencional y los % de polímeros para la mezcla asfáltica con polímeros con los resultados de fluencia de cada contenido de emulsión y polímeros en su caso.

*Gráfico 4.9. Análisis curva fluencia vs % emulsión asfáltica*

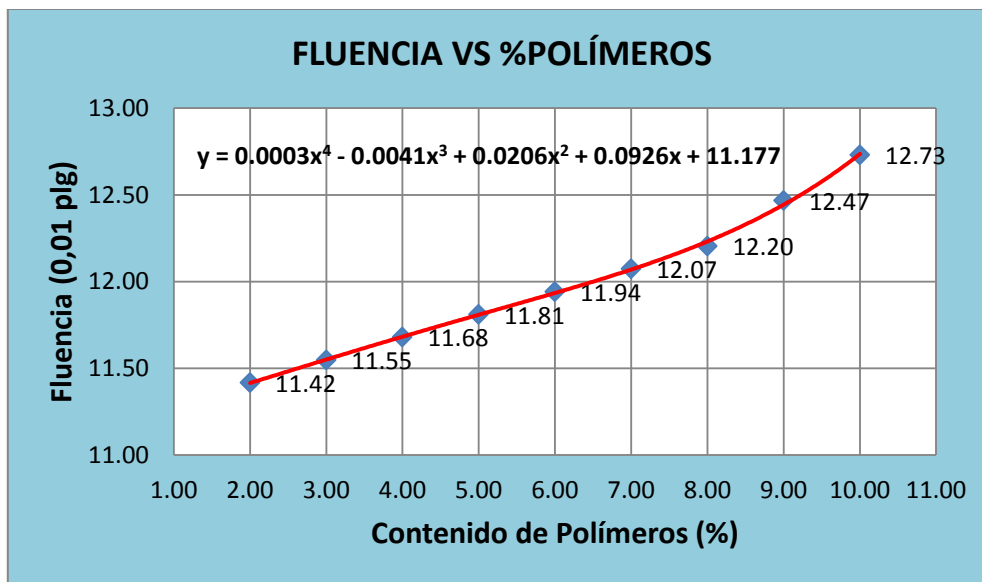


*Fuente: Elaboración personal*

En la gráfica se muestra la relación del contenido de emulsión asfáltica expresado en porcentaje con la fluencia expresado en 0,01 pulgadas, para poder ver y conocer el

comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica el flujo es proporcional al % de emulsión asfáltica, es decir que a mayor % de emulsión, mayor será el flujo. Se ha hecho la investigación para valores de contenido de emulsión entre 6 y 12%, donde tienen una variación de la fluencia de 11,29 a 12,99 centésimas de pulgada, siendo el mayor valor el 12,99 centésimas de pulgada que se obtiene al contenido de emulsión de 12%, con una línea de tendencia polinómica de segundo grado cuya ecuación es:  $y = -0.0016x^2 + 0.314x + 9.4551$ .

**Gráfico 4.10.** *Análisis curva fluencia vs % polímeros*



*Fuente: Elaboración personal*

En la gráfica se muestra la relación del contenido de polímeros expresado en porcentaje con la fluencia expresada en 0,01 pulgadas, para poder ver y conocer el comportamiento que tiene la propiedad mecánica, se observa que en la gráfica el flujo es proporcional al % de polímeros, es decir que a mayor % de polímeros, mayor será el flujo. Se ha hecho la investigación para el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de **8,80%** valor calculado, por lo cual no coincide con el valor de 10,5% proporcionado por el “*Manual Básico de Emulsiones Asfálticas*”, pero sin embargo nos sirvió para determinar el óptimo calculado, para valores de contenido de polímeros entre 2 a 10% donde tienen una variación de la fluencia de 11,42 a 12,73

centésimas de pulgada, siendo el mayor valor de 12,73 centésimas de pulgada que se obtiene al contenido de polímero de 10%, con una línea de tendencia polinómica de cuarto grado cuya ecuación es:  $y = 0.0003x^4 - 0.0041x^3 + 0.0206x^2 + 0.0926x + 11.177$ .

#### 4.5.2.- Análisis de ahorro de energía y costo en la producción de mezcla asfáltica con emulsión en frío respecto a una mezcla asfáltica convencional

La energía necesaria para producir mezclas frías es significativamente menor a la energía que se requiere para producir las mezclas asfálticas en caliente convencionales, según estudios realizados, la producción de mezcla asfáltica fría requiere entre un 30% a un 50% menos combustible en comparación a la mezcla asfáltica convencional.

*Tabla 4.25. Producción de mezcla asfáltica en caliente*

Temperatura de Mezclado (°C)	Cantidad de Mezcla (Tn/h)	Energía Combustible Diesel (Lt/h)	Costo del Diesel (Bs)
150	90	800	2992.00

*Fuente: Planta de Asfalto de la Alcaldía Municipal de Tarija*

*Tabla 4.26. Producción de mezcla asfáltica en frío*

Temperatura de Mezclado (°C)	Cantidad de Mezcla (Tn/h)	Energía Combustible Diesel (Lt/h)	Costo del Diesel (Bs)
60	90	560	2094.40

*Fuente: Planta de Asfalto de la Alcaldía Municipal de Tarija*

$$\Delta \text{Energía} = \frac{800 - 560}{800} * 100$$

$$\Delta \text{Energía} = 30\%$$

El ahorro de energía debido a las bajas temperaturas de producción de mezclas asfálticas frías respecto a las mezclas asfálticas en caliente es del 30% por hora.

$$\Delta \text{Costo} = \frac{2992,00 - 2094,40}{2992,00} * 100$$

$$\Delta \text{Costo} = 30\%$$



La reducción en costo para la producción de mezclas asfálticas frías respecto a las mezclas asfálticas en caliente es del 30% por hora.

#### 4.5.3.- Análisis comparativo de la mezcla asfáltica con emulsión en frío con polímeros vs la mezcla asfálticas convencional en caliente en costos

*Tabla 4.27.- Análisis de precios unitarios de la mezcla asfáltica en caliente*

<b>ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS</b>				
<b>PROYECTO: CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE</b>				
<b>ACTIVIDAD: COLOCADO DE CARPETA</b>				
<b>CANTIDAD: 1.00</b>			<b>MONEDA: BOLIVIANOS</b>	
<b>UNIDAD : m3</b>				
<b>DESCRIPCION</b>	<b>UNID.</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO PRODUCTIVO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
<b>1. MATERIALES</b>				
Diesel	lt	2.50	3.72	9.30
Arena Clasificada	m3	0.55	145.00	79.75
Cemento Asfáltico	kg	60.00	12.00	720.00
Grava Triturada Clasificada 3/4"	m3	0.50	152.00	76.00
Gravilla Triturada Clasificada 3/8"	m3	0.35	162.00	56.70
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>941.75</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Obrero	Hr	0.150	13.18	1.98
Capataz	Hr	1.800	18.02	32.44
Chofer	Hr	0.030	16.44	0.49
Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0.030	13.18	0.40
Operador de planta	Hr	0.200	24.85	4.97
Operador de Equipo liviano	Hr	0.300	16.44	4.93
Operador	Hr	0.820	18.02	14.78
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>59.98</b>
CARGAS SOCIALES 72%				43.19
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA 14,94%				15.41
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>118.58</b>
<b>3. EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>				
Terminadora de Asfalto	Hr	0.120	350.00	42.00
Cargador frontal de Ruedas	Hr	0.030	420.70	12.62
Compactador rodillo liso y pata d cabra	Hr	0.060	304.66	18.28
Escoba mecánica autopropulsada	Hr	0.080	70.60	5.65
Planta de calentamiento de Asfalto	Hr	0.200	964.97	192.99
Rodillo neumático TPS 10000	Hr	0.200	332.33	66.47
Volquete 12 m3 o 20 Tn	Hr	0.030	227.85	6.84
HERRAMIENTAS 5%				5.93
<b>TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>				<b>350.78</b>
<b>4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>				
GASTOS GENERALES 15,5%				218.72
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>				<b>569.50</b>
<b>5. UTILIDAD</b>				
UTILIDAD 10%				198.06
<b>TOTAL UTILIDAD</b>				<b>198.06</b>
<b>6. IMPUESTOS</b>				
IMPUESTOS IT 3,09%				67.32
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>				<b>67.32</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>2,245.99</b>

Son: Dos Mil Doscientos Cuarenta y Cinco 99/100 Bolivianos

*Fuente: Elaboración Personal*

**Tabla 4.28.- Análisis de precios unitarios de la mezcla asfáltica en frío**

<b>ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS</b>				
<b>PROYECTO: CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO EN FRÍO</b>				
<b>ACTIVIDAD: COLOCADO DE CARPETA</b>				
<b>CANTIDAD: 1.00</b>			<b>MONEDA: BOLIVIANOS</b>	
<b>UNIDAD : m3</b>				
<b>DESCRIPCION</b>	<b>UNID.</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO PRODUCTIVO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
<b>1. MATERIALES</b>				
Diesel	lt	1.50	3.72	5.58
Arena Clasificada	m3	0.55	145.00	79.75
Emulsión Convencional	lt	80.00	15.00	1,200.00
Grava Triturada Clasificada 3/4"	m3	0.50	152.00	76.00
Gravilla Triturada Clasificada 3/8"	m3	0.35	162.00	56.70
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>1,418.03</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Obrero	Hr	0.070	13.18	0.92
Capataz	Hr	1.200	18.02	21.62
Chofer	Hr	0.020	16.44	0.33
Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0.020	13.18	0.26
Operador de planta	Hr	0.010	24.85	0.25
Operador de Equipo liviano	Hr	0.080	16.44	1.32
Operador	Hr	0.400	18.02	7.21
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>31.91</b>
CARGAS SOCIALES 72%				22.98
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA 14,94%				8.20
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>63.09</b>
<b>3. EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>				
Terminadora de Asfalto	Hr	0.040	350.00	14.00
Cargador frontal de Ruedas	Hr	0.010	420.70	4.21
Compactador rodillo liso y pata d cabra	Hr	0.020	304.66	6.09
Escoba mecánica autopropulsada	Hr	0.030	70.60	2.12
Planta de calentamiento de Asfalto	Hr	0.050	964.97	48.25
Rodillo neumático TPS 10000	Hr	0.080	332.33	26.59
Volquete 12 m3 o 20 Tn	Hr	0.030	227.85	6.84
HERRAMIENTAS 5%				3.15
<b>TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>				<b>111.25</b>
<b>4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>				
GASTOS GENERALES 15,5%				246.82
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>				<b>358.07</b>
<b>5. UTILIDAD</b>				
UTILIDAD 10%				195.04
<b>TOTAL UTILIDAD</b>				<b>195.04</b>
<b>6. IMPUESTOS</b>				
IMPUESTOS IT 3,09%				66.30
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>				<b>66.30</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>2,211.78</b>
Son: Dos Mil Doscientos Once con 78/100 Bolivianos				

*Fuente: Elaboración Personal*

## 4.6. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

### 4.6.1.- Comparación de resultados del peso volumétrico

*Tabla 4.29. Peso volumétrico en la mezcla asfáltica convencional*

Porcentaje de emulsión (%)	Peso volumétrico (gr/cm <sup>3</sup> )
6.0	2.098
7.0	2.107
8.0	2.112
9.0	2.119
10.0	2.127
11.0	2.129
12.0	2.130

*Fuente: Elaboración personal*

*Tabla 4.30. Peso volumétrico en la mezcla asfáltica con polímeros*

Porcentaje de emulsión del 8,8%	
Polímeros (%)	Peso volumétrico (gr/cm <sup>3</sup> )
2.0	2.121
3.0	2.128
4.0	2.133
5.0	2.138
6.0	2.155
7.0	2.174
8.0	2.184
9.0	2.187
10.0	2.191

*Fuente: Elaboración personal*

Como podemos apreciar en las tablas mostradas anteriormente: En la tabla para el peso volumétrico de la mezcla convencional que está de acuerdo a 7 puntos de contenido de emulsión, cuyo valor máximo recae en el porcentaje de emulsión de 12% y este valor de peso volumétrico es de **2,130** (gr/cm<sup>3</sup>), pues este valor es menor que el peso volumétrico máximo de las mezclas asfálticas ensayadas con polímeros, este valor máximo es de **2,191** (gr/cm<sup>3</sup>) cuyo valor recae en 10% de contenido de polímeros, pues este valor es el máximo porcentaje de contenido de polímeros de todos los ensayos para las mezclas con polímeros, entonces quiere decir que al

adicionar polímeros a las mezclas asfálticas con emulsión en frío aumenta el peso volumétrico. Por lo cual la mezcla asfáltica con polímeros tiene mayor peso volumétrico que las mezclas asfálticas convencionales (2,191>2,130).

#### 4.6.2.- Comparación de resultados de estabilidad

*Tabla 4.31. Estabilidad en la mezcla asfáltica convencional*

Porcentaje de emulsión (%)	Estabilidad (libras)
6.00	2126.05
7.00	2384.86
8.00	2478.22
9.00	2483.73
10.00	2386.49
11.00	2050.66
12.00	1763.09

*Fuente: Elaboración personal*

*Tabla 4.32. Estabilidad en la mezcla asfáltica con polímeros*

Porcentaje de emulsión del 8,8%	
Polímeros (%)	Estabilidad (libras)
2.00	2560.63
3.00	2679.60
4.00	2775.87
5.00	2846.31
6.00	2961.81
7.00	3005.08
8.00	2968.04
9.00	2692.13
10.00	2453.35

*Fuente: Elaboración personal*

Mediante las tablas anteriores se puede denotar fácilmente que el valor de la estabilidad en la mezcla asfáltica con polímeros al 7% de polímeros es mayor que el valor de la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional con el contenido óptimo de emulsión al 9%. Se pudo comprobar que las mezclas asfálticas con polímeros al 7% (a simple vista mediante las tablas) tienen mayor estabilidad que las mezclas asfálticas convencionales con contenido óptimo de emulsión asfáltica, con las gráficas 4.7. y 4.8. mostradas anteriormente, estas gráficas nos dan resultados de

estabilidad, cada una con sus respectivas ecuaciones de las cuales encontramos un valor óptimo de estabilidad para cada una, para la mezcla asfáltica convencional el valor de estabilidad máxima es de **2486,76 lb**, que se obtiene al contenido de emulsión de 8,80% y para la mezcla asfáltica con polímeros el valor de estabilidad es de **3016,78 lb** para un valor óptimo de contenido de polímeros de 7,15%, por lo cual para esta propiedad mecánica el valor de la estabilidad mayor en este caso es el de la mezcla asfáltica con polímeros al 7,15% de contenido de polímeros (**3016,78>2486,76**), es decir que esta propiedad mecánica en las mezclas asfálticas con polímeros para un contenido de 7,15% de polímeros funcionaría correctamente. Y en todo caso las estabilidades estudiadas para un contenido óptimo de emulsión asfáltica y un contenido óptimo de polímeros (fibras de botellas de plástico y microretazos de bolsas de leche), están por encima del valor mínimo de estabilidad para tráfico pesado que es de 1800 libras.

#### 4.6.3.- Comparación de resultados de la fluencia

*Tabla 4.33. Fluencia en la mezcla asfáltica convencional*

Porcentaje de emulsión (%)	Fluencia promedio (0,01 pulg)
6.00	11.29
7.00	11.55
8.00	11.94
9.00	12.07
10.00	12.47
11.00	12.73
12.00	12.99

*Fuente: Elaboración personal*

**Tabla 4.34.** *Fluencia en la mezcla asfáltica con polímeros*

<b>Polímeros (%)</b>	<b>Fluencia promedio (0,01 pulg)</b>
2.00	11.42
3.00	11.55
4.00	11.68
5.00	11.81
6.00	11.94
7.00	12.07
8.00	12.20
9.00	12.47
10.00	12.73

**Fuente:** *Elaboración personal*

De las tablas anteriores se puede observar que para la mezcla asfáltica convencional la fluencia es directamente proporcional al porcentaje de emulsión en la mezcla, es decir mientras más contenido de emulsión haya más alto será el valor de la fluencia, por lo que para estas mezclas el valor de fluencia más alto es de **12,99** centésimas de pulgada a un contenido de emulsión de 12%. Mientras que para las mezclas asfálticas con polímeros, de igual manera la fluencia es directamente proporcional al contenido de polímeros en la mezcla y el valor más alto para estas mezclas es de **12,73** centésimas de pulgada para un contenido de polímeros del 8,80%. En general la fluencia aumenta si hay más emulsión en la mezcla y aumenta diminutamente más si se añade polímeros a la mezcla. Entonces existe más fluencia en una mezcla asfáltica con polímeros que en una mezcla asfáltica convencional, según lo investigado en el presente proyecto (**12,99>12,73**), para este caso estudiado si nos ponemos a revisar los resultados de fluencia, son mayores las fluencias en las mezclas asfálticas convencionales, porque para la realización de la mezcla con polímeros se trabajó con el óptimo de 8,80% de emulsión asfáltica, en todo caso las fluencias en ambas mezclas no están fuera de los límites de diseño para tráfico pesado cuyos rangos son desde 8 a 16 centésimas de pulgada.

#### 4.7.- VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

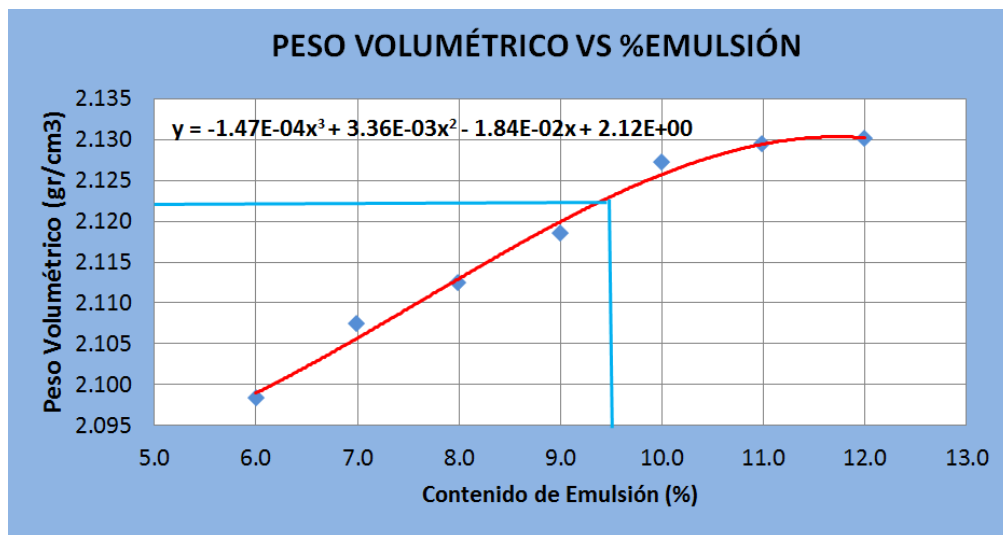
Para verificar que los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas mostrados anteriormente estén bien, se realizara la validez de los mismos a través de las ecuaciones de las curvas graficadas. En donde nos asumiremos un contenido de emulsión, en este caso se asumió el valor de 9,5% de emulsión, que equivale a 114 ml de emulsión para una briqueta de 1200 gr, que a su vez también equivale a 114 lt/m<sup>3</sup> de emulsión.

##### Peso volumétrico de la ecuación

Valor asumido:

9,5%=114 ml

*Gráfico 4.11. Validación de curva peso volumétrico vs % emulsión asfáltica*



*Fuente: Elaboración personal*

Ecuación de curva peso volumétrico vs % emulsión asfáltica

$$y = -1.47E-04x^3 + 3.36E-03x^2 - 1.84E-02x + 2.12E+00$$

Cálculos:

X=9,5%

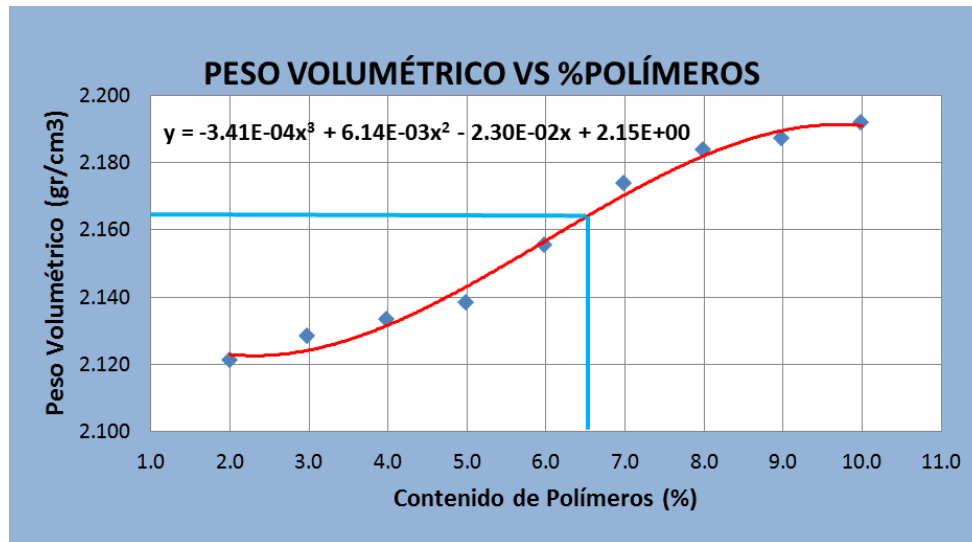
Y=?

$$y = -1.47E-04x^3 + 3.36E-03x^2 - 1.84E-02x + 2.12E+00$$

$$y = -1.47E-04 * 9,5^3 + 3.36E-03 * 9,5^2 - 1.84E-02 * 9,5 + 2.12E+00$$

$$y = 2,122 \text{ gr/cm}^3$$

*Gráfico 4.12. Validación de curva peso volumétrico vs % polímeros*



*Fuente: Elaboración personal*

Ecuación de curva peso volumétrico vs % polímeros

$$y = -3.41E-04x^3 + 6.14E-03x^2 - 2.30E-02x + 2.15E+00$$

Cálculos:

$$X=6,5\%$$

Y=?

$$y = -3.41E-04x^3 + 6.14E-03x^2 - 2.30E-02x + 2.15E+00$$

$$y = -3.41E-04 * 6,5^3 + 6.14E-03 * 6,5^2 - 2.30E-02 * 6,5 + 2.15E+00$$

$$y = 2,166 \text{ gr/cm}^3$$

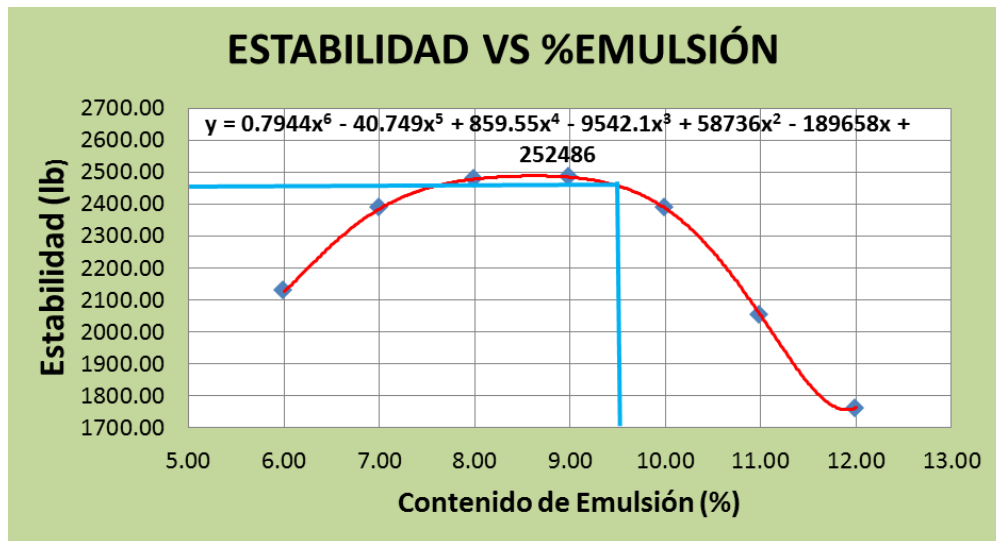


### **Validación del peso volumétrico**

Los resultados de las ecuaciones están muy aproximados al indicado por las flechas de las gráficas anteriores, por lo cual cumple con la validación de la curva de peso volumétrico vs % emulsión asfáltica y también con la validación de peso volumétrico vs % polímeros.

## Estabilidad de la ecuación

Gráfico 4.13. Validación de curva estabilidad vs % emulsión asfáltica



Fuente: Elaboración personal

Ecuación de curva de estabilidad vs % emulsión asfáltica

$$y = 0.7944x^6 - 40.749x^5 + 859.55x^4 - 9542.1x^3 + 58736x^2 - 189658x + 252486$$

Cálculos:

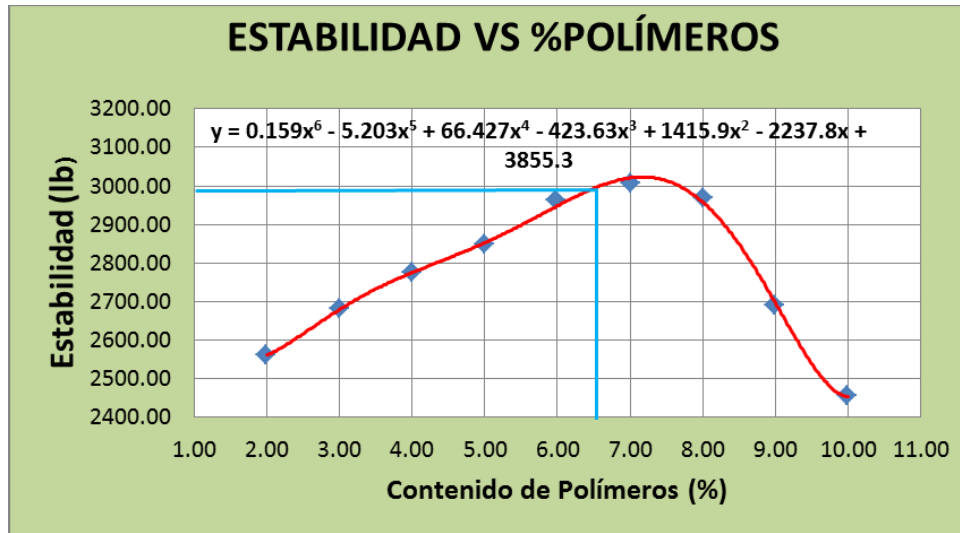
$$y = 0.7944x^6 - 40.749x^5 + 859.55x^4 - 9542.1x^3 + 58736x^2 - 189658x + 252486$$

$$y = 0.7944*9,5^6 - 40.749*9,5^5 + 859.55*9,5^4 - 9542.1*9,5^3 + 58736*9,5^2 - 189658*9,5 + 252486$$

$$X = 9,5\%$$

$$Y = 2466,54 \text{ lb}$$

**Gráfico 4.14.** Validación de curva estabilidad vs % polímeros



*Fuente: Elaboración personal*

Ecuación de curva de estabilidad vs % polímeros

$$y = 0.159x^6 - 5.203x^5 + 66.427x^4 - 423.63x^3 + 1415.9x^2 - 2237.8x + 3855.3$$

Cálculos:

$$y = 0.159x^6 - 5.203x^5 + 66.427x^4 - 423.63x^3 + 1415.9x^2 - 2237.8x + 3855.3$$

$$y = 0.159*6,5^6 - 5.203*6,5^5 + 66.427*6,5^4 - 423.63*6,5^3 + 1415.9*6,5^2 - 2237.8*6,5 + 3855.3$$

$$X=6,5\%$$

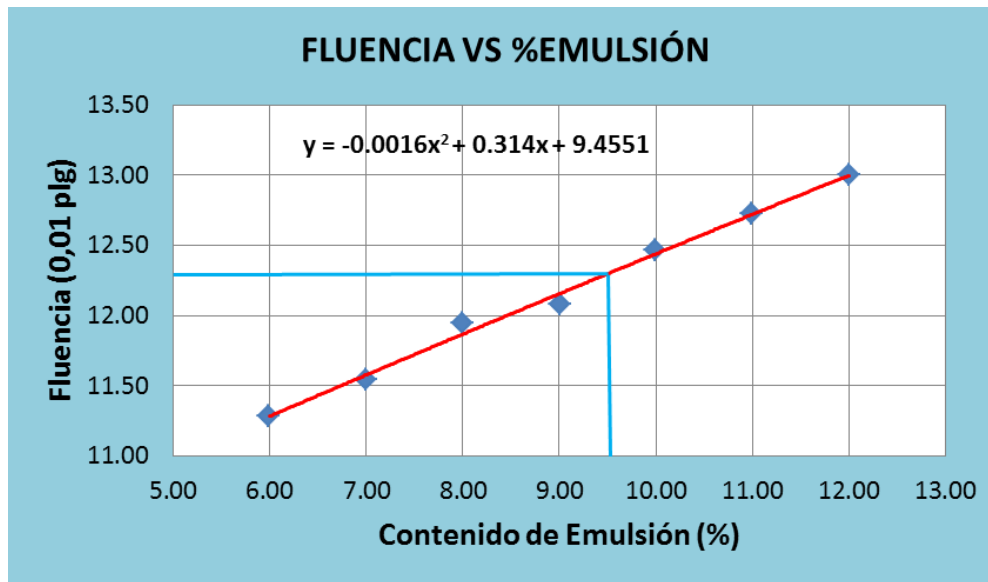
$$Y = 2990,02 \text{ lb}$$

### Validación de la estabilidad

Podemos ver en las curvas que los resultados de estabilidad obtenidos con las ecuaciones coinciden con el de las curvas, por lo cual se cumple con la validación de las ecuaciones de la estabilidad, tanto con emulsión asfáltica como con polímeros.

## Fluencia de la ecuación

Gráfico 4.15. Validación de curva fluencia vs % emulsión asfáltica



Fuente: Elaboración personal

Cálculos:

Ecuación curva fluencia vs % de emulsión

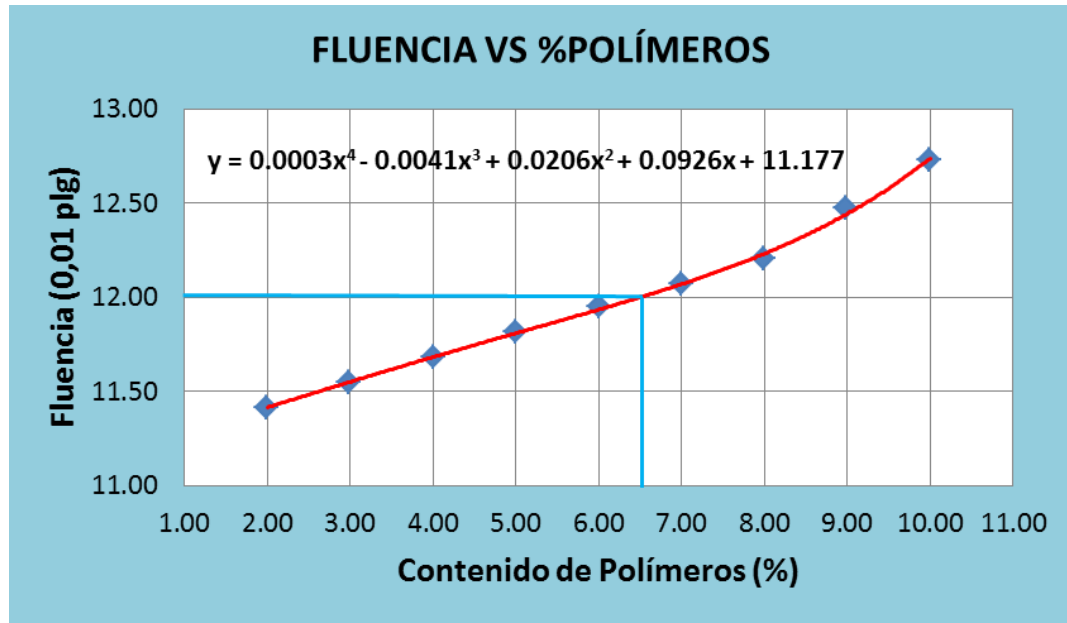
$$y = -0,0016x^2 + 0,314x + 9,4551$$

$$y = -0,0016 \cdot 9,5^2 + 0,314 \cdot 9,5 + 9,4551$$

$$X = 9,5\%$$

$$Y = 12,29 \text{ Centésimas de pulgada}$$

*Gráfico 4.16. Validación de curva fluencia vs % contenido de polímeros*



*Fuente: Elaboración personal*

Cálculos:

Ecuación curva fluencia vs % contenido de polímeros

$$y = 0.0003x^4 - 0.0041x^3 + 0.0206x^2 + 0.0926x + 11.177$$

$$y = 0.0003*6,5^4 - 0.0041*6,5^3 + 0.0206*6,5^2 + 0.0926*6,5 + 11.177$$

$$X = 6,5\%$$

$$Y = 12,06 \text{ Centésimas de pulgada}$$

### **Validación de la fluencia**

Como se puede observar en la curva anterior las flechas indican en el mismo valor proporcionado y calculado mediante su ecuación, por lo cual cumple con la validación de la fluencia.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1.-CONCLUSIONES

- Se determinó la proporción de agregados pétreos mediante una combinación que pudo cumplir con las especificaciones de la banda granulométrica de acuerdo con la ASTM D3515 que se detallan en el “*Manual de asfalto del instituto del asfalto*”, llegando a establecer que la combinación granulométrica fue de 30% grava de  $\frac{3}{4}$ ”, 20% gravilla de  $\frac{3}{8}$ ” y 50% de arena, usada para realizar la mezcla.
- Los resultados obtenidos de peso volumétrico de la mezcla asfáltica con polímeros, luego de ensayar cada una de las briquetas elaboradas y su posterior análisis se obtienen valores mayores que los obtenidos en la mezcla asfáltica convencional.
- Se evaluó la estabilidad de cada una de las briquetas donde el óptimo de polímeros recae en 7,15% y su estabilidad que también vendría a ser la máxima fue de **3016,78 lb**, este valor de estabilidad es superior a la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional, la cual nos da valores máximos de la curva de estabilidad de **2486,76 lb**, que se obtiene al contenido de emulsión de 8,80%, demostrando con ello que con la mezcla asfáltica con emulsión en frío con polímeros se obtienen mejores resultados para la propiedad mecánica de estabilidad.
- Se evaluó la fluencia de cada una de las briquetas, con lo que se obtuvo un resultado de fluencia máximo de **12,99** centésimas de pulgada, superior a la de la emulsión con polímeros que fue de **12,73** centésimas de pulgada, demostrando con ello, que con la mezcla asfáltica con emulsión en frío con la adición de polímeros se obtienen resultados menores de fluencia, por lo cual se mejoró la propiedad de fluencia.
- Quedó comprobado que las propiedades del ligante asfáltico pueden influir decisivamente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica, en una mezcla que contenga la misma granulometría y el

mismo tipo de agregados pétreos, con un mismo contenido de ligante asfáltico modificado con las propiedades de los polímeros añadidos al mismo.

- La componente elástica del ligante asfáltico modificado con los polímeros añadidos, contribuye a aumentar el comportamiento elástico de la mezcla, de igual forma el ligante modificado, influye decisivamente en la componente viscosa y su mayor presencia dentro la mezcla hace que aumente esta componente.
- El comportamiento viscoso que experimenta la mezcla en su preparación ayuda a obtener un mejor acomodo de las partículas de agregados en el momento del colocado de la mezcla al molde y en la compactación para la realización de las briquetas.
- Se demuestra que las propiedades mecánicas evaluadas para una mezcla asfáltica con emulsión en frío con polímeros con la mezcla asfáltica convencional no son equivalentes en ninguna de las propiedades estudiadas, debido a que existe diferencia entre ambas mezclas, mejorando las propiedades mecánicas con la utilización de polímeros en la emulsión.
- La utilización de polímeros en las mezclas asfálticas con emulsión en frío, dio resultados que están dentro de los límites normados; para tráfico pesado, tanto en la estabilidad como en la fluencia de los mismos, para tráfico pesado lo mínimo normado para la propiedad mecánica de estabilidad es de 1800 lb, por lo cual los valores de estabilidad obtenidos son mayores, para la fluencia el rango de la misma para tráfico pesado esta entre 8 a 16 centésimas de pulgada y los valores obtenidos están dentro de este rango.
- La utilización de polímeros como las fibras de botellas de plástico y los micro-retazos de bolsas de leche al formar parte de la mezcla asfáltica en frío podrían ayudar a la conservación del medio ambiente y la no contaminación del mismo, debido a que los polímeros presentan muy buenas resistencias a la corrosión, por su lenta descomposición y degradación, además estos polímeros son muy útiles para la durabilidad de las mezclas asfálticas.
- Las mezclas asfálticas con emulsión en frío con polímeros reciclados, tienen menor costo que las mezclas asfálticas con cemento asfálticos en caliente



convencionales, es una reducción ligera de costo si se van a utilizar para mantenimientos o tratamientos, pero si se usan para construir carreteras en magnitud sería significativa la parte económica.

## **5.2.- RECOMENDACIONES**

- Cuando los ligantes asfálticos son poco viscosos, de alta penetración, provocan que las mezclas asfálticas sean muy susceptibles a las deformaciones plásticas, por eso se recomienda utilizar ligantes asfálticos más duros y de mayor viscosidad.
- Tener mucho cuidado con la manipulación y almacenamiento de la emulsión asfáltica ya que debido a eso se puede perder propiedades y porcentaje de agua, debido a la evaporación de la misma.
- Hacer un buen uso del tiempo para la realización de la caracterización de los agregados y de la emulsión por falta de equipos y materiales en los laboratorios, esto debido al crecimiento poblacional universitario.
- Tener mucha paciencia al realizar los ensayos de la caracterización de la emulsión, especialmente al calentar la emulsión a altas temperaturas.
- Tener en cuenta los moldes y el martillo para la realización de las briquetas, por falta de material en los laboratorios, porque son muestras que se necesitan para realizar el trabajo de investigación.
- Tomar muy en cuenta la variación y controlar muy de cerca la temperatura al momento de estar haciendo la mezcla asfáltica con emulsión en frío.
- Ser precisos al utilizar los equipos para la medición ya que se necesita precisión de los mismos para la obtención de buenos resultados para la investigación.
- Dar mantenimiento al equipo de Marshall para la compactación y sobre todo a la prensa debido a la calibración del anillo de carga Marshall, porque podría afectar a los resultados.
- Pesar bien los materiales para la dosificación, para no tener consecuencias futuras, de volver a realizar la mezcla por una mala dosificación.